

doi:10.3788/gzxb20174604.0406002

光斑缺碎情形下光学天线光轴对准实验研究

柯熙政,李世艳

(西安理工大学 自动化与信息工程学院,西安 710048)

摘 要:针对同时存在方位偏移及俯仰误差的情况,提出了一种适用于捕获、对准与跟踪系统的光斑检测方法.分析了破碎光斑与高斯完整光斑的位置误差;解决了当光束存在漂移、入射光束与天线视轴不平行同时存在而四象限探测器无法分别探测的问题.最后实验验证了本文方法的有效性,提高了检测的准确度.

关键词:激光通信;捕获、对准、跟踪系统;阈值算法;光轴对准;光斑检测

中图分类号:TN929.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)04-0406002-9

Experimental Study on Optical Axis Alignment of the Optical Antenna under the Spot Broken

KE Xi-zheng, LI Shi-yan

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A spot detection method was proposed for acquisition, pointing and tracking system in the case of azimuth offset and pitch errors exist at the same time. The position error between the broken spot and the Gaussian complete spot was analyzed. The problem was solved when the beam was drifted and the incident beam was not parallel to the line of sight of the antenna and the four-quadrant detector could not be detected separately. In the end, conduct experiments to verify the validity of approaches. The improvement of detection precision is also presented.

Key words: Laser communication; Acquisition, pointing and tracking systems; Threshold algorithm; Optical axis alignment; Detection spot

OCIS Codes: 060.2605; 200.2605; 230.0040; 140.3430

0 引言

在无线激光通信中,人们通过光电探测器对输入光斑的位置信息、能量大小等进行探测.光斑检测是捕获、对准与跟踪(Acquisition, Pointing and Tracking, APT)系统用于建立和确保通信链路可靠连接的关键,对自由空间光通信(Free Space Optical Communication, FSO)系统至关重要^[1-3].在 APT 系统中,通常使用四象限探测器(Quadrant Detector, QD)、电荷耦合器件^[4](Charge-Coupled Device, CCD)、位置敏感探测器(Position Sensitive Detector, PSD)作为探测传感器进行光斑中心位置检测.对于四象限探测器,可以直接检测两种误差信号:光束漂移位置检测误差以及入射光束与天线夹角的检测误差.近年来人们将四象限探测器应用于检测光斑中心位移量,2009 年,林志琦等^[5]提出了一种通过增量的计算方法实现光斑的精确定位;同年,陈勇等^[6]将插值法融入传统的测角算法之中,将测角误差控制在 0.1° 之内;2010 年,赵馨等^[7]利用四象限探测器检测光斑中心位置,研究了入射光斑的各种特性和外部环境对四象限探测器输出产生的影

基金项目:国家自然科学基金(No. 61377080)、江苏省省级前瞻性研究专项资金(第三批)项目(No. BE2013088)和国家科技创新计划(No. 13C26213201867)资助

第一作者:柯熙政(1962—),男,教授,博导,主要研究方向为自由空间光通信. Email: xzke@263.net

通讯作者:李世艳(1991—),女,硕士研究生,主要研究方向为无线激光通信中光斑对准系统. Email: lishiyen18@163.com

收稿日期:2016-10-28; **录用日期:**2017-02-09

<http://www.photon.ac.cn>

响并进行了验证;2011年,张雷等^[8]研究了光斑大小、光斑位置、电路板热噪声、探测器背景噪声等对四象限探测准确度的影响;2012年,刘云清等^[9]研究了大气湍流噪声以及大气散射引起的光斑噪声对四象限探测器检测准确度的影响;2013年,蒲磊等^[10]基于反插值法,实现了速度更快、准确度更高的测角算法;2013年,高紫俊等^[11]提出了一种基于数据库查询的高准确度光斑中心定位算法,使光斑中心位置的计算准确度提高了100个数量级.相关文献仅仅对单一的测角算法或横向偏移算法进行研究,或者进行改进,对噪声的研究分析,也都是基于完整圆形光斑,并未结合大气激光通信中APT系统的实际问题进行研究,不能在横向偏移光斑缺失情况下精确检测偏移光斑的位置及姿态角的情况.

本文设计的光斑自适应精检测方案结合了寻优算法,同时使用电机辅助调节,解决了当光斑漂移与光束不平行于天线视轴同时存在而无法探测的问题.搭建实验平台实现了捕获、对准与跟踪系统的精检测单元.并利用阈值算法提高检测准确度,实现光斑对准系统.

1 工作原理

1.1 光斑破碎及其检测

当信号传输距离较远时,影响光束接收的主要因素是光束的横向漂移;而当传输距离较近时,光电探测器探测到的误差数据是光束漂移误差及入射光线与接收视场视轴夹角误差的叠加^[12].

