

大气激光通信光束同轴对准检测方法

柯熙政 雷思琛* 杨沛松

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 利用大气湍流对光束的扩展、背投成像原理和卡塞格林望远系统,提出了一种适用于大气激光通信捕获、对准和跟踪系统的光束对准检测方法,并对其进行理论分析和实验验证。该方法利用光斑形状和光斑形心位置综合解算光束的横向偏移量和轴向偏转量,解决了一般方法无法分辨出光斑在接收焦平面的移动是由于光束横向偏移还是轴向偏转引起的问题,以及光束横向偏移量无法被精确检测的问题。实验结果表明,该方法可有效地对光束对准状态进行检测,最终实现分辨率为 $2.2 \mu\text{rad}$ 的角度偏转量和分辨率为 0.25 mm 的横向偏移的检测。

关键词 光通信; 大气激光通信; 捕获、对准和跟踪系统; 光斑检测

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0606003

Beam Coaxial Alignment Detection in Atmospheric Laser Communication

Ke Xizheng Lei Sichen Yang Peisong

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

Abstract A method of beam alignment detection is proposed for the acquisition, pointing and tracking system in atmospheric laser communication based on extension of beam propagating in atmospheric turbulence, back projection imaging principle and Cassegrain telescoping system. The method is analyzed theoretically and verified experimentally. Based on the shape and centroid of the beam spot, the transverse deviation and the axial deflection of the beams are calculated comprehensively. As a result, the problems with the general method are solved, one of which is that the beam spot fluctuation is caused by transverse displacement or axial displacement, and another is that the transverse displacement can not be calculated by the general method. The experimental results show that the method can detect effectively the beam alignment state, and realize finally resolution ratio with $2.2 \mu\text{rad}$ in axial deflection and 0.25 mm in transverse deviation.

Key words optical communications; atmospheric laser communication; acquisition, pointing and tracking system; beam spot detection

OCIS codes 060.2605; 200.2605; 100.0100; 040.1520; 010.1330

1 引 言

无线激光通信系统的信息传输载体是激光束,激光束的特点是光束窄、方向性强,易受大气湍流的干扰。大气湍流引起的光束扩展与漂移^[1-2]给通信链路的建立和维持带来了困难,因此,对光束的捕获、对准、跟踪(APT)就显得尤为重要。APT系统主要由光束位置检测系统与光束指向伺服系统构成^[3],其中,光束位置检测系统通常使用电荷耦合元件^[4](CCD)、四象限光电探测器^[5](QD)或者位置敏感器(PSD)作为检测传感器。

2002年在欧空局的半导体激光器卫星间通信传输实验(SILEX)方案中,采用CCD作为大视场捕获探测器,QD作为高频跟踪探测器,其系统跟瞄精度为 $2 \mu\text{rad}$ ^[6]。2003年美国喷气推进实验室(JPL)提出了CCD可变像元窗口输出设计方案,解决了探测器大视场和高帧频要求之间的矛盾^[7]。2006年张文涛^[8]采用

收稿日期: 2016-02-01; 收到修改稿日期: 2016-02-29

基金项目: 国家自然科学基金(61377080)、国家科技创新计划(13C26213201867)、江苏省前瞻性研究专项资金(BE2013088)

作者简介: 柯熙政(1962—),男,博士,教授,主要从事自由空间光通信方面的研究。E-mail: xzke@263.net

* 通信联系人。E-mail: lsc429@163.com

将两次采样数据进行叠加处理的方法,使检测分辨率提高到 0.25 pixel。2009 年 Lin 等^[9]采用“微动法”处理四象限光电探测器信号,该方法可以计算光斑半径,误差为 3.2%,同时克服了检测误差随光斑位置、光斑半径不同而产生较大变化的缺点。2011 年尚韬等^[10]提出了一种基于归一化函数的四象限光斑参数检测方法,该方法不需要对四象限探测器进行微动,检测耗时更短,并采用查表法简化了函数的运算复杂度。同年,刘云清等^[11]结合影响空间激光通信跟踪系统性能的 5 种大气湍流效应,分析了质心跟踪算法和形心跟踪算法对定位准确度的影响,得出了在系统跟踪效果上使用 CCD 传感器优于使用 QD 传感器和形心算法优于质心算法的结论^[11]。2013 年钱峰等^[12]对互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器的噪声与像元占空比有限等缺陷进行研究,通过优化光斑有效半径,将定位误差降至 0.0384 pixel。以上方法均是对探测器靶面上的光斑位置进行检测,再结合光学系统,对光束入射角进行计算,以此实现光束的角度对准,并未对大气激光通信系统结构与 APT 系统工作所面临的问题进行分析,无法实现光束的同轴对准。

针对以上问题,利用大气湍流对光束的扩展效应,采用 CCD 相机对背投屏幕上的光束成像进行检测,解决了传统方法无法分辨天线偏差角与光束漂移的难题,以及无法精确检测光束漂移位置的问题,并减弱了光学结构内部炫光对 CCD 相机光斑检测系统的影响,提高了检测精度,降低了后期信号处理的复杂度。

