

基于四象序列的最大熵原则的光轴对准方法

魏枫林, 母一宁, 尚瑞瑞, 刘 泉

(长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 四象限探测器目前被广泛应用于空间激光通信中的对准过程, 但由于大气湍流的不良影响, 激光穿越大气在接收系统成像的时候, 光斑产生形变以及破碎等不良影响, 这严重地限制了四象限器件的对准精度。由于四象限探测自身所能提供的光斑信息较为单一, 相较于 CCD 器件, 其处理自由度较小。在分析研究基于 CCD 的序列光斑检测方法的理论基础之上, 提出了一种基于四象限探测器的光轴对准方法。通过统计某一段时间内四象限器件所输出的脱靶量值的范围, 并根据其在不同象限的分布概率计算出相应象限的熵作为加权系数, 对原有计算公式进行加权计算, 利用象限探测器高帧频的优势弥补原本单一的信息, 从而完成对大气湍流影响的抑制作用, 并搭建实验平台, 最终验证该算法可以显著提高四象限器件的探测精度。

关键词: 四象限探测器; 最大熵原则; 大气湍流

中图分类号: V11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1902-05

Method for optical alignment based on principle of maximum entropy of four-quadrant detector sequence

Wei Fenglin, Mu Yining, Shang Ruirui, Liu Quan

(Electronic Information Engineering College, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Four-quadrant detectors is widely used in the align process in the space lase communications. However, its adverse effects, such as deformation and spot broken, caused by the atmospheric turbulence, appear while the laser beam go through the atmosphere, which severely limits the alignment accuracy of the four-quadrant devices. Since four-quadrant detectors provide less message then the CCD, it's difficult to suppress the influence generated from the atmosphere. In this paper, a optical axis alignment method was proposed based on the four-quadrant detector. The value of the output miss distance of the four-quadrant detector for a certain time was calculated, the original formula was weighted by using the entropy that computing the entropy from the distribution probability of each quadrants. By taking advantage of the high frame rate of the quadrant detector, insufficient information was made up for to suppress the effect of the atmospheric turbulence, an experimental platform was set up, and a certain effect was achieved.

Key words: four-quadrant detector; principle of maximum entropy; atmospheric turbulence

收稿日期: 2012-11-13; 修订日期: 2012-12-15

基金项目: 吉林省科技发展科技创新人才培养计划(20121302)

作者简介: 魏枫林(1987-), 男, 硕士生, 主要从事光电检测方面的研究。Email: 492982227@qq.com

导师简介: 宋路(1945-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测及激光通信方面的研究。Email: usong@126.com

0 引言

自由空间激光通信近年来受到了广泛的重视,使用光波作为载波,相较于微波通信其波长更短,这使得激光通信在使用同等天线尺寸时可以达到更小的衍射极限角,因此相较于微波通信激光通信拥有较高的通讯速率、更好的保密性以及更强的抗干扰能力。但是,具有上述优点的同时也有着诸如受到大气影响较严重、需要更精密、更复杂的 APT 系统等劣势。近年的研究中,主要使用 CCD 器件以及象限探测器完成光轴的对准工作。利用 CCD 器件配合相应的图像处理算法可以实现精确对准^[1],但 CCD 同时也受到体积、响应频段等限制,而且由于 CCD 本身的工作方式,很难将其帧频提高。四象限探测器以其较高的灵敏度、位置分辨率以及较宽的频谱响应使其成为光轴对准的重要选择对象之一^[2-3],然而四象限器件在使用过程中会受到大气湍流的影响,该影响使得探测器象面处的光斑产生几何形状的畸变。当接收端的信噪比较低时,激光光斑会出现破碎现象(激光散斑)。在无线激光通信系统中,大气湍流的干扰会导致天线象面上所获得激光光斑出现随机抖动,光强随机起伏等,这是由于同一光源发出的光线在通过不同的光路之后发生了随机干涉^[4]。信标光在大气中传输时所受到的影响,可以等效为信标光受到大气信道调制,虽然目前为止还没有提出较准确的大气信道模型,但是已经证实这种调制会引入新的频率分量,使 Airy 斑的形状破碎并造成到达角随机起伏^[5]。然而象限探测器由于提供的光斑信息单一,无法在一帧信号内完成对噪声的抑制,虽然参考文献[5-6]给出了基于 CCD 的序列光斑检测方法,但由于 CCD 器件本身的带宽限制,其控制带宽无法做地太高,为了解决这一问题,文中给出了一种基于四象限探测器的解决方法,进而实现强湍流下的高带宽、高精度的序列光斑检测与光轴对准。

1 大气信道光轴对准模型分析

四象限探测器(见图 1)的基本原理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象面,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。