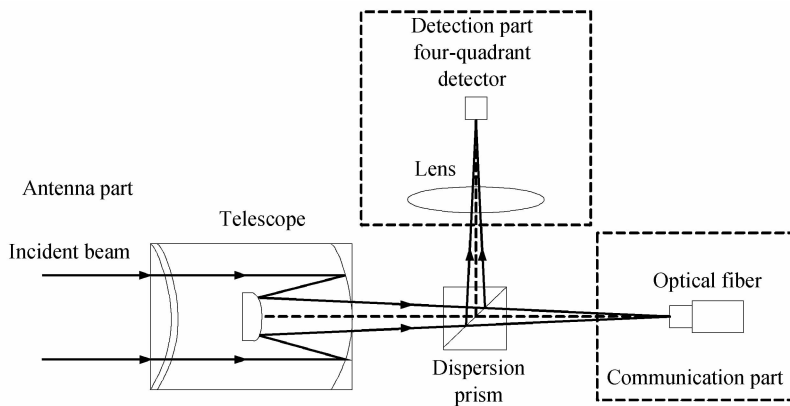
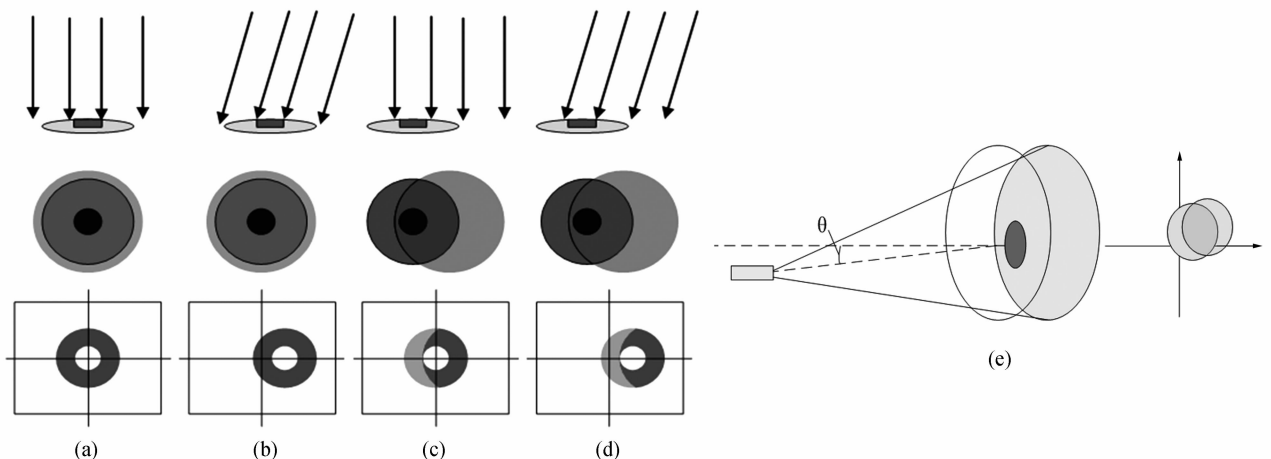


图1 光束检测结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of beam detection

沿入射光轴切向观察,入射光线与接收视场视轴夹角的关系及望远系统接收面处光斑与接收面的位置关系如图2所示.图2(a)为光束平行于视轴且无光斑漂移,判定为光束对准;(b)为光束无光斑漂移,但光束



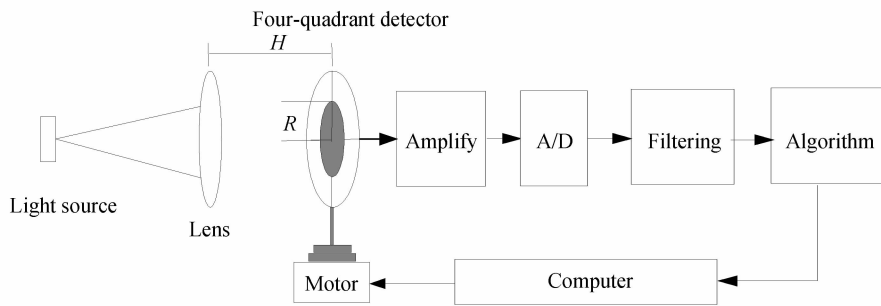
(a) Alignment (b) Angle deviation of the incident beam (c) Spot drift (d) At the same time exists spot drift and angle deviation of the incident beam (e) Form the missing spot

图2 光束位置检测
Fig.2 Beam position detection

传输方向与天线光轴存在夹角,探测器上的光斑偏离坐标中心;(c)为光束平行于视轴但存在光斑漂移,探测器接收的光斑不完整;(d)为既存在光斑漂移,又存在光束与天线视轴的角度偏差,此时探测器上光斑缺失且偏离坐标中心.如图2(e)中,在实际情况下,光束并不是理想的平行光束,加上入射光束漂移,使得检测到的光斑不完整且偏离探测器坐标中心位置,形成缺失光斑.传统的捕获、对准与跟踪系统精检测单元无法对光束横向漂移与角度量误差分别进行检测,所以需要寻求新的方法来检测光束状态量,对光束偏移量与姿态角进行检测.

1.2 系统结构

如图3所示,APT系统结构由光源、聚焦镜头、四象限探测器、放大电路、A/D转换、信号滤波、信号处理单元、计算机及辅助调节机构步进电机组成.系统光源为650 nm激光光源,使用焦距为3.5~8 mm镜头汇聚光束,起到调节光斑半径大小的作用.在接收端,四象限探测器输出十分微弱,所以要加入前置放大电路,放大后的电信号经过A/D转换变成数字信号,经过卡尔曼滤波后,在信号处理单元进行自适应阈值检测计算(见本文1.4),所得结果送入计算机控制系统驱动步进电机控制光斑至无偏移状态,在无偏移状态计算角度误差信号,最终实现光轴对准.



