

光学学报

利用双反射镜控制实现无线光通信光束对准

柯熙政^{1,2,3*}, 赵锦¹¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;²陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710048;³陕西理工大学物理与电信工程学院, 陕西 汉中 723001

摘要 针对远距离无线光通信中光束跟踪受长距离大气传输不确定因素影响大的问题,提出了一种利用双反射镜的无线光系统结构。针对双反射镜到接收端的短轴跟踪控制设计了滤光片转盘模块,通过给反射光斑施加频率扰动的方式来实现对相机探测面上双光斑的辨别,并以探测面上双光斑的重叠情况作为判别光束对准的依据。对于存在偏移的重叠双光斑图像,提出多光斑/重叠光斑中心提取的思路,利用最小二乘法椭圆拟合实现重叠光斑的分割,并对无重叠、较少重叠以及较多重叠三种情况下的光斑图像进行分割实验。研究结果显示,在光斑重叠的场景下,光斑中心定位与实际位置之间的标准差小于 0.5 pixel,因此所采用的算法在重叠光斑的分离方面具有很好的效果。

关键词 无线光通信; 二维反射镜; 双光斑重叠检测; 光束对准

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230815

1 引言

激光具有光束窄且方向性高的特点,在无线光通信过程中需要保持更精确的指向要求,但是在传输路径上,受大气扰动以及机械设备抖动等因素的制约,通信链路会变得不稳定,严重时会发生通信中断的现象^[1-3]。因此通信时就需要建立捕获、对准以及跟踪(APT)系统来确保链路的稳定^[4]。

APT的跟踪阶段是对大气湍流、机械抖动等因素引起的探测面光束漂移现象进行控制,接收端探测器会同步检测图像中光斑的位置信息,当光斑漂移超出阈值时,探测器就修正位置误差。接收端需要将测量到的偏移量回传给发射端,通过调整发射天线来保持收发双端长时间的跟踪。Al-Akkoumi等^[5]设计了一种基于万向节的自动跟踪系统,系统中的计算机通过分析位置探测器(PSD)的输出产生控制信号,从而引导万向节将激光指向PSD的中心,并在两个固定或移动收发器之间提供跟踪反馈信息。Bai等^[6]在进行激光束跟踪时,利用逻辑控制器对安装跟踪镜的两自由度云台的角度以及速度进行跟踪,通过激光干涉仪获得距离读数,再由四象限光电探测器测量,向发送端返回光斑的偏心误差。但是,大气湍流制约着远距离数据回传以及位置调整的准确性,致使长轴光束跟踪阶

段出现了极大的不确定性。

利用二维反射镜进行光束跟踪时,无须接收端向发射端回传数据,只需进行二维反射镜到接收天线的短轴跟踪,跟踪方式便捷且受环境影响较小。二维反射镜作为跟瞄系统中的执行机构,可以调整以及稳定光学系统的视轴^[5],多用于扫描以及目标跟踪等领域^[7]。常规APT系统为单执行器和单探测器的伺服系统,在利用二维反射镜对目标进行跟踪扫描时,选用单个转向镜作为执行器,经镜面反射后的激光束入射到光学系统中并在探测器靶面成像,形成一个完整的光闭环路^[8-9]。Ishola等^[10]针对激光通信链路视距激光通信应用场景,研究了一种反馈光电二极管阵列传感器辅助控制单轴的微机电精细反射镜,在实验室中开展了精细转向控制机制的实验,稳定了激光通信链路。Zahradnik等^[11]提出了一个用于自由空间通信中激光束偏转的二维反射镜,镜子的偏转是通过硬盘驱动器中的三个音圈电机完成的,在3 m的距离内,投射激光光斑的精度在 $-1.5\sim+1.5$ mm范围内。

在远距离传输时,激光束的扩展效应明显,扩散后的光斑可以完全覆盖整个二维反射镜,但单个二维反射镜反射的激光束受镜面大小的限制,只能反射部分光束^[12]。因此,本文利用多个二维反射镜进行光束的跟踪控制,多个二维反射镜相当于一个大的反射镜,增

收稿日期: 2023-04-14; 修回日期: 2023-05-15; 录用日期: 2023-05-22; 网络首发日期: 2023-06-28

基金项目: 陕西省科研项目(18JK0341)、陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)、西安市科技计划项目(2020KJRC0083)

通信作者: *xzke@263.net

大了反射面积,相较于多发多收的无线光通信系统,结构简单且成本低。通过引入滤光片转盘模块,对反射光束分别施加不同频率的扰动,设计了一种双反射光斑的辨别和跟踪控制方法,并针对反射光斑重叠情况下的双光斑检测进行了研究。

2 理论分析

2.1 系统介绍

图 1 为利用双反射镜进行无线激光通信的系统原理图。在发射端,调制之后的信号被加载到激光器发射的光波上,经过光纤放大器后通过发射天线准直发射。光束经远距离传输后受大气湍流的影响,光斑半径可达到 m 量级。发射端的瞄准平台以及标定相机先对反射镜进行位置标定,使得镜面处在被激光完全覆盖的范围内。二维反射镜模块的每片反射镜作为一个独立伺服子单元,通过步进电机对二维反射镜俯仰角、方位角偏转的调整来控制反射光束的指向^[8]。接

收天线接收到的光会被分光棱镜分到两路,其中:一路接收光经光电转换后与发射端进行通信;另一路接收光入射到相机探测面,实现对光斑的实时探测,以反馈光斑的位置信息。

二维反射镜辅助的 APT 系统与传统收发双端长轴跟瞄的不同之处在于其需要进行二维反射镜到接收端的短轴跟瞄。在对准控制阶段,需要将光斑控制维持在探测器的有效范围内。接收端探测器靶面检测反射光斑的偏移量信息,并通过跟踪控制器控制伺服机构调整二维反射镜反射光束的光轴,进而对反射光束的指向进行调整^[13-14]。利用双反射镜与利用单反射镜的控制系统的区别在于:二维反射镜由一个变为两个,但探测器保持为一个不变。如果两个反射镜的跟瞄存在误差,在图像探测系统中将会出现多光斑现象,经过光斑检测阈值分割与二值图像处理得到的光斑偏移量无法与两个二维反射镜进行有效对应。