2 问题的提出

在一般光束对准检测方法中,本端检测到对端光束到达角为 α ,根据光路可逆,可知本端光束在对端到达角也为 α ,以此作为误差信号实现光束对准。光束在大气湍流中斜程传输时,上行传输光束与下行传输光束受大气湍流的影响不尽相同^[13],有可能出现如图 1 所示情况。当 B 端光束在 A 端到达角 $\alpha_A = 0$,A 端光束在 B 端到达角 $\alpha_B \neq 0$,且 A 端光束光轴在 B 端天线阵面上的 a 点与天线中心 O 的距离 $p \neq 0$ 时,使用光束到达角检测方法难以实现通信双端天线的精确对准。一般通过增加光束的束散角进行对准冗余,以此实现近似对准。

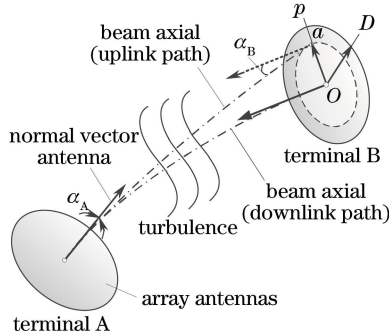


图 1 斜程传输时的光束对准

Fig. 1 Beam pointing when transmitting in the slant path

在 B 端观察上行传输光束,光束主轴与天线视轴的夹角为 α_B ;光束主轴与天线视轴的径向距离为 p 。 $\alpha_B = \alpha_1 + \alpha_2$,其中 α_1 为天线偏差角, α_2 为光束漂移角, $\alpha_2 = \arctan(p/L)$, L 为光束传播距离。当光束传播距离较远, $L \gg p$ 时, $\alpha_2 \rightarrow 0$,可认为 α_B 与 p 相互独立。

一般光束对准检测方法是通过检测光束在传感器靶面上的位置^[14],再结合光学结构参数计算光束到达角 α 。当 $\alpha = 0$ 时,即认为光束已经对准天线接收面。当出现如图 2 所示的情况,光束 1 与光束 2 到达角均为

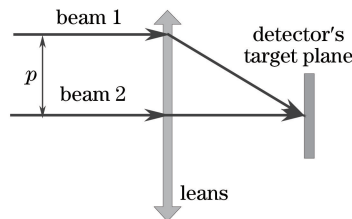


图 2 径向距离无法被检测的情况

Fig. 2 Situation of radial distances without being detected

0, 两者径向距离为 p , 但是光束 1 与光束 2 通过光学系统后照射到探测器靶面的位置是相同的, 这就无法对距离 p 进行检测。远场光斑能量为高斯分布, 光束光轴附近是能量集中区域, 忽略径向距离 p 会引起天线接收功率下降, 故认为光束的严格对准条件是 $\alpha = 0$ 且 $p = 0$, 即同轴对准。

3 光束对准检测新方案

3.1 检测系统结构设计

光束对准检测系统光路如图 3 所示, 光源发出的光束在大气中传播, 经过大气湍流到达光学接收天线, 在光学接收天线内部主光路焦点附近放置 1 块分光棱镜, 将射入的激光束一分为二, 其中一路光束为通信光束, 另一路光束为位置检测光束。位置检测光束首先照射在光学背投幕上, 由于背投幕对光束具有散射作用, 光束截面在背投幕上成像, 使用 CCD 相机对背投幕上的光斑成像进行检测。当背投幕处于望远系统焦平面时, 平行入射光束经过透镜系统聚焦成一点, 此时只能检测入射光束与天线系统视轴夹角 α , 无法检测光束漂移量 p , 因此对背投幕的安装位置进行离焦设计。

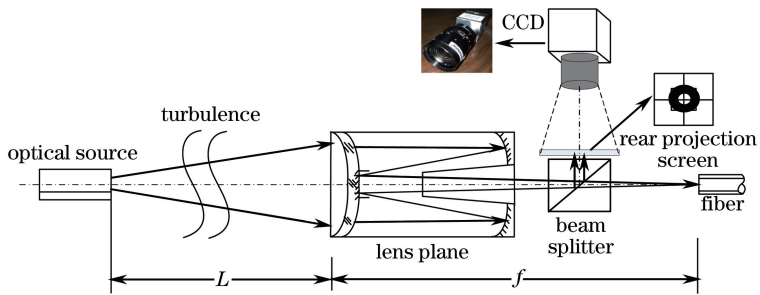


图 3 检测系统结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of detection system structure