The light source: Wavelength of 650nm laser; Amplifying circuit: Two-stage amplification circuit with AD623 amplifier; Filtering: Kalman filtering; Motor: Two-dimensional stepper motor

图3 对准系统结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of alignment system

1.3 四象限探测器俯仰角测量算法

四象限探测器可以检测到光斑的位置.如图4所示,对于完整光斑,其角度量表示为^[6]

$$\theta = K_1 \cdot \arctan \frac{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{H} \quad (1)$$

$$\varphi = K_2 \cdot \arctan \frac{x_0}{y_0} \quad (2)$$

式中 θ 为入射光的俯仰角(入射光束方向与垂直方向的夹角); φ 为入射光的方位角(入射光束方向投影与水平面上法定方向的夹角); H 为接收面到探测器光敏面距离; K_1 、 K_2 为比例系数; (x_0, y_0) 为光斑中心点坐标,即

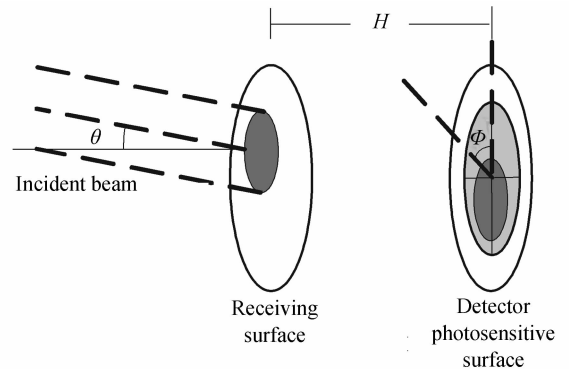


图4 入射光束俯仰角及方位角
Fig. 4 Pitch and azimuth angle of incident beam

$$\begin{cases} x_0 = k \cdot \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \\ y_0 = k \cdot \frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \end{cases} \quad (3)$$

式中 k 为转换因子; I_A 、 I_B 、 I_C 、 I_D 为A、B、C、D四个象限输出电流流量.

1.4 自适应阈值检测算法

本系统设计的自适应阈值算法首先将系统光斑完整时的探测器接收量设定为初始阈值,启动全局最优值搜索算法,通过中间信号调节控制机构,持续搜索最优化参量,当参量大于阈值时,即鉴定光斑完整,不存在横向漂移.具体步骤为:

- 1) 为全局选择初始估计阈值 T ;
- 2) 用 T 分割动态数据, 大于 T 鉴定为完整光斑, 小于 T 继续判定;
- 3) 若数据小于阈值 T , 发送正向调节指令. 若到下一状态的接收量增大, 持续发送正向调节; 若接收量减少, 发送反向调节指令;
- 4) 重复判定, 直至接收总和大于阈值 T , 则光斑完整, 输出角度误差量;
- 5) 计算在 M 个完整光斑时探测器输出总和的平均值, 更新初始估计阈值 T .

精检测系统中的四象限探测器拥有微弧度级的跟踪准确度, 源于利用了探测器在小范围内具有线性性质, 而此线性性质是基于光斑完整的情况下. 当光斑产生横向偏移, 入射到望远镜的光斑受到遮挡, 光斑缺失, 使用四象限探测器定位算法会产生较大误差. 当既有横向漂移又存在接收天线角度偏差的时候, 使得位置探测器不止具有较大误差, 甚至会使探测器失去检测能力.

2 破碎光斑检测误差分析

在近场实验中, 四象限探测器检测噪声主要为驱动电路的热噪声、背景噪声、光斑噪声、非线性噪声等; 远场试验中, 影响四象限探测器的噪声源主要为大气湍流噪声以及大气散射引起的光斑噪声. 除了这些噪声以外, 实际环境中还存在因光斑缺失而导致检测结果偏差. 光斑缺失不仅影响检测系统的准确度, 也会减少耦合进光纤中的光能量, 降低接收信号的信噪比, 影响通信系统误码率. 如图 5 所示, 缺失光斑的检测偏移量与实际偏移量具有直观的偏差. 本文将缺失光斑建模为椭圆光斑, 推导了椭圆光斑中心位置公式, 并分析了光斑缺失情况下对光斑检测的影响.

若不存在横向漂移, 则聚焦光束是圆对称的, 位置信息可以由四个光电二极管输出量与光电二极管输出量总和之间的强度差来估计. 理想高斯光斑能量密度分布为^[1]

$$P = P_0 \frac{2}{\pi R^2} \exp(-2((x^2 + y^2)/R^2)) \quad (4)$$

式中 P_0 是入射平均功率; R 为圆形光斑半径, 定义为功率密度降为 $1/e^2$ 时距离光斑中心点的长度. 假定入射光斑中心偏移量为 (x_0, y_0) , 入射到第 i ($i=A, B, C, D$) 象限的光斑面积为 S_i , 则每个象限接收到的能量为

$$P_i = k \iint_{S_i} P(x, y) ds = k \iint_{S_i} P_0 \frac{2}{\pi R^2} \exp\left(-2\left(\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{R^2}\right)\right) ds \quad (5)$$

每个象限的输出量是正比于投射在该象限光敏面光斑的面积积分. k 为转换因子. 使用加减算法计算求出光斑位置与功率变化关系为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{R}{\sqrt{2}} \operatorname{erf}^{-1}\left(\frac{P_0}{\Delta x}\right) \\ y_0 = \frac{R}{\sqrt{2}} \operatorname{erf}^{-1}\left(\frac{P_0}{\Delta y}\right) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\Delta x, \Delta y$ 分别为 x, y 轴方向上的偏移量, 由此可得高斯圆形光斑模型下入射光的俯仰角及方位角为

$$\theta = \arctan \frac{\sqrt{\frac{R^2}{2} \left(\left(\operatorname{erf}^{-1}\left(\frac{P_0}{\Delta x}\right) \right)^2 + \left(\operatorname{erf}^{-1}\left(\frac{P_0}{\Delta y}\right) \right)^2 \right)}}{H} \quad (7)$$

$$\varphi = \arctan \frac{\operatorname{erf}^{-1}\left(\frac{P_0}{\Delta x}\right)}{\operatorname{erf}^{-1}\left(\frac{P_0}{\Delta y}\right)} \quad (8)$$

