

## 光轴检测模型中背景干扰分析与闪烁补偿方法探讨

母一宁<sup>1</sup> 王贺<sup>1,2</sup> 李平<sup>1</sup> 张金瑞<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022;  
<sup>2</sup> 吉林交通职业技术学院电子信息工程系, 吉林 长春 130022)

**摘要** 为了增强四象限光电检测模型对大气环境的适应性,在大气信道二次调制的基础上对四象限光电检测模型展开了研究。首先从误差原理的角度,推导大气环境下光轴检测系统中的固有分辨精度与细分精度的关系;接着通过分析四象限光电检测系统在大气环境下受到的外界约束条件,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两个重要技术参数。在此基础上,提出在大气环境下提高光轴检测系统的固有分辨精度可以降低整个系统对大气信道的敏感度,大气信道对光轴检测的细分影响严重,如果采用较高的固有分辨精度,光轴检测精度依然可以满足激光通信光轴对准的需要。

**关键词** 光通信;无线激光通信;四象限探测器;光轴检测

**中图分类号** TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.060601

## Discussion on Scintillation Compensation Method and Background Interference Analysis in Optical-Axis Detection Model

Mu Yining<sup>1</sup> Wang He<sup>1,2</sup> Li Ping<sup>1</sup> Zhang Jinrui<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Space Optical Electronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China  
<sup>2</sup> School of Electronic and Information Engineering, Jilin Communications Polytechnic, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** The four-quadrant photoelectric inspection model is studied on the basis of the second atmospheric channel modulator for enhancing the four-quadrant photoelectric inspection adaptability of the atmospheric channel. Firstly, the conversion relations of natural resolution and division precision are discussed from error theory perspectives for the analysis of the axis detection system. Afterwards, through the analysis of restricted constraint condition of four-quadrant photoelectric inspection system in atmospheric channel, it is found that the signal-to-noise ratio (SNR) of the beacon light and axis offset are two main technical parameters affecting the electro-optical inspection system. Then a concept is presented that enhancing natural resolution optical-axis detection system can lower the sensitivity of the whole system to the atmospheric channel. Finally, the division precision of axis detection is found to be gravely affected by the atmospheric channel. Axis detection can still provide precision for wireless laser communication if the natural resolution of four-quadrant photoelectric inspection is enhanced.

**Key words** optical communications; wireless laser communication; four-quadrant-detector; optical-axis detection

**OCIS codes** 060.2605; 040.1345; 040.1520

## 1 引言

大气信道中包含固体、气体和液体分子的混合物,即通常所说的气溶胶,所以当信标光在大气信道中传输时会被大气信道调制,即大气信道二次调制<sup>[1,2]</sup>。因为光端机之间的光轴对准是实现大气光通信的前提条件,所以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,常用的光轴传感器主要有位置敏感探测器(PSD)、四象限探测器(4QD)和 CCD 传感器等<sup>[4]</sup>,其中 CCD 和 4QD 传感器被广泛应用于无线激光通信中<sup>[5]</sup>。CCD 是一种典型的积分器件,对曝光时间内的光能进行积分,虽然 CCD 像素尺寸可以达

收稿日期: 2013-02-26; 收到修改稿日期: 2013-03-11; 网络出版日期: 2013-05-28

基金项目: 吉林省科技发展计划创新人才培养计划(20121302)资助课题。

作者简介: 母一宁(1985—),男,博士研究生,主要从事弱信号检测技术方面的研究。E-mail: der0403030420@163.com

导师简介: 李平(1958—),女,硕士,教授,主要从事电视跟踪技术方面的研究。E-mail: 231909849@qq.com(通信联系人)

到微米级,但 CCD 面积与采样频率这两个指标在制造原理上相互制约,当使用 CCD 做视场光阑时,在保障视场大小的同时其帧频无法做得太高。而 4QD 探测器则是一种标准的微分器件,其相应带宽通常会被后面的处理电路所限制,响应频率很容易达到几十至几百千赫兹,所以在需要应用振镜这种高带宽控制器件时,4QD 便成为了一种优选方案。因为信标光会受到大气信道二次调制,所以其艾里斑的畸变必然存在。为了补偿大气环境对 4QD 的影响,本文对大气信道环境下的 4QD 光轴检测模型进行了详细的论述,最终通过提高四象限固有分辨率的方法克服大气环境的干扰,并且通过验证性实验证明了该方法的可行性。