3.2 光束对准检测原理

检测原理如图 4 所示, 将卡塞格林望远系统简化为光学接收面与副镜, 沿光学天线法矢量正向是入射光束, 沿光学天线法矢量负向为放大的背投幕。理论上, 背投幕上的光斑成像应为圆形, 但是由于受到卡塞格林结构中副镜的遮挡, 背投幕上光斑实际成像为环形光斑。图中虚线分别是天线接收面的法矢量与光束主光轴。图中 4 个子图分别表示在不同情况下背投幕上的光斑成像, 可分别表征光束与天线视轴偏差角与光束漂移量。

图 4(a) 为 $\alpha = 0$ 且 $p = 0$ 时的光斑成像, 此时光束主光轴与光学天线视轴严格对准, 背投幕上的成像为完整的圆环, 且处于屏幕中心位置。

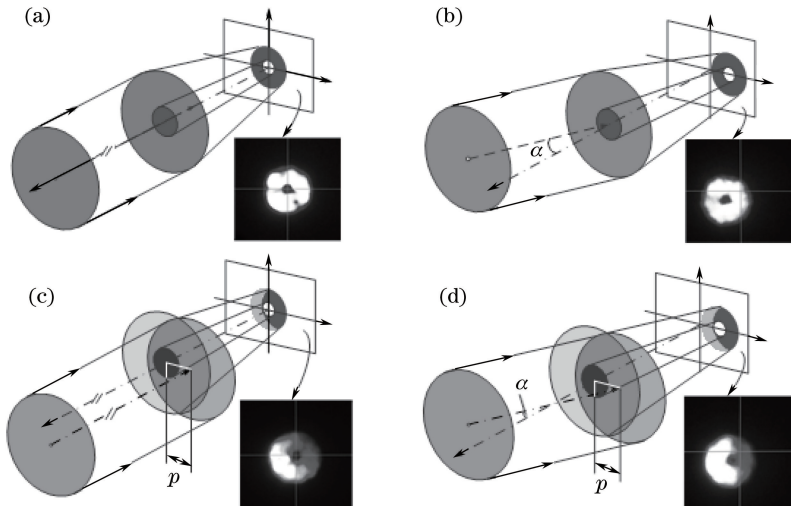


图 4 4 种不同情况的光束检测。(a) $\alpha = 0, p = 0$; (b) $\alpha \neq 0, p = 0$; (c) $\alpha = 0, p \neq 0$; (d) $\alpha \neq 0, p \neq 0$

Fig. 4 Four kinds of situations of light beam detection. (a) $\alpha = 0, p = 0$; (b) $\alpha \neq 0, p = 0$; (c) $\alpha = 0, p \neq 0$; (d) $\alpha \neq 0, p \neq 0$

图 4(b)为 $\alpha \neq 0$ 且 $p = 0$ 时的光斑成像,此时光束主光轴虽到达光学天线接收面中心,由于光轴与视轴存在角度偏差,背投幕上的成像虽为完整的圆环,但偏离屏幕中心位置。

图 4(c)为 $\alpha = 0$ 且 $p \neq 0$ 时的光斑成像,此时光束主光轴与光学天线视轴虽然平行,光束垂直射入天线,但是光束已经发生漂移,主光轴与天线视轴不重合,故背投幕上的成像为残缺的圆环,处于屏幕中心位置。

图 4(d)为 $\alpha \neq 0$ 且 $p \neq 0$ 时的光斑成像,此时光束既发生漂移,入射光束与天线视轴也存在角度偏差,背投幕上的成像为残缺的圆环,且偏离屏幕中心位置。

如图 5 所示, a 是完整圆环的形心, O 是背投屏幕中心, b 是圆环明亮部分的形心。根据图 5,入射光束与天线视轴夹角 α 的计算式为

$$\alpha = \frac{m}{f}, \quad (1)$$

式中 f 是光学天线的焦距; m 是 a 点到 O 点的距离,计算公式为

$$m = \sqrt{(x_a^2 - x_o^2) + (y_a^2 - y_o^2)}, \quad (2)$$

式中 (x_a, y_a) 是 a 点坐标, (x_o, y_o) 是 O 点坐标。

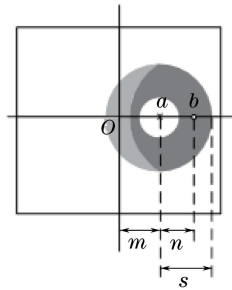


图 5 光斑位置计算示意图

Fig. 5 Calculation diagram of spot position

光束漂移位置量 p 的计算式为

$$p = \frac{\varphi \cdot n}{2s}, \quad (3)$$

式中 φ 是接收望远系统接收面直径; s 是背投幕上完整圆环的半径; n 是 a 点到 b 点的距离,计算公式为

$$n = \sqrt{(x_b^2 - x_a^2) + (y_b^2 - y_a^2)}, \quad (4)$$

式中 (x_b, y_b) 是 b 点坐标。

当光束传播距离较远, $L \gg p$ 时, $\alpha_1 = \alpha$; L 为光束的传播距离。

当光束传播距离较近时,

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha - \alpha_2 \\ \alpha_2 = \arctan(p/L) \end{cases} \quad (5)$$