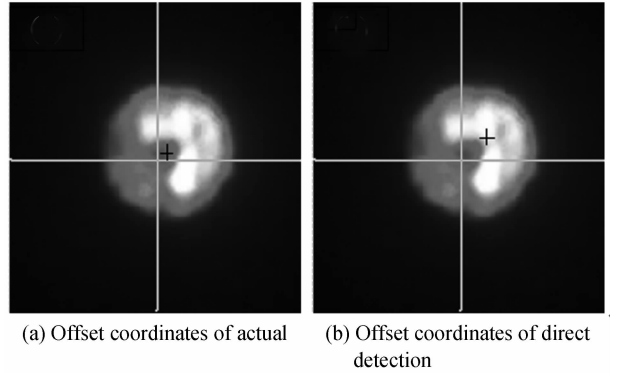


图 5 缺失光斑检测图

Fig. 5 The experimental figure of missing spot

在无线激光通信系统中,在存在漂移的环境中并不能得到圆形光斑.不失一般性,我们将缺失光斑定义为理想的椭圆光斑.而使用圆形光斑模型计算会影响 APT 检测系统的检测准确度.高斯椭圆光斑能量密度分布为^[7]

$$P_T = P_0 \frac{2}{\pi w_a w_b} \exp \left(-2 \left(\frac{x^2}{w_a^2} + \frac{y^2}{w_b^2} \right) \right) \quad (9)$$

式中 w_a 、 w_b 分别为椭圆光斑长短轴.假定入射光斑中心偏移量为 (x_0, y_0) ,则每个象限接收到的能量为

$$P_{Ti} = k \iint_{S_i} P_T(x, y) ds = k \iint_{S_i} P_0 \frac{2}{\pi w_a w_b} \exp \left(-2 \left((x - x_0)^2 / w_a^2 + (y - y_0)^2 / w_b^2 \right) \right) ds \quad (10)$$

由此得到

$$P_{TA} + P_{TD} = \frac{2P_0}{\pi w_a w_b} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left(\frac{-2(y - y_0)^2}{w_b^2} \right) dy \int_0^{\infty} \exp \left(\frac{-2(x - x_0)^2}{w_a^2} \right) dx = \frac{P_0}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2} x_0}{w_a} \right) \right) \quad (11)$$

$$P_{TB} + P_{TC} = \frac{2P_0}{\pi w_a w_b} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left(\frac{-2(y - y_0)^2}{w_b^2} \right) dy \int_{-\infty}^0 \exp \left(\frac{-2(x - x_0)^2}{w_a^2} \right) dx = \frac{P_0}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2} x_0}{w_a} \right) \right) \quad (12)$$

得出偏移量 Δx 、 Δy 为

$$\begin{cases} \Delta x_T = P_0 \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2} x_0}{w_a} \right) \\ \Delta y_T = P_0 \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2} y_0}{w_b} \right) \end{cases} \quad (13)$$

最后得出椭圆光斑模型下,光斑位置与探测器输出信号关系为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{w_a}{\sqrt{2}} \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{P_0}{\Delta x_T} \right) \\ y_0 = \frac{w_b}{\sqrt{2}} \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{P_0}{\Delta y_T} \right) \end{cases} \quad (14)$$

对缺失光斑模型的光斑位置与探测器输出信号关系进行仿真,图 6 为不同光斑模型下 x 、 y 轴偏移量分别随 x 、 y 轴偏移检测值的变化曲线.接收平均光功率取 30 mW,椭圆光斑长轴 w_a 取 0.9 mm,短轴 w_b 取 1.2 mm,圆形光斑半径取 1.5 mm.可以发现光斑缺失模型下偏移量的线性范围减小了,光斑变化越大,线性区间越小.从文献[13]的研究中得出,当入射到四象限探测器上的光斑半径为探测器光敏面半径的一半时, x 、 y 轴偏移量具有最大的线性范围.而缺失光斑会使得入射到探测器上的光斑长短轴减小,也必然会使其线性区域减小.线性区域减小会影响探测器的可检测范围.

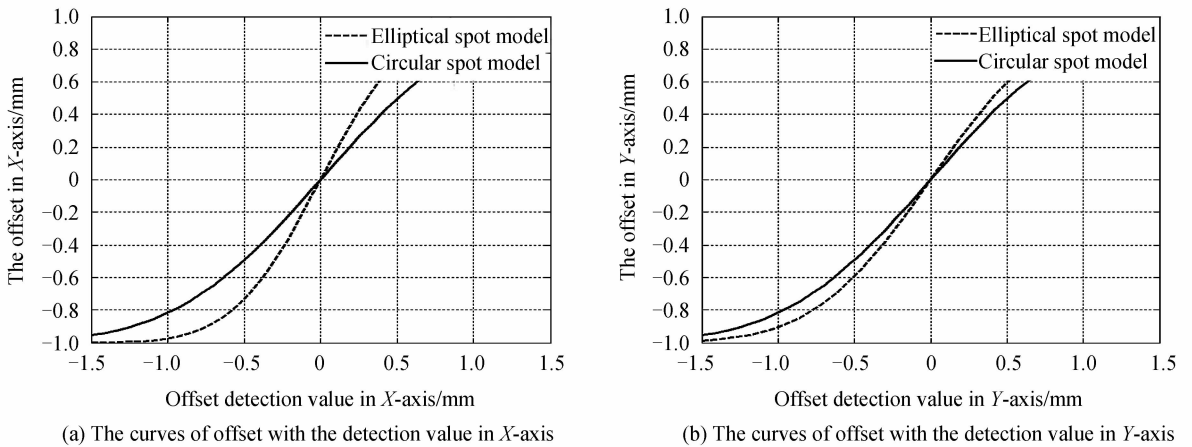


图 6 不同光斑模型下 x 、 y 轴偏移量 ($w_a/w_b=0.75$)

Fig. 6 x -axis and y -axis offset in different spot model ($w_a/w_b=0.75$)