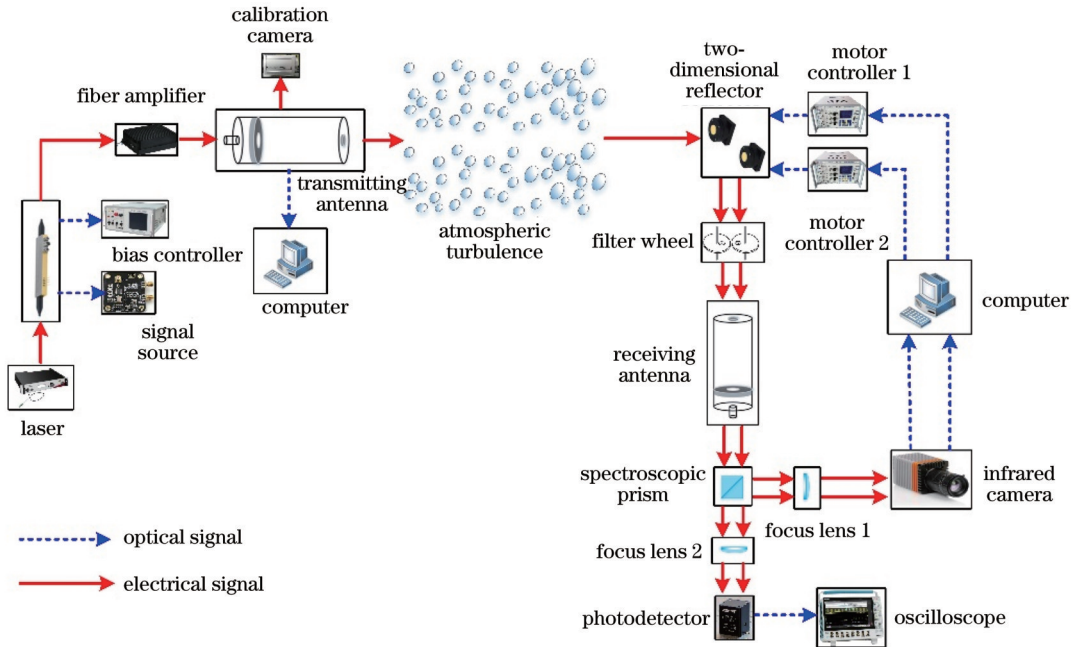


图 1 利用双反射镜进行无线激光通信的系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of a wireless optical communication system using a double reflector

为了区分探测面双反射光斑,在反射镜与接收端的光路上插入滤光片转盘,其结构如图 2 所示。转盘

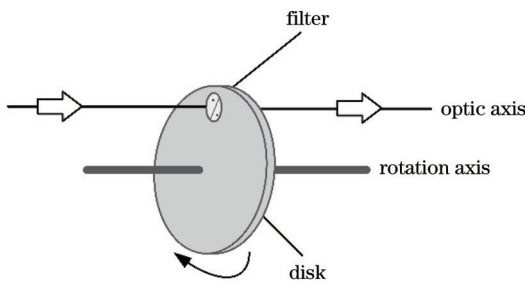


图 2 滤光片转盘结构

Fig. 2 Structure of the filter carousel

上插入滤光片,通过电机控制对应转盘的旋转来实现滤光片的转动。当两条光路上滤光片转速不同时,连续时间内的两束光会在探测面上出现频率不同的两束明暗交替的光斑,以此来区分两个光斑。

2.2 光斑频率抖动分析

激光的基模能量为理想高斯分布,实际中被认为是平面波,则高斯光束在某一横截面处的光能量^[15]可以表示为

$$I(x, y) = I_0 \exp\left(-x^2 + y^2/w_0^2\right), \quad (1)$$

式中: I_0 为高斯光束的最大光强值; w_0 为光束的束宽。

记二维反射镜面的半径为 M_r ,如图 3 所示,在远场

激光覆盖平面区域 xoy 内, 将反射镜的中心坐标分别记为 $P_{os1}=(p_{x1}, p_{y1})$ 、 $P_{os2}=(p_{x2}, p_{y2})$, 镜面与 x 轴的夹角为 θ_x , 与 y 轴的夹角为 θ_y , 则在坐标系 xoy 上, 二维反射镜圆面内任意一点 (x, y) 接收到的光束的坐标 M 满足条件:

$$M = \left\{ (x, y) \left| \left[\frac{(x - p_x)}{(M_r \cos \theta_x)} \right]^2 + \left[\frac{(y - p_y)}{(M_r \cos \theta_y)} \right]^2 < 1 \right. \right\}. \quad (2)$$

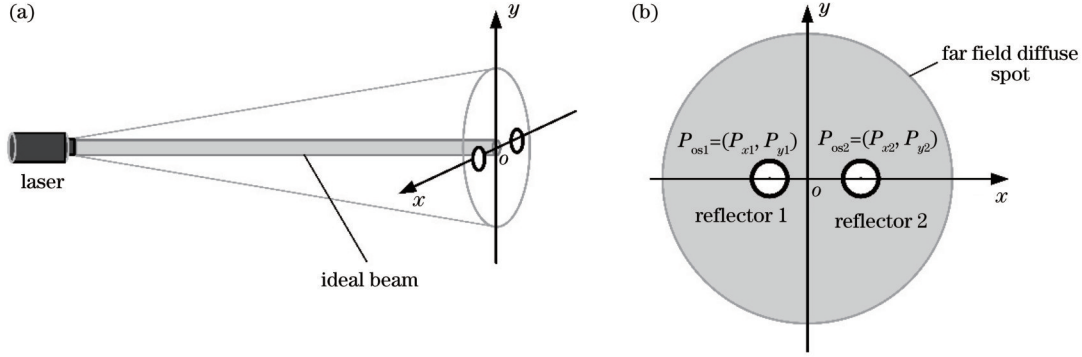


图 3 二维反射镜反射光示意图。(a) 三维坐标; (b) 二维坐标

Fig. 3 Schematic diagram of light reflected by a 2D reflector. (a) 3D coordinate; (b) 2D coordinate