4 光斑位置计算

根据(1)~(4)式计算光束漂移位置与光束角度偏差时,需先确定图像中圆环亮部的位置与完整圆环的位置,通过阈值分割可得到这两部分信息,并采用图像形心 a 点与 b 点坐标来表征这两部分的位置信息。

4.1 光束扩展与阈值分割

光束在大气湍流中传播,受到直径比其小的大气涡旋的影响而发生扩展。光束在自由空间中传播光束强度较集中,单位尺度内光束中心至边缘能量变化较大;而光束在大气湍流中传播时,光束扩展强,单位尺度内光束中心至边缘能量变化较平缓^[15]。通过相机检测,光束在背投幕上的成像如图 6 所示。图 6(a)是光束经过自由空间传播后形成的光斑图像,其边界较为清晰;图 6(b)是图 6(a)中光斑的灰度分布图,可以看出图中有两个峰,分别分布在最低灰度级与最高灰度级两个区域,对其做阈值分割,分割结果只能分辨出光斑圆

环明亮部分与黑背景,无法得到其完整的圆环图像;图 6(c)是光束经过大气湍流发生扩展后的光斑图像,从图中可辨别出光斑的完整圆环;图 6(d)是图 6(c)中光斑的灰度分布图,与图 6(b)相比,其在中间灰度级附近多出 1 个峰,一共有 3 个峰,对其做阈值分割后可分别得到光斑圆环图像与光斑亮部图像。

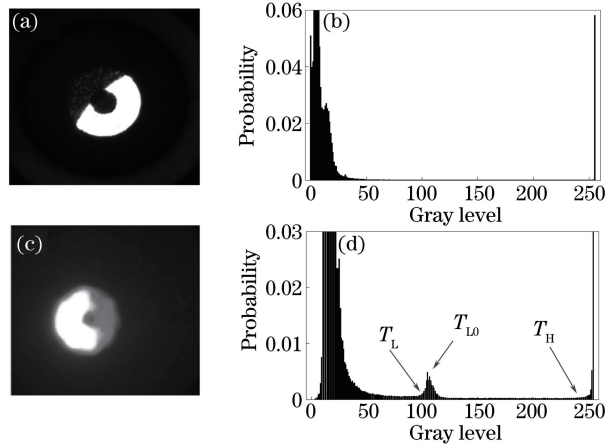


图 6 光束在背投影幕上的成像与灰度分布对比。(a) 自由空间中的光斑成像;

(b) 自由空间中图像的灰度分布;(c) 湍流中的光斑成像;(d) 湍流中图像的灰度分布

Fig. 6 Imaging on back projection and gray distribution of beam. (a) Spot imaging in free space;

(b) gray distribution of image in free space; (c) spot imaging in turbulence; (d) gray distribution of image in turbulence

根据图像灰度分布对图像进行分割, T_H 是亮阈值,根据观察与经验选取 $T_H = 250$ 即可满足要求; T_L 是暗阈值,通过 P -Tile 法^[16]计算得出; T_{L0} 是 P -Tile 法的初值,通过求取图像灰度分布峰值得到。在检测系统中,光学系统结构参数确定后,光斑在背投影幕上的成像面积为确定值,故选择 P -Tile 法来分割出圆环,设定 P -Tile 法的参数 $P = 0.14$ 。通过阈值分割后的图像如图 7 所示,其中图 7(a)是亮阈值分割出的光斑亮部图像,图 7(b)是暗阈值分割出的光斑圆环图像。

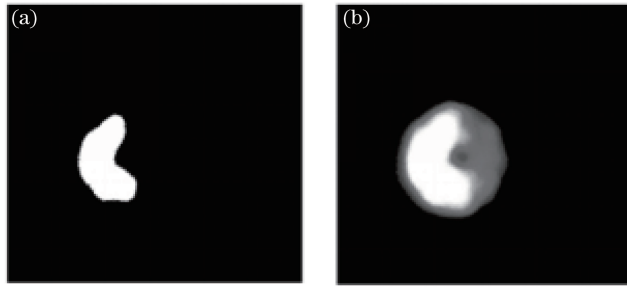


图 7 阈值分割后的图像。(a) 光斑亮部图像;(b) 光斑圆环图像

Fig. 7 Images after threshold segmentation. (a) Light image of spot; (b) ring image of spot

4.2 形心算法

形心算法是对二值化后的图像求取图形几何中心。阈值分割后亮目标二值化公式为

$$F(x_i, y_j) = \begin{cases} 1, & P_{ij} \geq T \\ 0, & P_{ij} < T \end{cases} \quad (6)$$

式中 T 是阈值; P_{ij} 是光斑所在像元的灰度值, $P_{ij} = S_{ij} + N_{ij}$, S_{ij} 为原始图像的灰度值, N_{ij} 为图像噪声。