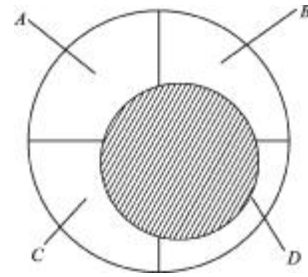


图 1 四象限探测器

Fig.1 Four-quadrant detector

而相应的光学系统则被设计成将光斑直径压制为略小于四象限探测器尺寸的一半^[6],一旦光斑进入视场,四个象限分别产生正比于其表面光强的光电流:

$$I_n = \iint_S i(x, y) dx dy \quad (1)$$

同时,不同象限之间所产生的光电流由于正比于分布于其表面的光斑面积(光斑近似均匀分布),因此可以通过对光电流的计算得出光斑的中心位置。

传统的四象限应用中通过质心算法来计算光斑中心的位置,具体公式如下:

$$E_x = \frac{I_A + I_D - I_B - I_C}{I_A + I_B + I_C + I_D} \quad E_y = \frac{I_A + I_B - I_C - I_D}{I_A + I_B + I_C + I_D} \quad (2)$$

这种算法精度高、速度快因而被广泛应用于四象限的信号处理中^[2-3,7]。但是当激光经过大气传输而会受到大气湍流的影响时,会产生强度上的闪烁以及光斑本身的破损等不良反应。

如图 2 所示,所接收到的光斑发成了几何形状的畸变,并产生由于光斑能量的随机分布而造成的激光散斑。由于从四象限探测器的单一帧所提供的

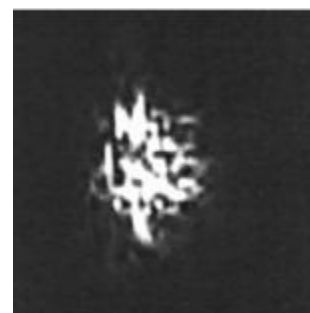


图 2 大气湍流下的激光光斑

Fig.2 Laser spot under atmospheric turbulence

信息中无法提取光斑的灰度、梯度等信息而使得传统的质心算法无法抑制大气湍流的影响。所以通过该算法计算出的光斑中心相较于其真实位置发生了位置上的偏移,此时的脱靶量将不再具有可靠性,当已有实验证明水平距离为 12.5 km 时,四象限探测器已经失去光斑检测功能^[2]。

激光光斑的强度分布符合高斯分布:

$$i(\mathbf{r})=i_0 e^{-2r^2/w^2}=\frac{2P}{\pi W^2} e^{-2r^2/w^2} \quad (3)$$

而由大气湍流影响所引入的噪声是随机分布的,因此受大气湍流影响所产生的光强分布可以近似表示为: $i'(\mathbf{r})=i(\mathbf{r})+n_{\text{pos}}(\mathbf{r})$ 。可进一步推知光斑中心的随机偏移也服从高斯分布,并集中于光板的中心区域:

$$E_{x'}=E_x+\Delta e_x \quad E_{y'}=E_y+\Delta e_y \quad (4)$$

式中: Δe_x 、 Δe_y 分别为水平和垂直方向上的位置偏移量,其表现为两个随机分布的噪声,在静态无线激光通信中表现为高频噪声^[8-9]。由于四象限器件所提供的空间信息单一,无法像 CCD 器件一样使用相对复杂的算法(如型心算法、Zernike 模式复原法等),导致四象限器件对大气干扰敏感。四象限器件有着 CCD 所无法比拟的高帧频特性,CCD 器件由于使用逐行扫描的方式进行输出,并受到光积分时间、读出脉冲频率等限制,帧频很难提高^[2],相对的四象限的帧频取决于 A/D 变换速度,通常条件下可以将帧频取到几千甚至几十千赫兹。因此,可以将四象限原有有限的空间信息量在时间上展开成为四象序列以增加四象限器件所提供的光斑位置信息,利用统计物理学中最大熵的思想完成对光轴的对准工作。

2 基于最大熵原理的四象限对准方法

熵所表征的是用来度量信息量的一个概念,对于一个 N 元新源来说其计算公式如下:

$$H(\mathbf{t})=-\sum_{i=0}^n P_i(\mathbf{t}) \cdot \log_2 P_i(\mathbf{t}) \quad (5)$$

当 N 个状态出现概率均等时,取得最大信源熵 $H(\mathbf{t})_{\text{max}}=\log_2 N$ 。如前文分析得到由于受到大气湍流的影响,由公式(2)所计算出的脱靶量的随机扰动,从而降低探测器的探测精度。为此利用四象限器件的高帧频特性,统计过去某 N 帧数据中质心在相面的分布概率,根据相应的信息熵对原有公式进行加权,从