通过滤光片后, 反射镜反射的激光束经过透镜后的场分布可表示为

$$I_i = F_i \cdot M_i \cdot I(r) \cdot \exp[i \cdot \varphi(x, y)] \cdot \exp(i \cdot k \cdot f), \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

式中: $i=1, 2$, 分别标记两个反射镜; $\varphi(x, y)$ 代表湍流

设两个滤光片模块转盘的旋转周期分别为 T_1, T_2 , 滤光片的透过率分别为 T_{r1}, T_{r2} , 转盘上滤光片的区间为 $[l, 1]$, 滤光片旋转的初始状态位置为 φ_1, φ_2 , 则滤光片模块的光束通过情况 F_i 表示为

$$F_i = \begin{cases} 0, & (2\pi t/T_i + \varphi_i) \bmod 2\pi \leq 2\pi l \\ T_{ri}, & (2\pi t/T_i + \varphi_i) \bmod 2\pi > 2\pi l \end{cases}, \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

相位屏; f 为透镜的焦距; k 为波数。

假设在单位时间 t 内采集 20 次光斑图像, 当两个转盘周期 $T_1=0.05$ s、 $T_2=0.10$ s 时, 取 $T_{r1}=0.9$ 、 $T_{r2}=0.8$, 得到通过滤光片模块后随时间变化的反射光光强值图, 如图 4 所示。

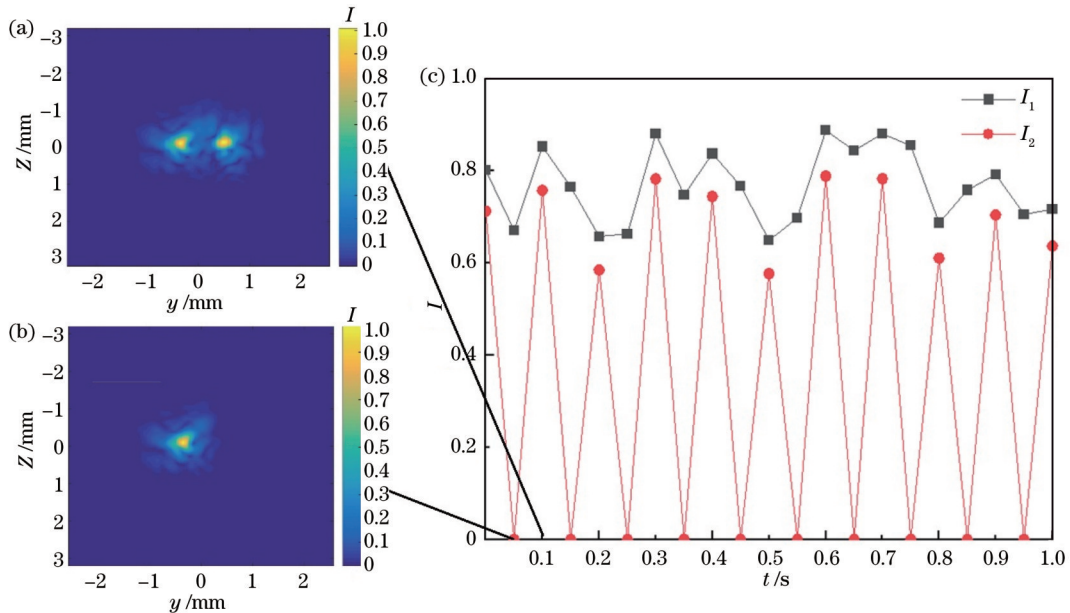


图 4 反射光束通过滤光片模块后的光强值变化。(a) $t=0.10$ s 时的光斑图; (b) $t=0.05$ s 时的光斑图; (c) 随时间变化的光强
Fig. 4 Variation of the light intensity value of the reflected beam passing through the filter module. (a) Light spot diagram at $t=0.10$ s; (b) light spot diagram at $t=0.05$ s; (c) light intensity variation with time

从图 4 可以看出, 滤光片转盘旋转周期不同, 探测面上接收到的两束反射光束的图像会有差异。转

盘的转速越高, 则旋转周期越小, 在单位时间内反射光束被采集到的次数越多, 对应时刻的探测面的总光

强值越大。当控制两个转盘以不同速度转动时,在单位时间内探测面上采集到的亮斑的个数会有差异。因此通过观察单位时间内探测面上采集亮斑的个数,可以实现区分接收端相机视场范围内两个光斑的目的。

3 双光斑的检测与对准

3.1 双光斑对准原理

图 5 为对准情况下的双光斑图,其中,横纵坐标 N 为复矩阵维数。可以看出,两个反射光斑重叠在探测面的视场中心。但由于大气湍流导致的光束漂移以及平台机械抖动等原因,光斑会出现偏移现象,如图 6 所示,两个反射光斑不再维持完全重叠状态,需要将探测面检测到的光斑的脱靶量反馈给二维反射镜的控制器,从而进行对准控制。同时,可以根据探测面双光斑的重叠情况来判别光斑是否对准。

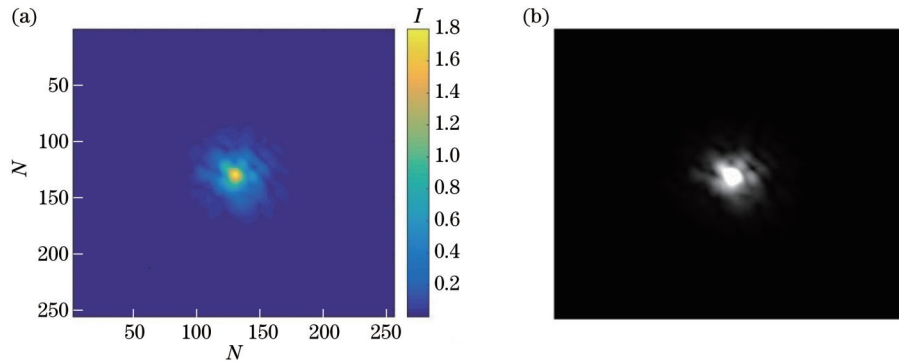


图 5 对准情况下的双光斑图。(a)彩色原图;(b)灰度图

Fig. 5 Double spot maps in the alignment case. (a) Original color map; (b) grayscale map