目标图像分布在以矩形窗口内,左上角设为起始点坐标 (i_0, j_0) ,右下角设为终点坐标 (i_f, j_f) ,以图像中某一点为原点 O ,建立二维平面坐标系,形心坐标计算如下^[14]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i_0}^{i_f} \sum_{j_0}^{j_f} x_i F(x_i, y_j)}{\sum_{i_0}^{i_f} \sum_{j_0}^{j_f} F(x_i, y_j)} \quad (7)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i_0}^{i_f} \sum_{j_0}^{j_f} y_j F(x_i, y_j)}{\sum_{i_0}^{i_f} \sum_{j_0}^{j_f} F(x_i, y_j)}, \quad (8)$$

式中 \bar{x} 、 \bar{y} 分别为形心坐标的行、列值。通过形心算法分别对阈值分割得到的两个图像进行处理。计算 a 坐标 (x_a, y_a) 时, (6) 式中阈值 $T = T_L$; 计算 b 坐标 (x_b, y_b) 时, (6) 式中阈值 $T = T_H$, T_H 是亮阈值。图像坐标计算结果如图 8 所示, 其中图 8(a) 是对图像亮部直接求形心坐标 b , 图 8(b) 是对图像完整圆环取形心坐标 a 。

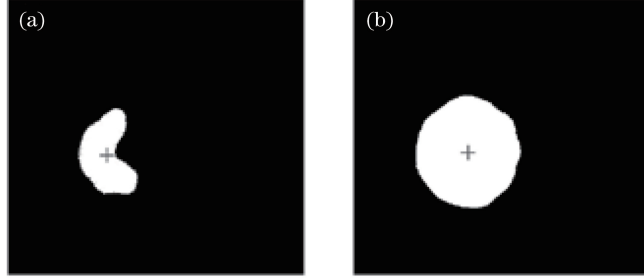


图 8 图像坐标计算结果。(a) 图像亮部形心坐标; (b) 图像暗部形心坐标

Fig. 8 Calculation results of image coordinates. (a) Centroid coordinate of light image; (b) centroid coordinate of shadow image

4.3 光束位置误差分析

如图 9(b) 所示, 光束远场光斑的光强为高斯分布, 定义光斑中光强高于亮阈值 E_H 的部分为光斑亮部, 低于暗阈值 E_L 的部分为环境背景光。 E_H 、 E_L 分别对应于图像分割阈值 T_H 、 T_L 。

由于光束受到副镜遮挡, 背投幕上光斑的中心出现残缺, 使用图像光斑亮部形心来表征光束光轴实际位置存在偏差。对光束进行阈值分割后, 设光斑亮部半径为 r , 天线接收阵面半径为 D , 副镜半径为 d , 三者关系如图 9(a) 所示, 图中圆 C_3 对应图 9(b) 中的光斑亮部。

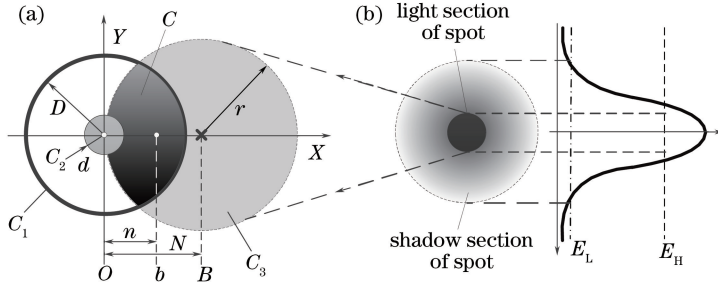


图 9 光束实际位置与形心计算位置的关系

Fig. 9 Relationship between actual position of beam and centroid calculation position

已知, 圆 C_1 、 C_2 、 C_3 分别代表天线接收面、卡塞格林副镜与光斑亮部。 C_1 表达式为 $x^2 + y^2 = D^2$, $2D$ 是天线口径。 C_2 表达式为 $x^2 + y^2 = d^2$, d 是副镜半径。 C_3 表达式为 $(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 = r^2$, 其中, B 点坐标 (x_B, y_B) 是光斑中心光轴的坐标, r 是光斑亮部半径。图中阴影部分 C 是圆 C_3 与 C_1 重合但不包含 C_2 的部分。利用 (7)~(8) 式求取阴影部分 C 形心坐标 (x_b, y_b) 。可得光束位置偏差测量值 n 为

$$n = \sqrt{(x_b^2 - x_0^2) + (y_b^2 - y_0^2)}. \quad (9)$$

实际光束位置偏差 N 为

$$N = \sqrt{(x_B^2 - x_0^2) + (y_B^2 - y_0^2)}, \quad (10)$$

n 和 N 之间的关系可表达为

$$n = k \cdot N, \quad (11)$$

式中 k 为检测灵敏度。

本系统中 $D = 101.5 \text{ mm}$, $d = 35 \text{ mm}$, 只考虑光斑中心 B 点在 X 轴上移动时的情况(在 Y 轴上移动时的