而减小大气湍流的影响。

首先采集四象限过去 N 帧数据所输出的脱靶亮数据 $\dot{\mathbf{i}}=[i(1), i(2), \dots, i(n)]$, $i(n)=[i_A(n), i_B(n), i_C(n), i_D(n)]^T$,其中每个元素($n=1, 2, \dots, N$),并将每一帧带入公式(2),根据所计算的脱靶量数据的符号统计光斑在探测器四个平面的分布概率情况: $\dot{\mathbf{p}}(\mathbf{T})=[P_A(\mathbf{T}), P_B(\mathbf{T}), P_C(\mathbf{T}), P_D(\mathbf{T})]^T$,并分别计算出对应的信息熵:

$$\dot{\mathbf{M}}(\mathbf{T})=[M_A(\mathbf{T}), M_B(\mathbf{T}), M_C(\mathbf{T}), M_D(\mathbf{T})]=[-\log(P_A(\mathbf{T})), -\log(P_B(\mathbf{T})), -\log(P_C(\mathbf{T})), -\log(P_D(\mathbf{T}))]^T \quad (6)$$

利用计算得出的熵作为作为加权值对第 N+1 帧数据进行加权计算,进而对原有公式进行加权计算得到相应的计算公式:

$$E_{x'}=\frac{[I_A(n+1), I_B(n+1), -I_C(n+1), -I_D(n+1)] \cdot \dot{\mathbf{M}}(\mathbf{T})}{[I_A(n+1), I_B(n+1), I_C(n+1), I_D(n+1)] \cdot \dot{\mathbf{M}}(\mathbf{T})}$$

$$E_{y'}=\frac{[I_A(n+1), -I_B(n+1), I_C(n+1), -I_D(n+1)] \cdot \dot{\mathbf{M}}(\mathbf{T})}{[I_A(n+1), I_B(n+1), I_C(n+1), I_D(n+1)] \cdot \dot{\mathbf{M}}(\mathbf{T})} \quad (7)$$

当光斑质心等概率分布于探测器的四个象限时,有:

$$M_A(n)=M_B(n)=M_C(n)=M_D(n) \quad (8)$$

此时四象限序列所输出的信息熵最大,而脱靶亮计算公式可以简化为公式(2),因此,可以认为公式(2)为公式的一个特殊情况,即此时光斑质心实际位于四象限探测器的中心位置,计算出的脱靶亮应为零。

由于算法中对四象序列进行统计得到相对应的概率分布,需要对某 n 帧信息进行处理,通过统计光斑质心随机分布的情况对脱靶亮进行加权计算,因此累加序列长度越大所得到的光斑位置的分布情况就越精准,所计算出来的脱靶量就越接近准确值。然而四象限器件帧频(即对拖把量的采样频率)的选择决定系统的性能,采样频率直接决定系统的控制带宽,进而对系统的跟踪误差以及暂态响应产生影响,因此采样频率按照以下公式取得:

$$\frac{1}{2f_s} \geq \frac{1}{\omega_p} \frac{M}{M+1} - \sum_{i=0}^n T_i \quad (9)$$

式中: ω_p 为系统的穿越频率;M为系统的震荡指标,当转台的伺服频率为 f_v 的时候,系统的控制频率至少要为转动频率的 10 倍,即 $f_s \geq 10f_v$ 时才能精准地完成对转台的控制。因此序列长度不宜太大,否则将会影响转台的控制精度。

3 实验与分析

实验用平台搭建如图所示,使用焦距为 150 mm 定焦光学镜头系统作为接收天线,四象限探测器直径为 2 mm;沟道间隔为 100 μm ;发射端采用 5 mW 808 nm 波长的半导体激光器作为光源,此时对应的光电效率为 3.5;利用湍流池模拟大气湍流所带来的影响,四象限器件经由 8 bit 模数变换后,利用计算机进行相应的脱靶亮计算并完成对二维转台的控制,具体实验平台搭建如图 3 所示。

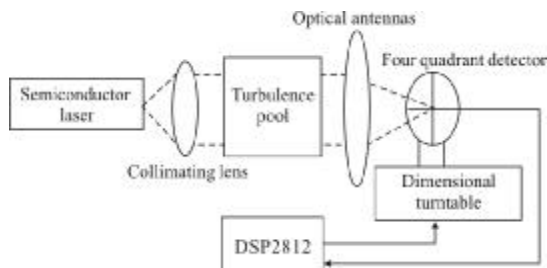


图 3 实验用平台

Fig.3 Experimental platform

利用精密二维转台调整四象限探测器的角度,并通过计算机读取探测器所输出的数据。试验中序列长度选为 15,即根据过去 15 帧的脱靶亮信息完成对信息熵的计算。图 4 所示湍流影响下四象限探测器所输出脱靶量,可以看出由于光斑的抖动,其输出脱靶量扰动较大,经过计算其脱靶量扰动均方根误差为 $\sigma \approx 0.13$,根据经典误差理论分析其细分精度约为 $n=8$ 细分,此时其角度分辨率为 $\theta=d/f=1.6$ mrad 其中 f 为接收天线焦距, $d=1/n$, l 为探测器光敏面直径, n 为相应的细分精度。