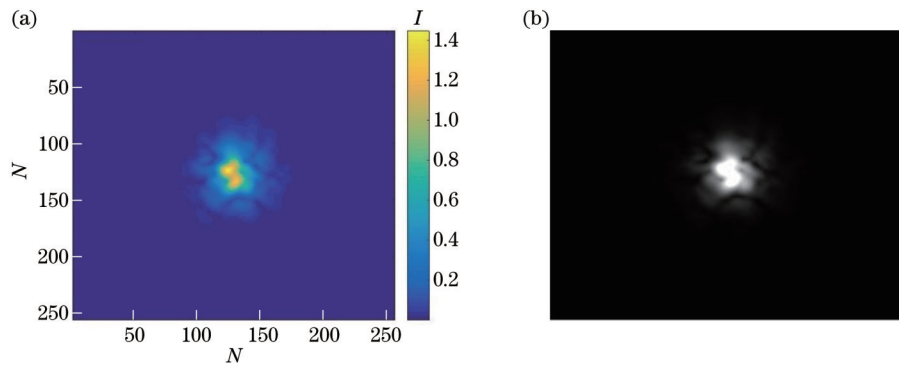


图 6 出现偏移的双光斑图。(a)彩色原图;(b)灰度图

Fig. 6 Double spot maps with offset. (a) Original color map; (b) grayscale map

3.2 重叠光斑判断

当光斑重叠在一起时,光斑边缘会变得复杂。重叠区通常会出现凹陷的情况,用形状因子来表征目标对象的边界复杂性,即

$$P_E = 4\pi S / C^2, \quad (5)$$

式中: P_E 为形状因子参数; S 为一个连通域光斑的面积; C 为光斑的周长。

图 7 是设计的多光斑/重叠光斑中心提取和光斑控制流程图,多个二维反射镜会反射出多路光束,这些光束入射到相机靶面会出现多个光斑。当利用激光的能量分布特征或质心定位算法对上述情况进行处理时,光斑图像之间会互相干扰^[16-17]。由于光斑图像具有连通特性,因此在求取多路反射光束的质心时,可以先对每路反射的光斑进行标记,从原图像中分割出所有光斑,然后进行单独处理。

图 8(a)是对图 6 中的光斑进行边缘提取后的灰度图像,可以看出,因为两个光斑相互粘连、重叠,在图 8(a)中被识别成了一个重叠的单光斑。图 8(b)是双光斑灰度图的一个截面,可以看出,光斑的光强值呈现明显的高斯分布,但是由于图像重叠,光斑的特征出现重叠。为获取图像中光斑的数量以及特征参数,需要将重叠的光斑准确地分离为单光斑,以方便进行中心位置信息的提取。

当光斑越接近圆时, P_E 数值越接近于 1。若光斑存在重叠,则图像边缘区域会存在凹陷。设置双光斑的重叠度表示为

$$R_{\text{overlap}} = 1 - L/D, \quad (6)$$

式中: R_{overlap} 为重叠度参数; L 为两个光斑中心之间的距离; D 为圆形光斑的直径。

图 9 是根据实际测量数据绘制出的 P_E 与 R_{overlap} 的

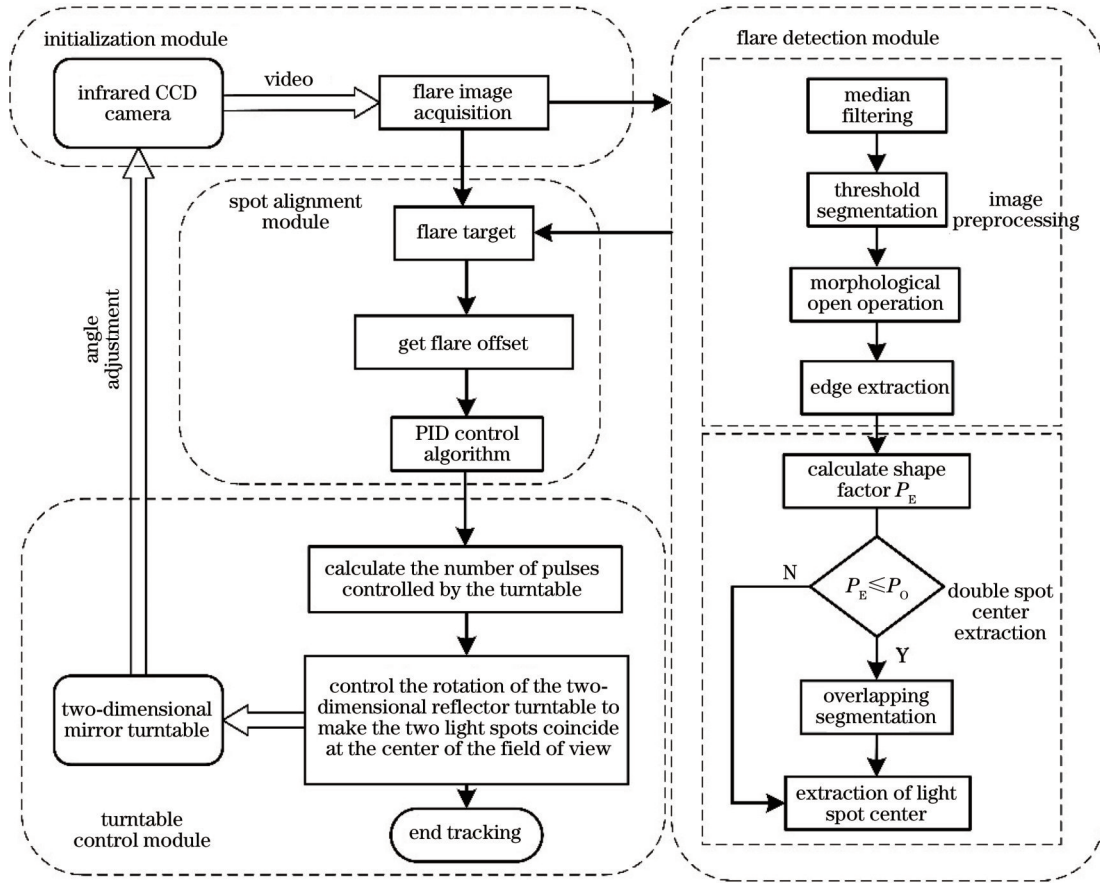


图 7 多光斑/重叠光斑中心提取和光斑控制流程图

Fig. 7 Flow chart of multi-spot/overlapping spot center extraction and spot control