图 7 为不同光斑模型下俯仰角分布的仿真图.圆形光斑半径取 1.5 mm,入射平均功率 P_0 为 30 mW,比例系数为 1,接收面到探测器光敏面距离 H 为 0.08 m.图 7(a)为圆形光斑模型下俯仰角分布;(b)、(c)、(d)为椭圆光斑模型下俯仰角分布.其中(b)图中,椭圆光斑长轴 w_a 取 0.9 mm,短轴 w_b 取 1.2 mm,其分布图与

圆形光斑俯仰角分布图相比,具有微小变化,通过计算得到与圆形光斑俯仰角之间最大差值为 0.26。图 7(c)中,椭圆光斑长轴 w_a 取 0.6 mm,短轴 w_b 取 1.2 mm,与圆形光斑俯仰角之间最大差值为 0.45。图 7(d)图中,椭圆光斑长轴 w_a 取 0.3 mm,短轴 w_b 取 1.2 mm,其分布图与圆形光斑俯仰角分布图相比,产生明显差异,与圆形光斑俯仰角之间最大差值达到约 0.62。将图(a)与图(b)(c)(d)进行对比分析可得,俯仰角误差范围变化不大,但当光斑缺失越大,误差值越大。

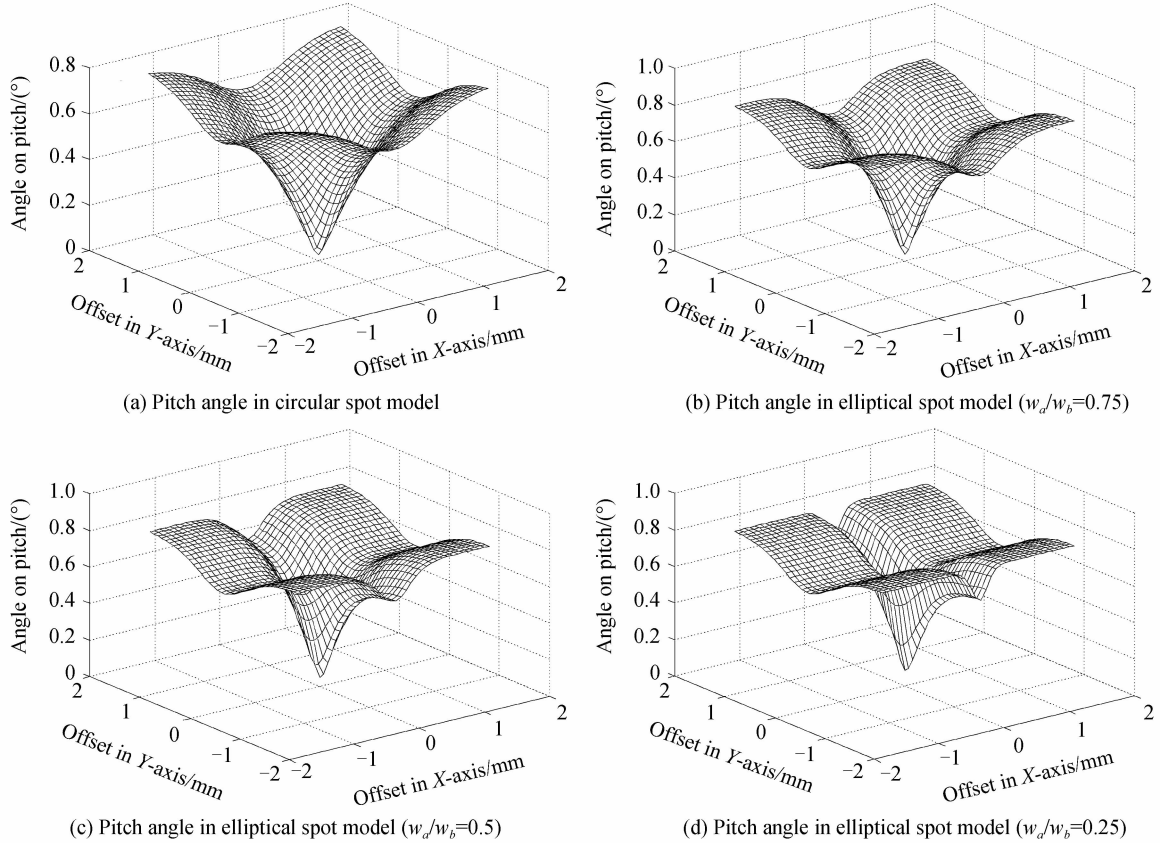
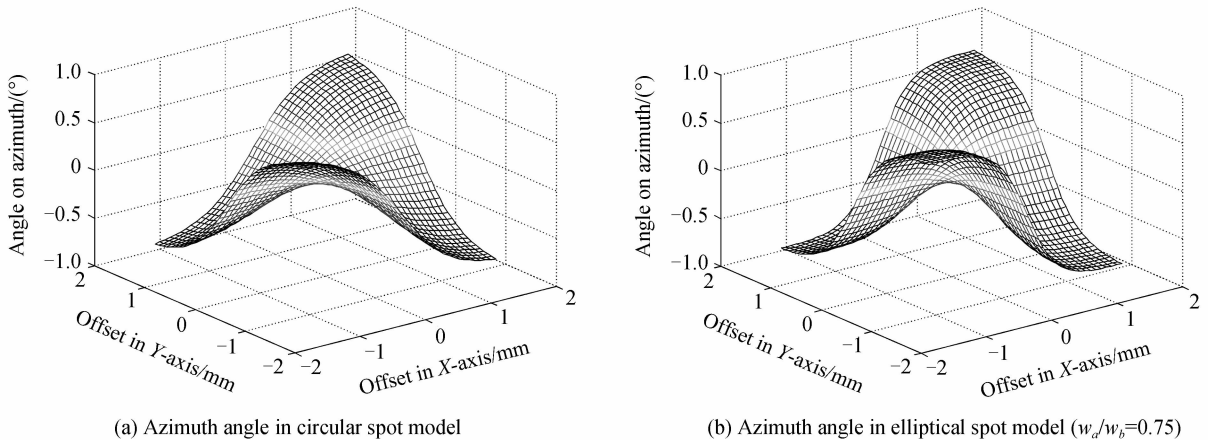
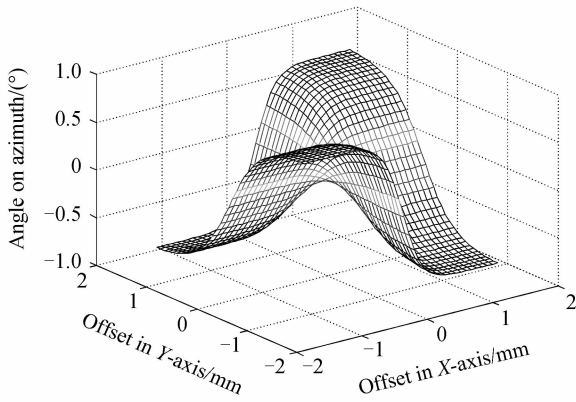