## 2 光轴检测模型

### 2.1 4QD 探测模型

经过准直以后的信标光可以认为是准平行光,信标光经过大气信道以后会被一个望远光学系统会聚,并以艾里斑的形式聚焦在像平面上。所谓光轴检测便是艾里斑的位置检测,光轴的检测精度便是艾里斑的位置定位精度。但是大气是一种典型的时变非因果系统<sup>[5]</sup>,其成分、温度、湿度和密度等在小空间和短时间内都是随机变化的,进而使大气信道的折射率也随机变化。理想的艾里斑可以用一阶贝塞尔函数描述其分布信息,但是由于大气随机干扰的存在,其艾里斑存在必然畸变。图 1 展示了受大气干扰的艾里斑。

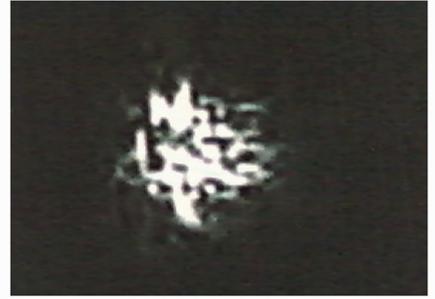


图 1 激光散斑

Fig. 1 Laser speckle

由图 1 可见,信标光经过大气信道以后其波前会发生随机畸变,以至于艾里斑发射破碎。所以在确定破碎艾里斑位置时用一阶贝塞尔函数来模拟破碎艾里斑特性是不合理的。在实际工程应用中通常采用光斑的质心记作艾里斑的中心。

四象限探测器就是将四个性能参数几乎完全一样的四个光敏二极管排布在探测器感光像面,并将其均分为面积相等的四个象限,从而把经由光学系统成像所得到的激光光斑按照相应的四个象限进行分割,其示意图如图 2 所示,实际工作效果如图 3 所示。

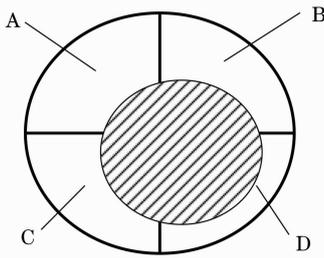


图 2 四象限探测器示意图

Fig. 2 Schematic of four-quadrant detector

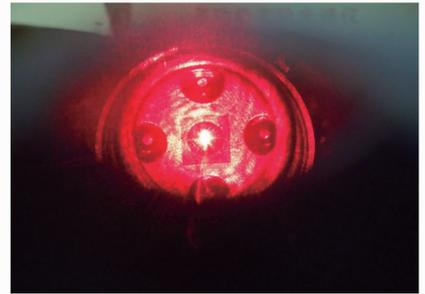


图 3 检测效果图

Fig. 3 Detection effects

设  $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$ 、 $I_d$  分别表示 4 个象限上的输出电流; $E_a$ 、 $E_b$ 、 $E_c$ 、 $E_d$  分别表示入射到 4 个象限上的光功率; $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$ 、 $S_d$  表示 4 个象限中 4 个光敏面的感光面积。 $S_x$  表示艾里斑面积, $S_{abcd}$  表示四象限探测器总面积, $d_x$  表示四象限中间的隔离沟道宽度,其中艾里斑的直径一般都小于四象限探测器的直径,所以整个光轴检测系统的视场光阑是艾里斑,整个光学系统的视场光阑是四象限探测器,并且艾里斑的直径  $d$  与光学系统的焦距  $f$  直接确定了整个光轴检测系统的固有检测精度,即四象限光轴检测固有精度  $\Delta$  为

$$\Delta = d/2f. \quad (1)$$

一旦艾里斑进入视场,4 个象限分别产生正比于其表面光强的光电流  $I_n$ :

$$I_n = \iint_S i(x, y) dx dy. \quad (2)$$

同时,不同象限之间所产生的光电流正比于分布于其表面的光功率。所以其整体的细分质心表达式为

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

$$\sigma_y = \frac{(I_a + I_b) - (I_c + I_d)}{I_a + I_d + I_b + I_c}. \quad (4)$$