情况与此一致), N 与 n 关系如图 10(a) 所示, 图中横坐标为 N , 纵坐标为 n , 3 条曲线分别表示当光斑亮部半径 r 取值不同时所对应的情况。图 10(b) 为检测灵敏度 k 的变化曲线, 从图 10(b) 中可知, 当 $r=d$ 时, 副镜对检测结果影响很大, 天线接收面中心附近曲线出现严重的阶跃, 非线性误差很大; 当 $r=2d$ 时, 副镜影响减小, 在 $(-30, 30)$ 区间内, 检测曲线有较好的线性度, 且灵敏度较高; 当 $r=D$ 时, 线性区间扩大为 $(-70, 70)$, 灵敏度降低。由此说明随着光束变宽, 检测线性区间增大, 灵敏度降低。具体光斑尺寸的选择, 可结合 APT 系统实际参数要求而定。

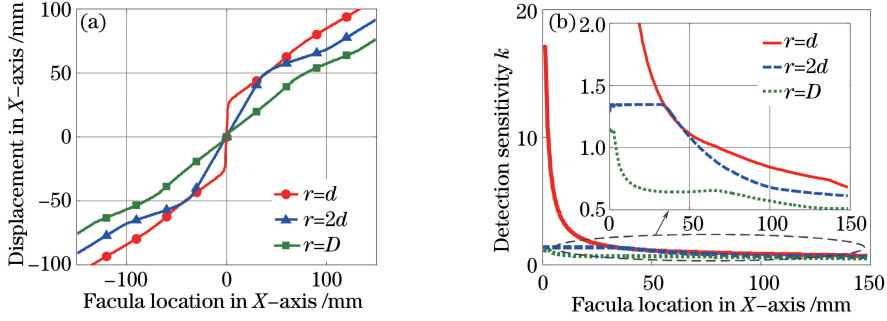


图 10 算法误差分析。(a) X 轴输出结果与实际光轴位置; (b) 检测灵敏度

Fig. 10 Algorithm error analysis. (a) X axis output and position of the actual optical axis; (b) detection sensitivity

5 实验研究与数据分析

5.1 实验介绍

实验场地一, 西安理工大学金花校区的教学六楼第 8 层西侧阳台至西安西南城角附近的万洪地产大厦第 33 层天台东侧, 直线距离为 6.8 km; 实验场地二, 西安理工大学金花校区的教学六楼 805 实验室至西安东二环凯森福景雅苑四单元 11 层, 直线距离为 1.3 km, 具体地理位置如图 11 所示。在实验场地一进行系统功能验证, 在实验场地二进行系统精度测试。



图 11 实验场地介绍

Fig. 11 Introduction of experimental site

CCD 相机镜头光圈参数设置如下, 衍射极限公式为

$$\sin \theta = 1.22\lambda / D', \quad (12)$$

式中 θ 是角分辨率, λ 是波长, D' 是光圈直径。当 θ 很小时, $\sin \theta \approx \tan \theta \approx d'/f$, 其中, d' 是最小分辨尺寸, f 是焦距, 由此推导出 $d'/f = 1.22\lambda / D'$ 。CCD 像素间距为 $4.4 \mu\text{m}$, 红光波长选择 650 nm , 由计算可得当 $D' > 2.12 \text{ mm}$ 时, 不受衍射极限影响, 镜头放大倍率为 1。天线为施密特-卡塞格林天线, 口径为 203 mm , 焦距为 2000 mm 。检测精度理论计算如下, 完整暗环在 CCD 靶面上直径为 800 pixel , 暗环实际物理尺寸为天线口径, 即 203 mm , 横向偏移量检测精度约为 0.25 mm , 轴向偏角检测精度为 $2.2 \mu\text{rad}$, 使接收端处光斑亮部直径大小与天线口径相等, 即 $r=d$ 。

5.2 数据分析

光束对准检测曲线如图 12 和图 13 所示,图中滤波曲线是对直接检测数据进行卡曼滤波与滑动平均滤波后的结果。图 12 为光束发生位置漂移时光斑坐标变化,从图 12(a)可知,光束在 14 min 内在方位方向(X 方向)上发生了较大的漂移,位置漂移量达到 40 mm,随着漂移的增加,光束主光轴偏离接收天线视轴,光强闪烁噪声增加,光斑坐标抖动也随之增大。同理,从图 12(b)可知,光束在俯仰方向(Y 方向)上只发生了小幅度位移,光斑抖动增加不大。