图 7 不同光斑模型下俯仰角分布

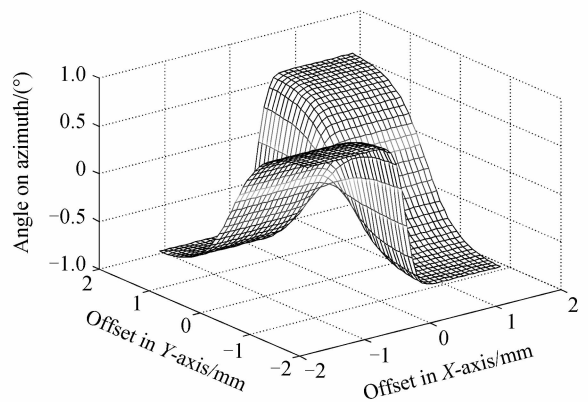
Fig. 7 Pitch angle distribution in different spot models

图 8 为不同光斑模型下方位角分布的仿真图。圆形光斑半径取 1.5 mm,入射平均功率 P_0 为 30 mW,比例系数取 1,接收面到探测器光敏面距离 H 为 0.08 m。图 8(a)为圆形光斑模型下方位角分布;(b)、(c)、(d)为椭圆光斑模型下方位角分布。其中(b)图中,椭圆光斑长轴 w_a 取 0.9 mm,短轴 w_b 取 1.2 mm;(c)图中,椭圆光斑长轴 w_a 取 0.6 mm,短轴 w_b 取 1.2 mm;(d)图中,椭圆光斑长轴 w_a 取 0.3 mm,短轴 w_b 取 1.2 mm。通过计算得到椭圆光斑模型下方位角与圆形光斑方位角之间最大差值约为 1.48。将图 8(a)与图 8(b)、(c)、(d)进行对比分析可得,当光斑缺失越大时,方位角误差范围越大。





(c) Azimuth angle in elliptical spot model ($w_a/w_b=0.5$)

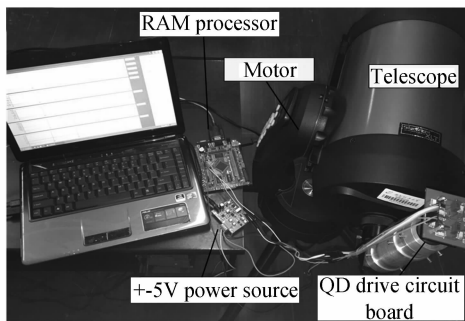


(d) Azimuth angle in elliptical spot model ($w_a/w_b=0.25$)

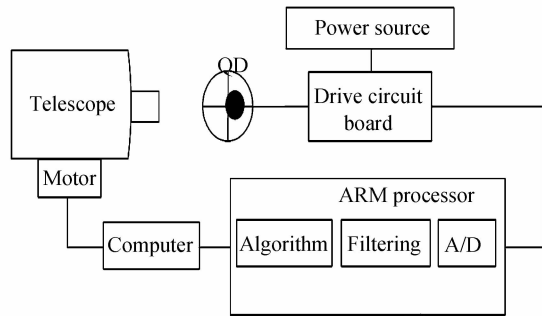
图8 不同光斑模型下方位角分布
Fig. 8 Azimuth angle distribution in different spot models

3 实验研究

实验选用 650 nm 激光器,功率为 30 mW;四象限探测器为中电 44 所生产的 GT112,光敏面直径 6 mm,光谱响应范围 400 到 1 100 nm,象元间距 150 μm ,响应时间 8 ns,暗电流 12 nA,响应度为 0.45,搭建实验平台,如图 9.



(a) Experiment scene



(b) Experimental scene corresponding block diagram

图9 接收端实验环境图
Fig. 9 Experimental environment

图 10 为将光斑由缺失状态调节至完整光斑状态探测器输出结果,图 11 得到理论与实际偏移量的结果偏差.可以看出,缺失光斑下,探测器偏移量计算值偏离真实值较大,在坐标原点位置附近出现求得的误差信号与真实偏移值方向相反的情况.