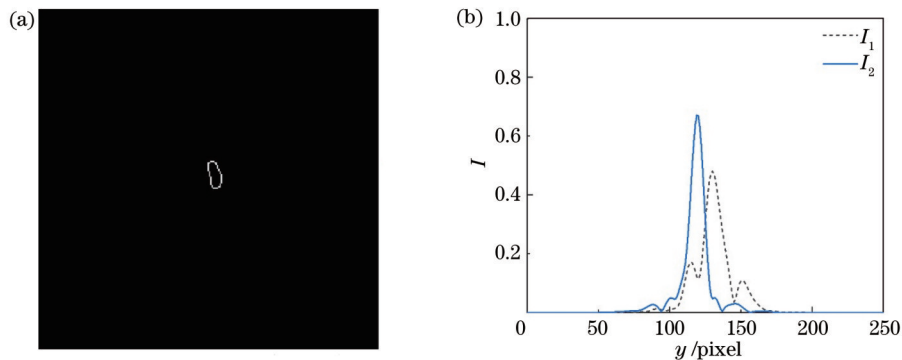


图 8 重叠双光斑图像。(a)边缘提取灰度图;(b)灰度分布图的一个截面图

Fig. 8 Overlapping double-spot images. (a) Edge-extracted grayscale map; (b) cross-section of the grayscale distribution map

关系图。将形状因子的阈值表示为 P_0 , 依据 P_E 与 $R_{overlap}$ 之间的关系, 设定 P_0 值为 0.6。当 $P_E \leq P_0$ 时, 判断光斑之间是重叠的; 当 $P_E > P_0$ 时, 判断光斑为不重叠的。图 6 中, $P_E = 0.6481$, 则判断光斑是重叠的。

3.3 双光斑重叠分割

当光斑被判定为重叠后, 必须进行重叠分割, 这个过程的重点是选择合适的分割线。最小二乘法的圆拟合方法是常用的一种中心提取方法^[18]。在接收端检测面上, 反射光束入射后接收到的图像中的光斑形状会发生变化。与圆形拟合法相比, 椭圆拟合可以更加准

确地反映光斑的位置以及形状。利用椭圆拟合算法对多光斑/重叠光斑进行中心提取, 在这个过程中需要进行两次分割。

在第一次分割过程中, 对图像边缘提取点进行线性拟合, 拟合出直线 $l_1: y = k_1 + b'$, 其中, k_1 和 b' 分别表示拟合直线的斜率和位置系数。 l_1 和理想情况下的双光斑分割线互相垂直。作第一次分割的粗分割线 l_1 过重叠光斑的中心坐标位置 (x_c, y_c) 且垂直于拟合直线 l_1 的垂直方向, 表示为

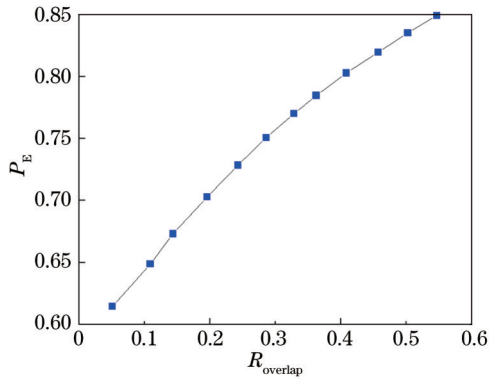


图 9 形状因子与光斑重叠度的关系

Fig. 9 Relationship between shape factor and the degree of spot overlap

$$\begin{cases} y - y_c = \frac{-1}{k_1}(x - x_c), & k_1 \neq 0. \\ x = x_c \end{cases} \quad (7)$$

在第一次分割的基础上,进行二次分割。经过第一次粗分割后,边缘提取点被分为两部分,将两组数据的测量点进行独立椭圆拟合,找出与拟合结果偏离较大且分布在直线 l_i 附近位置的坐标点 $Q_i(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, M)$ 。大部分的偏离点分布在 l_i 与理想分割线的附近位置,对应到图像中就是重叠光斑的边缘凹陷位置。然后在 l_i 两侧分别搜索距离拟合直线最近的两个偏离点 $Q_{s1}(x_{s1}, y_{s1})$ 、 $Q_{s2}(x_{s2}, y_{s2})$, 将这两个点称为凹点。将两个凹点之间的连线作为第二次分割的细分割线 $l_a^{[19]}$, 表示为

$$\begin{cases} y = (y_{s2} - y_{s1}) / (x_{s2} - x_{s1})(x - x_{s1}) + y_{s1}, & x_{s2} - x_{s1} \neq 0 \\ x = x_{s1}, & x - x_{s1} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

同样,将经第二次分割后的两部分数据进行独立椭圆拟合,就可以获得两个重叠光斑各自对应的位置以及形状参数。假设椭圆的参数方程为

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + 1 = 0, \quad (9)$$

式中, A, B, C, D, E 为系数。令 $P_i(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, N)$ 表示椭圆光斑边缘轮廓的测量数据点, 根据最小二乘原理以及目标函数的极值定理建立方程组:

$$\begin{cases} F(A, B, C, D, E) = \sum_{i=1}^N (Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + 1)^2 \\ \partial F / \partial A = \partial F / \partial B = \partial F / \partial C = \partial F / \partial D = \partial F / \partial E = 0 \end{cases} \quad (10)$$