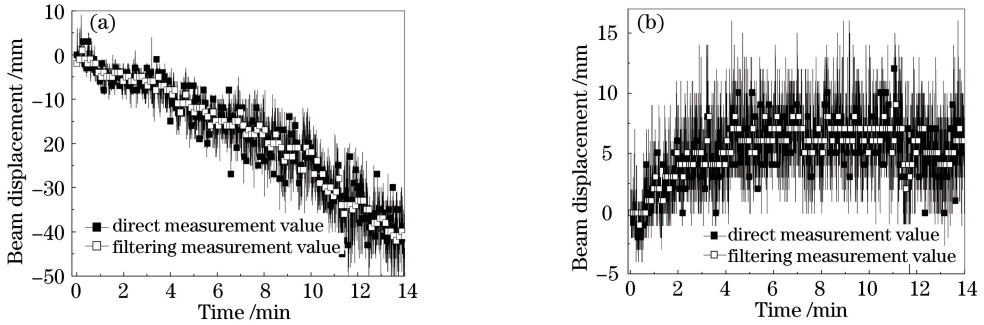


图 12 光束漂移量检测。(a) 方位方向光束漂移; (b) 俯仰方向光束漂移

Fig. 12 Beam displacement detection. (a) Beam displacement on azimuth direction ;(b) beam displacement on pitch direction

图 13 为光束光轴与天线视轴的偏差角的变化曲线。由于本实验光端机两端均位于固定平台,两者相对位置没有发生变化,故入射角度没有发生较大变化。图中曲线的小幅度快速抖动是因为受到实验平台自身抖动与光束到达角起伏的影响,大幅度慢速的偏差角变化是受高层建筑风荷载位移^[17]的影响。

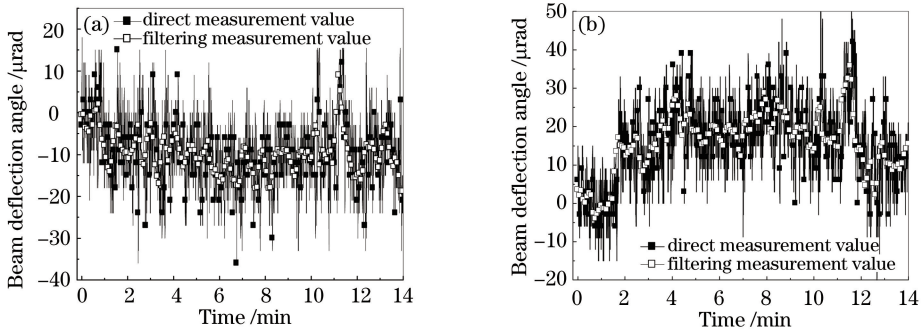


图 13 光束偏角检测。(a) 方位方向光束偏角; (b) 俯仰方向光束偏角

Fig. 13 Beam deflection angle detection. (a) Beam deflection angle on azimuth direction ;
(b) beam deflection angle on pitch direction

由于受到高层建筑晃动影响与本系统光束指向执行机构精度的限制,在实验场地一无法进行系统检测精度测试,故在实验场地二进行检测精度测试。

系统检测精度测试方法如下,首先对 A 端与 B 端进行的对准使得 $\alpha=0$ 且 $p=0$,控制 A 端伺服系统转动一定角度 $\Delta\alpha$,保持 B 端不动对 A 端光束进行检测,检测结果如表 1 所示。从表中可得,随着转动角度增大,检测标准差增大,这是由于光束边缘处能量低于中心处,随着光斑远离阵面中心位置,信号信噪比下降。

表 1 系统检测精度测试

Table 1 System detection accuracy test

Rotation angle $\Delta\alpha / \mu\text{rad}$	Beam error angle α detection		Beam displacement p detection			Distance / m ($L \approx 1286.8$ m)
	Measured value / μrad	Standard deviation	Measured value / mm	Nonlinear correction / mm	Standard deviation	
20	19.4615	1.9794	16.9085	26.2082	2.9621	1346.7
30	28.3309	2.6587	23.5990	37.5780	4.0443	1291.1
40	42.3564	3.0326	35.5548	55.1099	4.8367	1301.1
50	51.7484	3.1523	42.6321	66.0797	5.0553	1278.4

表 1 中 $20 \mu\text{rad}$ 偏转数据中的双端距离 L 明显高于另外 3 组数据,这是由于在非线形校正时,采用了近似算法,校正系数($1/k$)统一采用 1.55,而此处实际的系数应为 1.49。通过对比发现 $30、40、50 \mu\text{rad}$ 偏转的检测结果与伺服系统输入基本一致,其误差主要由伺服系统误差与光强起伏共同影响。

对系统天线偏差角 α_1 、光束漂移角 α_2 与漂移位移 p 分辨能力进行测试,结果如表 2 所示。测试中 A 端发射,B 端测试,用 A 端转动角度模拟光束漂移角,B 端转动产生天线偏角,共进行 4 组测试,通过 (5) 式求出 α_1 与 α_2 ,计算时 $L=1286.8 \text{ m}$ 。从表中可知,当 A 端转动 $30 \mu\text{rad}$,B 端转动 $-30 \mu\text{rad}$ 时,出现图 4(b)所示的两路光束平行的情况,光束在 B 端到达角为 0,若使用常规检测方法,此时认为系统已经实现对准,这与实际情况并不相符。对比表中数据,通过计算得到的 $\alpha_1、\alpha_2$ 与系统伺服系统输入相符。