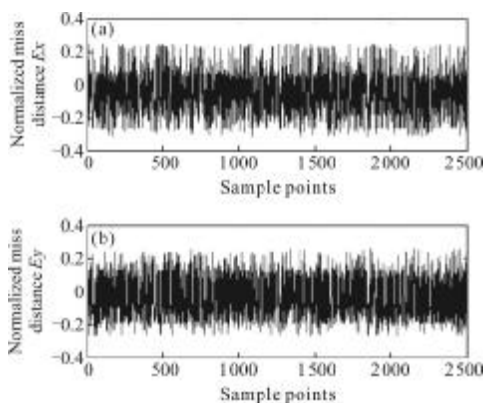


图 4 四象限探测器原始数据

Fig.4 Four-quadrant detector raw data

图 5 所示是根据四象序列最大熵算法所得出的脱靶量,其脱靶量扰动均方根值为 $\sigma \approx 0.074$,其细分精度约为 12 细分,可以明显看出脱靶亮的扰动范围减小,而相应的角度分辨率为 0.5 mrad;即基于四象序列的脱靶量加权算法可以用明显降低大气湍流对四象限器件的影响,提高系统的测量精度。

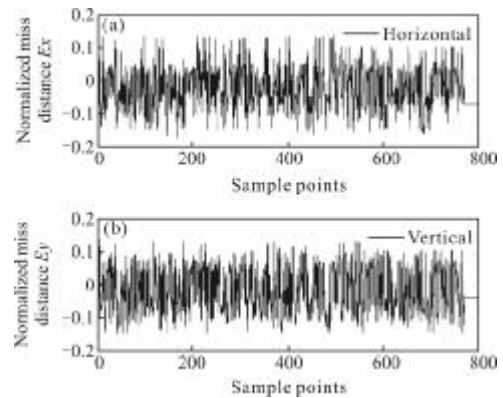


图 5 加权算法下的脱靶量数据

Fig.5 Miss distance data under the weighting algorithm

4 结论

文中在参考文献[2-3]的理论基础上提出了一种基于四象限探测器的工程应用方案,并且取得了 8 细分的测量精度,相比于原文中在 CCD 器件上的应用,利用四象限探测器的高帧频优势来弥补其对大气湍流的敏感,并根据最大熵原理给出了脱靶亮的计算公式。搭建了实验平台进行验证,虽然该算法降低了四象限器件的帧频,却取得了较好的对准精度,有效地抑制了大气湍流对四象限探测器的不良影响。因为实验条件有限,文中试验平台的搭建还存在诸多不足,如采样精度不够高,采样速率偏低等。为此,可以通过提高采样精度和速率的方法增加序列长度,使系统达到更高的精度。

参考文献:

- [1] Liu Danping, Hu Yu. Laser speckle image denoising with high accuracy centroid[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32: 56-58. (in Chinese)
刘丹平, 胡渝. 高光斑图像质心精度的去噪方法 [J]. 光电工程, 2005, 32: 56-58.
- [2] 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-

1761. (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): 1756-1761.
- [3] 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.
- [4] Yuan Xiuhua, Zhao Ming, Zhao Yanli. Analysis and resolution for wireless optical communication in turbulent atmosphere[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 415-421. (in Chinese)
元秀华, 赵茗, 赵彦立. 湍流大气对无线光通信影响分析及解决方案[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 415-421.
- [5] Mu Yining, Liu Quan, Yu Lintao, et al. Application of Hartmann technique in sequence spot detection [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(9): 2197-2203. (in Chinese)
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): 2197-2203.
- [6] 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 (Natural Science Edition), 2011, 12(1): 59-62. (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.
- [7] Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin. Study four-quadrant detector in the free space laser communication [J]. Chinese Journal of Laser, 2009, 36(8): 2130-2134. (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): 2130-2134.
- [8] Wang Lili, Ke Xizheng, Chen Lixin. The testing system for optical power through atmosphere [J]. Chinese Journal of Light Scattering, 2006, 17(4): 378-381. (in Chinese)
王丽黎, 柯熙政, 陈丽新. 基于大气激光通信系统的实验测量研究[J]. 光散射学报, 2006, 17(4): 378-381.
- [9] Chen Jing, Xue Haizhong, Liu Xuewen, et al. Experiment of low-power laser jamming free space optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1266-1270. (in Chinese)
陈静, 薛海中, 刘学文, 等. 自由空间光通信低功率激光干扰实验[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1266-1270.