通过求解式(10),可以获得椭圆的中心坐标 (x_0, y_0) 、长半轴 a 、短半轴 b 以及长轴倾角 θ :

$$\begin{cases} x_0 = (2BE - CD) / (4AC - B^2) \\ y_0 = (BD - 2AE) / (4AC - B^2) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} a = \sqrt{2(Ax_0^2 + Bx_0 y_0 + Cy_0^2 - 1) / [A + C - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}]} \\ b = \sqrt{2(Ax_0^2 + Bx_0 y_0 + Cy_0^2 - 1) / [A + C + \sqrt{(A - C)^2 + B^2}]} \end{cases} \quad (12)$$

$$\theta = 0.5 \arctan(B/A - C). \quad (13)$$

图 10(a) 是两个椭圆形状的重叠光斑在经过两次分割后的结果图, 图 10(b) 是多光斑图像椭圆拟合提取中心后的最终结果, 其中, “×” 标记的位置就是提取出的光斑中心。

4 仿真结果分析

表 1 罗列了在进行光斑图像数值模拟仿真中用到的主要参数, 其中湍流相干长度 r_0 是衡量大气动态扰动强度的参数。在仿真中, 设置 $r_0 = 0.01$, 以表征弱湍流下的大气扰动情况。

为了对算法的准确性进行验证, 分别将反射光斑的理想重心坐标与重叠分割后的光斑的中心坐标进行定位精度对比分析。在仿真实验中, 根据双光斑重叠

度 R_{overlap} 分为双光斑无重叠、较少重叠 ($0 < R_{\text{overlap}} \leq 0.25$) 以及较多重叠 ($0.25 < R_{\text{overlap}} \leq 0.50$) 三种情况进行分析。图 11 是 R_{overlap} 为 0、0.1849、0.4522 时的双光斑灰度图像, 图 12 是运用所提算法进行光斑分割的效果图。

借助最小均方误差来进行实际中心坐标与理想中心坐标的比较, 并以此来衡量算法的精度。表 2 是实际中心坐标和所提算法分割后中心坐标的对比结果。从表 2 中可以看出, 双光斑无重叠以及较多重叠两种情况下的中心坐标位置误差值比双光斑较少重叠情况下要小, 且在较多重叠情况下, 中心坐标位置误差值在 1 pixel 以内。

稳定性则是针对多组双光斑图像进行分析。在仿真时, 提取 30 帧光斑图像的数值仿真中心坐标, 将图

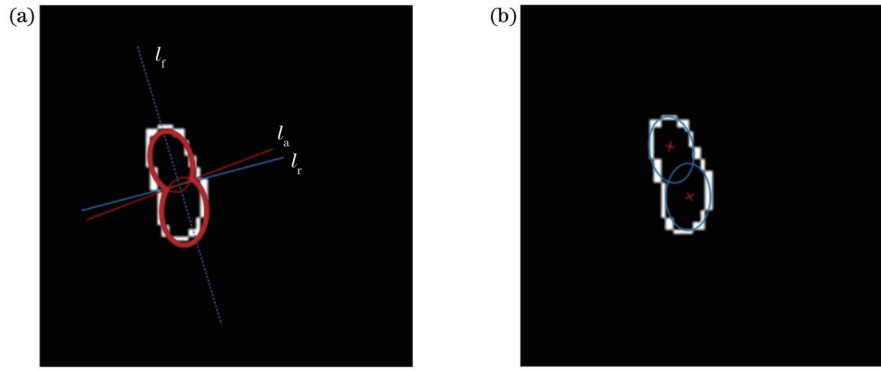


图 10 重叠光斑分割图。(a)分割结果;(b)光斑中心提取结果

Fig. 10 Diagrams of overlapping light spots segmentation. (a) Segmentation results; (b) light spot center extraction results

表 1 主要参数

Table 1 Main parameters

Parameter	Numerical value
Wavelength l / nm	1.55×10^{-6}
Turbulent coherence length r_0	0.01
Turbulent internal scale l_0 / m	0.1
Turbulent outer scale L_0 / m	1
Phase screen size L_p / m	0.4
Light spot girdle w_0 / m	10×10^{-3}
Complex matrix dimension N	256
Distance from 2D reflector to receiving surface / m	10

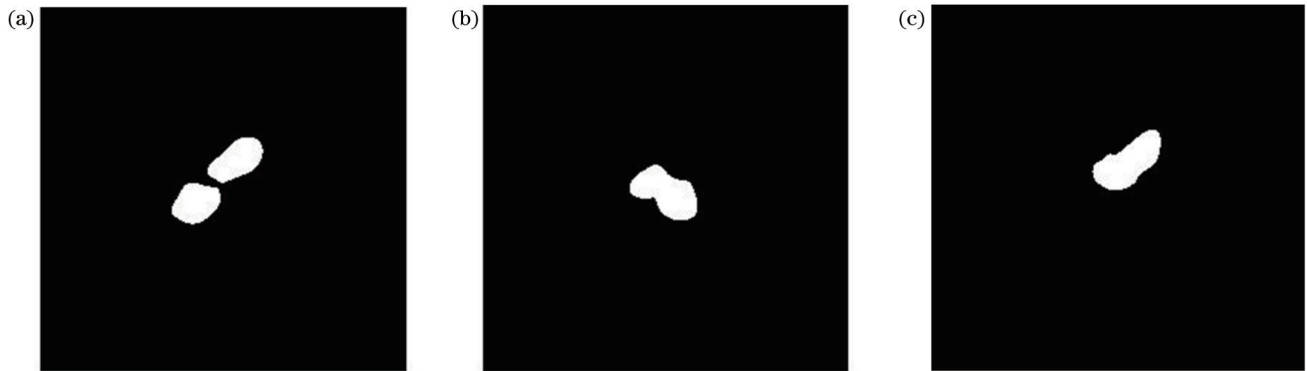


图 11 双光斑灰度图像。(a)无重叠;(b)较少重叠;(c)较多重叠

Fig. 11 Double-spot grayscale images. (a) No overlap; (b) less overlap; (c) more overlap