表 2 系统分辨测试

Table 2 Resolution test of system

Rotation angle of B end / μrad	Rotation angle of A end / μrad	Parameter			
		α / μrad	p /mm	α_1 / μrad	α_2 / μrad
-30	20	-10.7471	25.9131	-30.8972	20.1501
30	0.7927	37.5356	-28.4127	29.1879	
30	20	47.9725	25.7913	27.9171	20.0554
30	62.3518	36.8951	33.6612	28.6898	

6 结 论

提出了基于背投幕的光束对准精确检测方法,解决了传统方法无法分辨检测系统的天线偏差角与光束漂移的难题,以及无法精确检测光束漂移位置的问题。该方法可以精确检测光束光轴是否严格对准接收天线视轴,为 APT 系统控制光束精确指向提供了依据。虽然本文算法涉及较多的像素计算,但是算法并不复杂,其计算速度依然可以满足系统要求,对大气激光通信光束对准跟踪系统有一定借鉴意义与实用价值。

参 考 文 献

- 1 Wang Hongxing, Wu Xiaojun, Song Bo. Experiment study on beam wander of collimated beam in atmospheric turbulence under sea surface environment[J]. Acta Optic Sinica, 2015, 35(11): 1101005.
王红星, 吴晓军, 宋 博. 近海面大气湍流中准直光束漂移特性的实验研究[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1101005.
- 2 Ke Xizheng, Han Meimiao, Wang Mingjun. Spreading and wander of partially coherent beam propagating along a horizontal-path in the atmospheric turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106003.
柯熙政, 韩美苗, 王明军. 部分相干光在大气湍流中水平传输路径上的展宽与漂移[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106003.
- 3 Lee S, Ortiz G G, Alexander J W. Star tracker-based acquisition, tracking and pointing technology for deep-space optical communications[J]. Interplanetary Network Progress Report, 2005: 42-161.
- 4 Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, et al.. Defective pixel correction of spot-detection camera in satellite-to-ground laser communication ATP system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505007.
钱 峰, 贾建军, 张 亮, 等. 星地激光通信 ATP 系统探测相机的坏点校正[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505007.
- 5 Zhang Hui, Chen Yunshan, Geng Tianwen, et al.. Study on main factors affecting position detection accuracy of four-quadrant detector[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1217002.
张 辉, 陈云善, 耿天文, 等. 四象限探测器位置检测精度的主要影响因素研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1217002.
- 6 Tolker-Nielsen T, Oppenhauser G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[C]. SPIE, 2002, 4635: 1-15.
- 7 Monacos S P, Lam R K, Portillo A A, et al.. Design of an event-driven random-access-windowing CCD-based camera [C]. SPIE, 2003, 4975: 42-155.
- 8 Zhang Wentao. Sub-pixel resolution of CCD in optical communication[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(6): 788-790.
张文涛. 空间光通信中 CCD 亚像素的分辨率[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 788-790.
- 9 Lin Zhiqi, Li Huijie, Lang Yonghui, et al.. 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, 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.
- 10 Shang Tao, Li Xi, Liu Zengji, *et al.*. Novel four-quadrant design and the method for obtaining spot parameters[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 1035-1039.
尚 韬, 李 曦, 刘增基, 等. 新型四象限设计及其光斑参数测量方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1035-1039.
- 11 Liu Yunqing, Jiang Huilin, Tong Shoufeng. Study on stabilization 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.
- 12 Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, *et al.*. Position accuracy of spot-detecting camera in acquisition, tracking, pointing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205007.
钱 峰, 贾建军, 张 亮, 等. 捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测相机的定位精度[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205007.
- 13 Li Jinhong, Lü Baida. Comparative study of partially coherent vortex beam propagation through atmospheric turbulence along a up-link path and down-link path[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(7): 074205.
李晋红, 吕白达. 部分相干涡旋光束通过大气湍流上行和下行传输的比较研究[J]. 物理学报, 2011, 60(7): 074205.
- 14 Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin, *et al.*. 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.
- 15 Ke Xizheng, Wang Wanting. Intensity and expansion of partially coherent beam propagating in slant and horizontal atmospheric turbulence[J]. Journal of Applied Sciences, 2015, 33(2): 142-154.
柯熙政, 王婉婷. 部分相干光在斜程和水平大气中的光强与扩展[J]. 应用科学学报, 2015, 33(2): 142-154.
- 16 Liu Songtao, Yin Fuliang. The basic principle and its new advances of image segmentation methods based on graph cuts [J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(6): 912-919.
刘松涛, 殷福亮. 基于图割的图像分割方法及其新进展[J]. 自动化学报, 2012, 38(6): 912-919.
- 17 Zhang Xiangting. Calculation of wind pressure and wind vibration of structure[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1985: 5-7.
张相庭. 结构风压与风振计算[M]. 上海: 同济大学出版社, 1985: 5-7.