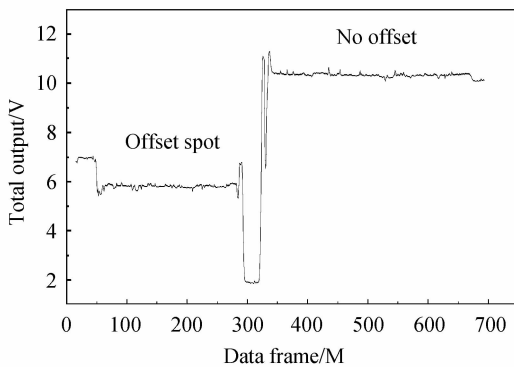


图 10 四象限探测器输出总和实验数据图(放大后)
Fig. 10 Experimental data of output sum of four-quadrant detector(after amplification)

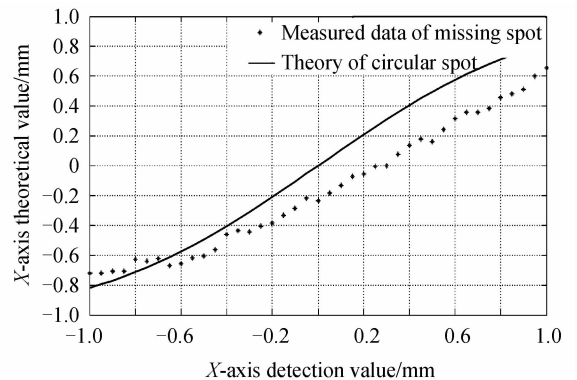


图 11 缺失光斑 X 轴偏移实测数据图(标定后)
Fig. 11 Measured data of missing spot on X-axis (after calibration)

本文设计的阈值检测算法需要确定的参量有完整光斑初始估计阈值 T 、接收面到探测器光敏面距离

H 、转换效率 K 、光敏面接收的光斑半径 R 、接收端接收到的平均光功率 P_0 。实验中先对 1 000 帧完整光斑取统计平均,计算得初始估计阈值 T 取 1.682 8;转换效率 K 计算得 100;光斑半径 R 取探测器光敏面半径的一半,为 1.5 mm。对缺失光斑位移量进行分辨率测试,测试光斑长轴 w_a 为 0.6 mm,短轴 w_b 为 1.2 mm,光斑右侧缺失。对电机在 x 轴方向分别旋转 0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm 的位移量,调节后光斑仍然缺失。输出结果如表 1。每一次调节电机,四象限探测器接收量总和均有明显增量,光斑未达到完整光斑阈值,判定为缺失光斑。在 0.1 mm、0.3 mm 位移下偏差为 0.028 0 mm、0.047 4 mm,在 0.2 mm 位移下偏差达到了 0.133 6 mm。

表 1 缺失光斑位移量测试
Table 1 Displacement test of missing spot

Displacement /mm	Increment					Measured value/mm	Deviation /mm
	ΔA	ΔB	ΔC	ΔD	Δ_{sum}		
0.1	0.023 8	0.025 7	0.023 3	0.021 1	0.093 9	0.128 0	0.028 0
0.2	0.106 7	0.144 4	0.094 8	0.064 2	0.410 1	0.066 4	0.133 6
0.3	0.268 7	0.228 2	0.141 7	0.189 3	0.827 9	0.252 6	0.047 4

对完整光斑角度量准确度进行检测,实验中分别驱动电机在俯仰及方位方向旋转 1、5、10 个步长,对应弧度为 43.633 2 μrad 、218.166 2 μrad 、436.332 3 μrad 。输出结果如表 2,结果显示,实验中方位角抖动略大于俯仰角抖动,方位角误差大于俯仰角误差,其偏差源于调节机构与硬件系统的共同影响。图 12 表示了光斑完整后俯仰角及方位角变化曲线图。

表 2 角度量准确度测试
Table 2 Accuracy test of angle

Rotation angle/ μrad	Measured value of pitch angle/ μrad	Deviation of pitch angle/ μrad	Measured value of azimuth angle/ μrad	Deviation of azimuth angle/ μrad
43.633 2	40.163 3	3.470 0	37.413 4	6.219 8
218.166 2	221.497 1	3.330 9	228.830 1	10.663 9
436.332 3	432.054 8	4.277 5	444.001 3	7.669 0

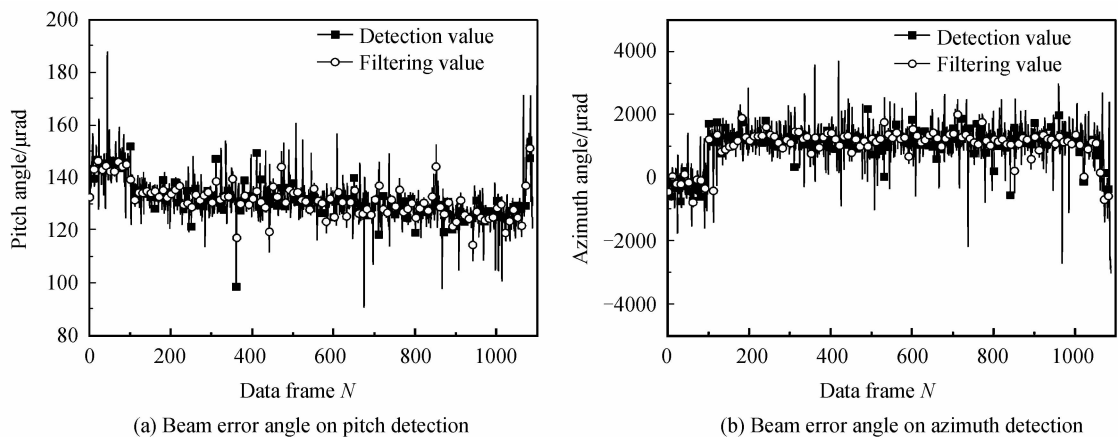


图 12 光束偏角检测
Fig. 12 Beam error angle detection

4 结论

本文通过对入射光斑缺失状态进行理论分析及实验研究,得出了当入射光斑受到遮挡、光斑缺失时四象限探测器检测的信号误差较大,甚至可能出现检测方向与实际方向相反的情况。使用本文中自适应阈值检测方法可实现判别光斑缺失状态,且对缺失光斑进行调节,可提高检测准确度,减小检测误差。此研究为大气激光通信 ATP 系统的对准与跟踪提供可靠的检测数据。

参考文献

- [1] ROBERTO E C, ALFONSO M E. Configurable quadrant photodetector: an improved position sensitive device[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(1): 109-119.