四象限探测器最终的光轴偏移量为  $\Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$ , 可见四象限的光轴检测精度是由两部分组成的,一部分是其自身的光学分辨精度,另一部分则是电子细分精度。文献[6~8]指出应将光斑直径控制在略小于四象限探测器尺寸的一半,显然是致力于采用高细分精度来弥补固有光学分布,比如文献[8]所提到的细分精度高达 32 倍。但是随着通信距离的增加,信道环境变差时其细分精度变逐渐降低。文献[7]指出,随着大气信道环境质量的逐渐下降,其细分精度开始逐渐降低。

可见,仅仅通过提高细分精度的方式来获得稳定的光轴检测精度是不可靠的,为了实现在大气随机环境下光轴的高精度稳定检测,提升四象限探测模型的固有分辨率是必要的。

## 2.2 4QD 与 CCD 固有分辨率对比分析

在整个光轴检测系统中像面的光电器件直接影响整个系统的固有分辨率,其中最小的光电成像单元作为系统的渐晕光阑直接决定光轴检测系统的固有分辨率。

对于 4QD 光轴检测系统来说,其光敏面尺寸无法做得太小,一般都在毫米量级,所以可以通过光学系统将艾里斑压缩至远小于光敏面尺寸,即以艾里斑作为整个系统的渐晕光阑。然而对于 CCD 来说,相当于在原有的视场范围进行空间采样,如果对(3)式和(4)式进行空间采样后其脱靶量输出公式就变成了 CCD 质心公式。CCD 的像素尺寸一般可以达到微米量级,一般的望远系统无法将艾里斑压缩到这一量级。对于 CCD 检测系统来说其像素尺寸才是整个系统的渐晕光阑进而决定整个系统的固有分辨率。理想情况下,整个检测系统的精度由两部分组成,第一部分是整个系统的固有分辨精度  $\Delta$ ,第二部分是系统的检测细分精度  $\sigma$ ,其理想情况下的光轴检测精度  $\theta$  最终表达式为

$$\theta = \Delta\sigma. \quad (5)$$

但是 4QD 细分精度  $\sigma$  只与大气环境相关,不受其他条件约束。所以 4QD 系统的分辨率  $\theta_{4QD}$  为

$$\theta_{4QD} = \Delta\sigma = d_{QD}\sigma/2f, \quad (6)$$

式中  $d_{QD}$  表示 4QD 的像素尺寸。对于 CCD 检测系统来说,通常采用多像素细分手段实现光轴检测,所以由最简单的质心计算公式可知,该系统的拟合精度和 CCD 的像素尺寸直接相关,进而导致整个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 像素尺寸  $d_{CCD}$  这一条件所约束,所以 CCD 检测系统的可控性较强。CCD 系统的分辨率  $\theta_{CCD}$  为

$$\theta_{CCD} = \frac{d_{QD}d_{CCD}}{2f(d_{QD} + 2d_{CCD})}. \quad (7)$$

综上所述,CCD 光轴检测系统的固有分辨率与 4QD 光轴检测系统相比更加可控,4QD 光轴检测系统如果需要高分辨率,必须通过细分手段达成,因为大气信道二次调制的缘故,在大气环境下 CCD 光轴检测的表现优于 4QD。为了缓解这一现象,可以通过压缩艾里斑尺寸提升检测系统的固有分辨能力来降低检测系统对大气环境的敏感程度,即降低光强闪烁的影响。