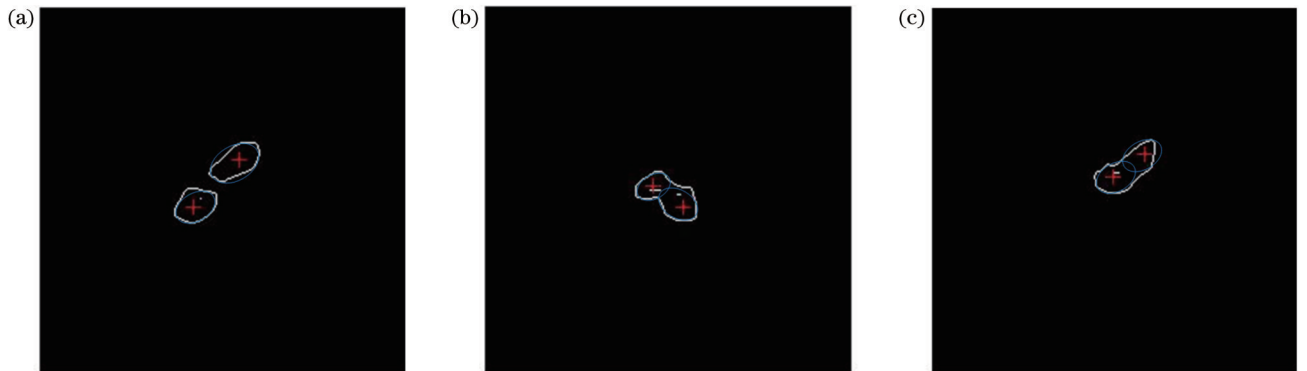


图 12 分割效果。(a)无重叠;(b)较少重叠;(c)较多重叠

Fig. 12 Split effect. (a) No overlap; (b) less overlap; (c) more overlap

表 2 实际中心坐标位置和所提算法分割后中心坐标位置的对比结果

Table 2 Comparison results of the actual central coordinate position and the central coordinate position after segmentation by the proposed algorithm

Light spot	Ideal	After segmentation	Position error
Light spots in Fig. 12(a)	(106.97, 140.71)	(108.35, 139.84)	(1.38, 0.87)
	(139.94, 107.39)	(139.59, 107.50)	(0.35, 0.11)
Light spots in Fig. 12(b)	(148.29, 105.67)	(149.05, 103.22)	(0.76, 2.45)
	(124.03, 118.83)	(126.70, 119.05)	(2.67, 0.22)
Light spots in Fig. 12(c)	(118.59, 126.42)	(118.41, 126.23)	(0.18, 0.19)
	(140.30, 141.15)	(139.35, 141.43)	(0.95, 0.28)

像数据按照 R_{overlap} 值划分成三组。图 13 是多次实验的平均结果柱状图。多次统计计算结果显示:当光斑无重叠时,光斑中心位置的定位标准差不超过 0.1 pixel;在光斑存在重叠的情况下,光斑中心位置的定位标准差维持在 0.5 pixel 以下。两个光斑的 R_{overlap} 越小,则稳定性越好;不重叠光斑的稳定性整体优于重叠光斑,因此所提算法在重叠光斑的分离方面具有很好的效果。

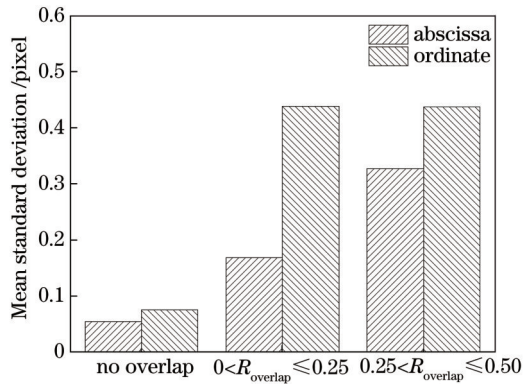


图 13 平均标准差柱状图
Fig. 13 Histogram of mean standard deviation

5 结 论

针对无线光通信 APT 系统,提出了利用多个反射镜进行光束对准的系统架构,并对基于两个二维反射镜的反射光斑对准控制方法展开研究。针对二维反射镜到接收天线的对准控制,建立了单探测器多执行器的跟踪控制策略,引入了滤光片转盘模块,通过给反射光斑施加频率扰动的方式实现了对相机探测面上双光斑的辨别,并以探测面双光斑的重叠情况作为判别光斑对准的依据。对于存在偏移的重叠双光斑图像,设计了多光斑/重叠光斑中心提取方法,利用形状因子对边缘提取之后的二值化图像进行重叠光斑的判断;然后基于最小二乘法椭圆拟合的二次重叠光斑分割;对无重叠、较少重叠以及较多重叠三种情况下的光斑图像开展了分割实验。在光斑重叠的场景下,光斑中心定位与实际位置的标准差维持在 0.5 pixel 以下,因此所提算法在重叠光斑的分离方面具有很好的效果。