- [2] HO T H. Pointing, acquisition, and tracking systems for free-space optical communication links[J]. *Dissertations & Theses - Gradworks*, 2007, **136**(2): 187-193.
- [3] 柯熙政, 席晓莉. 无线激光通信概论[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2004. 84-130.
- [4] ZHU Chun-li, LI Jing. Analysis of stiffness measurement precision of optical trap with Boltzmann statistics method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(8): 1834-1839.
朱春丽, 李静. 采用玻尔兹曼统计法分析光阱刚度的测量准确度[J]. *光学精密工程*, 2016, **24**(8): 1834-1839.
- [5] LING Zhi-qi, LI Hui-jie, LANG Yong-hui. Obtaining spot parameters by quadrant photodetectors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(4): 764-770.
林志琦, 李会杰, 郎永辉. 用四象限光电探测器获得光斑参量[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(4):764-770.
- [6] CHENG Yong, ZHU Tian-rui, LI Huan-gong. Analysis and improvement in angle measurement algorithm of the four-quadrant detector[J]. *Laser and Nfrared*, 2009, **39**(6): 669-672.
陈勇, 祝天瑞, 李焕功. 四象限探测器测角算法分析与改进[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(6):669-672.
- [7] ZHAO Xin, TONG Shou-feng, JIANG Hui-lin. 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.
- [8] ZHANG Lei, ZHANG Gou-yu, LIU Yun-qing. Affecting factor for detection accuracy of four-quadrant detector[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(6): 121-125.
张雷, 张国玉, 刘云清. 影响四象限探测器探测准确度的因素[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6):121-125.
- [9] LIU Yun-qing, JIANG Hui-lin, TONG Shou-feng. Stabilizational tracking technology for atmospheric laser communication system[J]. *Acta Photnica Sinica*, 2011, **40**(7): 972-977.
刘云清, 姜会林, 佟首峰. 大气激光通信中稳定跟踪技术研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7):972-977.
- [10] PU Lei, LIU En-hai, ZHONG Jian-yong. The angle-measurement algorithm of the four-quadrant detector based on the interpolation of the charater analysis of curve[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, **13**(31): 9272-9275.
蒲磊, 刘恩海, 钟建勇. 基于曲线特征分析的插值法的四象限测角算法[J]. *科学技术与工程*, 2013, **13**(31):9272-9275.
- [11] GAO Zi-jun, DONG Li-li, MENG Li-yan. Study for high-precision positioning algorithm of four-quadrant detector [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2013(12): 2314-2321.
高紫俊, 董丽丽, 孟丽艳. 四象限探测器高准确度定位算法研究[J]. *光电子·激光*, 2013(12):2314-2321.
- [12] KE Xi-zheng, LEI Si-chen, YANG Pei-song. Beam coaxial alignment detection in atmospheric laser communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016(6):175-184.
柯熙政, 雷思琛, 杨沛松. 大气激光通信光束同轴对准检测方法[J]. *中国激光*, 2016(6):175-184.
- [13] CHEN Wei, TENG Yan-hua, XIA Ling-yan, et al. Effect of spot properties on the measuring precision of four quadrant detector[J]. *Science Technogy and Engineering*, 2015, **15**(4): 239-242.
程韦, 滕艳华, 夏玲燕. 光斑性质对四象限探测器测量准确度的影响[J]. *科学技术与工程*, 2015, **15**(4):239-242.
- [14] LEI Si-chen, KE Xi-zheng, SHAO Jun-hu. Experimental study about fiber array coupling and auto-alignment[J]. *Laser Technology*, 2014, **38**(2): 191-195.
雷思琛, 柯熙政, 邵军虎. 空间光-光纤阵列耦合自动对准实验研究[J]. *激光技术*, 2014, **38**(2):191-195.
- [15] HU Xian-long, ZHOU Shi-chun. Analysis and research on several angle measurement algorithms based on four-quadrant detector[J]. *Laser and Infrared*, 2007, **37**(6): 546-547.
胡贤龙, 周世椿. 几种四象限探测器测角算法的分析研究[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(6):546-547.
- [16] SHANG Dao, LI Xi, LIU Zeng-ji. Novel four-quadrant design and the method for obtaining spot parameters[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(4): 1034-1040.
尚韬, 李曦, 刘增基. 新型四象限设计及其光斑参量测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2011, **41**(5):516-519.
- [17] CIU Rui-qing, WANG Jing-wen, LI Xiao-mei. Model error analysis of quadrant photoetector[J]. *Laser and Infrared*, 2011,**41**(5): 516-519.
崔瑞青, 王景文, 李晓梅. 四象限探测器解算模型误差分析[J]. *激光与红外*, 2011, **41**(5):516-519.
- [18] HUANG Lu, GUO Hong-lian, QU E. Method for displacement calibration of four-quadrant photodetector in optical tweezers system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 12-16.
黄璐, 郭红莲, 屈娥. 四象限探测器位移测量的标定方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10):12-16.

Foundation item: the National Natural Science Foundation of China (No. 61377080), the Special Foundation for Jiangsu Provincial Prospective Research Plan (the third) (No. BE2013088), the National Science and Technology Innovation Program (No. 13C26213201867)