## 3 误差分析与补偿

整个检测系统的误差主要包括大气湍流误差、背景光学误差和电子干扰误差等。

大气湍流对激光传播的干扰与激光直径和湍流漩涡尺度之比直接相关。当激光直径与湍流尺寸的比值远小于 1 时会发生光束漂移;当激光直径和湍流漩涡的尺度相当时,湍流漩涡使激光波前发生随机偏折,使到达角随机起伏;当激光直径比湍流漩涡的尺度大得多时会造成光束强度在时间和空间上随机起伏,即所谓的光强闪烁。可见从接收功率角度讲,光束漂移、到达角起伏和光强闪烁均会引入噪声功率信号,对于距离在几千米以内的噪声功率可以认为近似服从对数正态分布,其概率分布函数为

$$f_l(I) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_l} \exp\left[\frac{\ln(I/I_0) + 2\sigma_l^2}{-8\sigma_l^2}\right], \quad (8)$$

式中  $\sigma_i$  为光强闪烁指数,  $I_0$  为光强的时间平均值,  $I$  为接收光强。为了降低湍流对信标光的影响,文献[9,10]指出采用大口径光学接收系统可以有效地平滑湍流,即降低  $\sigma_i$  (信标光的发散角一般在几百微弧度至十几毫弧度量级,在很短的发射距离内信标光便可以获得较大的波束宽度,所以无需再在发射端采用多口径发射)。

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,实验表明在雾天大气散射现象尤其严重,其背景光功率是正常情况下的 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(SNR)直接影响整个四象限光轴检测的细分精度。因为四象限 4 个像面的尺寸、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 个像面所引入的背景光功率趋于一致,即背景光引入电流记作  $I_X$ 。因而背景光干扰细分表达式为

$$\sigma'_x = \frac{(I_a + I_X + I_d + I_X) - (I_b + I_X + I_c + I_X)}{I_a + I_d + I_b + I_c + 4I_X}, \quad (9)$$

$$\sigma'_y = \frac{(I_a + I_X + I_b + I_X) - (I_c + I_X + I_d + I_X)}{I_a + I_d + I_b + I_c + 4I_X}. \quad (10)$$

可见其背景光引入的误差可以由(3)式减(9)式,(4)式减(10)式获得,误差表达式为

$$\Delta\sigma_x = \frac{4I_X(I_a + I_d - I_b - I_c)}{(I_a + I_d + I_b + I_c)(I_a + I_d - I_b - I_c + 4I_X)}, \quad (11)$$

$$\Delta\sigma_y = \frac{4I_X(I_a + I_b - I_d - I_c)}{(I_a + I_d + I_b + I_c)(I_a + I_b - I_d - I_c + 4I_X)}. \quad (12)$$

由(11),(12)式可见,背景光引入的干扰噪声主要与信噪比和光轴入射角度有关,即信噪比越大干扰越小,光轴脱靶量越小干扰越小。

当入射平行光的发散角与光学接收系统的衍射极限相近时,其光斑尺寸应按照衍射极限来确定,即

$$d = \frac{2.44\lambda}{D}f, \quad (13)$$

$$d = \alpha f. \quad (14)$$

当入射平行光的发散角远大于光学系统衍射极限角时,则应按照几何光学方法来确定光斑尺寸,设定入射平行光发散角  $\alpha = 800 \mu\text{rad}$ , 波长  $\lambda = 658 \text{ nm}$ , 光学系统焦距  $f = 150 \text{ mm}$ , 接收口径  $D = 80 \text{ mm}$ , 即接收衍射极限角约为  $10 \mu\text{rad}$ 。可见其衍射极限远远小于入射平行光发散角,所以其理想的艾里斑尺寸  $d \approx 120 \mu\text{m}$ 。设定四象限探测器直径为  $2 \text{ mm}$ , 则光轴检测固有分辨率为  $400 \mu\text{rad}$ 。

在上述光电检测的基础上,图 4 给出了背景光对检测系统的影响以及不同偏差角度时的检测误差,其中固有分辨率以对  $\alpha$  归一化的方式给出。由于信道的干扰,艾里斑的形状是随机的,为了简化,本文仿真模型近似为圆形,并且忽略四象限中心十字沟道的影响。将(11),(12)式变换成

$$\Delta\sigma = \frac{P_s P_X}{P_s^2 + P_s P_N}, \quad (15)$$

式中  $P_s$  为四象限接收到的信标功率,  $P_N$  为四象限接收到的背景光功率,  $P_X$  为一个轴向的接收功率差。

如果将艾里斑简化为一个等光强的圆,则可以用  $P_s$  来表示  $P_X$ 。其误差的最终表达式为

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

式中  $r$  为光斑半径,  $\Delta x$  为光轴偏移量。将(16)式进一步做简化,可得

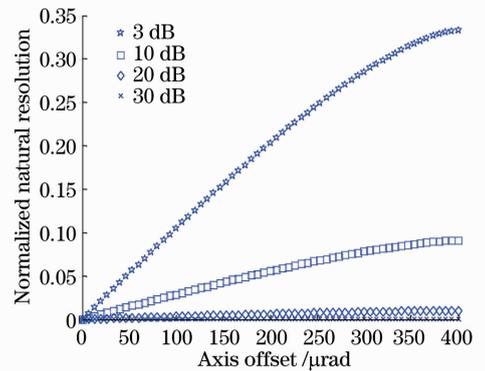


图 4 不同信噪比情况下光轴偏移量引起误差变化趋势  
Fig. 4 Natural resolution versus axis offset error under different SNRs

$$\Delta\sigma = \frac{1}{(P_S/P_N) + 1} \frac{\pi r^2 - 2\{2\pi r^2 \arccos[(r - \Delta x)/r]\}/360 - \sin\{2\arccos[(r - \Delta x)/r]\}r^2/2}{\pi r^2}. \quad (17)$$

从(9)式到(17)式的理论推导与前文的理论完全一致,其误差与信标光信噪比和光轴偏差量直接相关。这也从理论层面解释了文献[8]中所提到的“光斑中心实际位置与公式计算所得到的偏移量之间存在非线性关系”的结论。

## 4 结 论

通过理论推导和模型仿真最终得到了以下结论:

1) 四象限光轴检测模型不仅与探测器和光学系统有关,而且还与入射激光发散角直接相关,当需要采用四象限探测器实现远距离高精度光轴检测时,通过降低入射发散角、压缩艾里斑尺寸以及提升系统的固有分辨率是必要的,并且如此设计可以很好地降低光强闪烁引入的误差。

2) (9)~(17)式从理论层面给出了背景光对四象限光轴检测模型的影响,并且从理论上指出“光斑实际与计算偏移量之间非线性”只与信噪比和光轴偏移量有关。

## 参 考 文 献

- Mu Yining, Liu Quan, Yu Lintao *et al.*. Application of Hartmann technique in sequence spot detection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(9): 2197~2204  
母一宁, 刘 泉, 于林韬 等. 哈特曼技术在序列光斑检测中的应用[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(9): 2197~2204
- Mu yining, Wen Guanyu, Wang He. Study of technique of spot detection based on sequence information fit circle center[J]. *J. Air Force Engineering University*, 2011, **12**(1): 57~62  
母一宁, 温冠宇, 王 贺. 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
- Jiang Huilin, Tong Shoufeng. The System and Technology of the Free Space Laser Communications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011  
姜会林, 佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011
- Liu Yunqing, Jiang Huilin, Tong Shoufeng. Study on stabilizational tracking technology for atmospheric laser communication system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505005  
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): 0505005
- Shen Baoliang, Sun Jianfeng, Zhou Yu *et al.*. Influence of time-varying atmospheric turbulence to facular orientation deviation in dynamic process[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805004  
沈宝良, 孙建锋, 周 煜 等. 时变湍流对动态移动光斑定位精度的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(8): 0805004
- 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
- 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
- Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin. Study four-quadrant detector in the free space laser communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2030~2034  
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
- Cheng Chunyi, Yang Huamin, Jiang Huilin *et al.*. Performance receiving and selection of aperture size in atmospheric optical communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2957~2961  
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
- Cheng Chunyi, Yang Huamin, Jiang Huilin *et al.*. Research progress of mitigation technologies of turbulence effects in atmospheric optical communication[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, **30**(6): 779~791  
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