参 考 文 献

- [1] Borah D K, Voelz D G. Pointing error effects on free-space optical communication links in the presence of atmospheric turbulence[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(18): 3965-3973.
- [2] Ricklin J C, Davidson F M. Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implications for free-space laser communication[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2002, 19(9): 1794-1802.
- [3] Ke X Z, Jing Y K. Far-field laser spot image detection for use under atmospheric turbulence[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(1): 016103.
- [4] Kaymak Y, Rojas-Cessa R, Feng J H, et al. A survey on acquisition, tracking, and pointing mechanisms for mobile free-space optical communications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(2): 1104-1123.
- [5] Al-Akkoumi M K, Refai H, Sluss J J, Jr. A tracking system for mobile FSO[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6877: 68770O.
- [6] Bai Y, Zhuang H Q, Roth Z S. Fuzzy logic control to suppress noises and coupling effects in a laser tracking system[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, 13(1): 113-121.
- [7] Zhu W, Bian L X, An Y, et al. Modeling and control of a two-axis fast steering mirror with piezoelectric stack actuators for laser beam tracking[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(7): 075014.
- [8] Ke X Z, Liang H L. Airborne laser communication system with automated tracking[J]. *International Journal of Optics*, 2021, 2021: 1-8.
- [9] Ke X Z, Zhang P. Automatic focusing control in beaconless APT system[J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2020, 41(1): 61-71.
- [10] Ishola F, Cho M. Experimental study on photodiode array sensor aided MEMS fine steering mirror control for laser communication platforms[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 100197-100207.
- [11] Zahradnik P, Šimák B, Pintér E. Two-dimensional Non-MEMS pointing mirror for free space communication[C]// *Proceedings of 15th International Conference MECHATRONIKA*, December 5-7, 2012, Prague, Czech Republic. New York: IEEE Press, 2012.
- [12] 杨尚君, 柯熙政, 吴加丽, 等. 利用二维反射镜实现无线光通信快速对准[J]. *中国激光*, 2022, 49(11): 1106001.
- [12] Yang S J, Ke X Z, Wu J L, et al. Fast alignment of wireless optical communication using two-dimensional mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(11): 1106001.
- [13] Yang S J, Ke X Z. Experimental study on adaptive optical wavefront correction with dual mirrors in free space optical communication[J]. *Optik*, 2021, 242: 167146.
- [14] 吴加丽, 柯熙政, 杨尚君, 等. 多维耦合器校正空间光-单模光

- 纤耦合对准误差[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0706003.
- Wu J L, Ke X Z, Yang S J, et al. Correction of alignment error in coupling space light into single-mode fiber by multi-dimensional coupler[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0706003.
- [15] Pokorny P. One-mirror and two-mirror three-dimensional optical scanners: position and accuracy of laser beam spot[J]. Applied Optics, 2014, 53(12): 2730-2740.
- [16] Zhou G Q, Chu X X, Zhao L H. Propagation characteristics of TM Gaussian beam[J]. Optics & Laser Technology, 2005, 37(6): 470-474.
- [17] Huynh T H, Pham T A, Yoo M. Detection algorithm for overlapping LEDs in vehicular visible light communication system[J]. IEEE Access, 2019, 7: 109945-109955.
- [18] Zafari S, Eerola T, Sampo J, et al. Segmentation of overlapping elliptical objects in silhouette images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(12): 5942-5952.
- [19] Zhang W J, Li H Q. Automated segmentation of overlapped nuclei using concave point detection and segment grouping[J]. Pattern Recognition, 2017, 71: 349-360.

Beam Alignment for Wireless Optical Communications Using Dual-Reflector Control

Ke Xizheng^{1,2,3*}, Zhao Jin¹

¹*School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;*

²*Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710048, Shaanxi, China;*

³*School of Physics and Telecommunication Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China*

Abstract

Objective Atmospheric turbulence limits the accuracy of data return and position adjustment over long distances, resulting in significant uncertainty in the long-axis beam tracking phase. With two-dimensional (2D) reflectors for beam tracking, the receiver does not need to transmit data back to the transmitter, but instead carries out short-axis tracking from the 2D reflector to the receiving antenna, which is convenient and less affected by the environment. At long distances, the laser beam passes from the transmitter to the 2D reflector with a significant beam expansion effect. In a 2D mirror-assisted acquisition pointing and tracking (APT) system, the difference from the conventional long-axis follow-through at the transceiver end is the need for short-axis follow-through from the 2D mirror to the receiver end. In the alignment control stage, the spot control needs to be maintained within the effective range of the detector. The detector target surface at the receiving end detects the offset information of the reflected light spot, and controls the servo mechanism through the tracking controller to adjust the optical axis of the reflected beam from the 2D mirror, so that the reflected beam pointing is adjusted. The diffused spot can completely cover the entire 2D mirror, but the laser beam reflected by a single 2D mirror is limited by the size of the mirror, and can only be reflected for the part of the beam that is diffused over a long distance. To improve alignment efficiency and optical energy utilization, we conduct a study on the employment of dual mirrors to control beam alignment for wireless optical communications.

Methods In the alignment control of the 2D reflectors to the receiving antenna, a single-detector multi-actuator tracking control strategy is proposed. We use multiple 2D mirrors for beam tracking control. Multiple 2D mirrors are equivalent to one large mirror that can increase the reflection area. To distinguish the double-reflected light spot on the detection surface, a filter disc is inserted in the optical path between the reflector and the receiving end, and the filter, rotation is achieved by rotating the corresponding discs through motor control. When the attenuation filters on the two optical paths rotate at different speeds, the two beams of light at consecutive times will appear as two beams of light and dark alternating with different frequencies on the detecting surface, thus distinguishing the two light spots. We design and study a double-reflected spot identification and tracking control method for double-spot detection in the case of overlapping reflected spots. For the overlapping double-spot images with offset, a multi-spot/overlapping spot center extraction method is designed, and the binarised image after edge extraction is adopted to judge the overlapping spots by the shape factor. Then the spot image is segmented by quadratic overlapping spot segmentation based on least squares ellipse fitting, and segmentation is conducted for three cases of no overlapping, less overlapping, and more overlapping.

Results and Discussions A system architecture employing multiple reflectors for beam alignment is proposed for wireless optical communication APT system, and a reflective spot alignment control method based on two 2D reflectors is

investigated (Fig. 1). The structure is simple and low-cost compared to the multi-transmitter-multi-receiver wireless optical communication system. By introducing a filter carousel module and applying different frequency perturbations to the reflected beams separately, a method for the discrimination and tracking control of double-reflected spots is designed and investigated for the double-spot detection in the case of overlapping reflected spots (Fig. 2). The images of the two reflected beams received on the detection surface will differ depending on the rotation period of the filter disc (Fig. 4). The higher the rotational speed of the discs, the smaller the rotational period, the more times the reflected beams are captured per unit of time, and the greater the total light intensity value on the detection surface at the corresponding moment. When the two discs are controlled to rotate at different speeds, there will be a difference in the number of bright spots captured on the detection surface per unit of time. Therefore, by observing the number of bright spots captured on the detection surface per unit of time, it is possible to achieve the purpose of distinguishing between two spots within the field of view of the camera at the receiving end.

Conclusions After many statistical calculations, the standard deviation of the positioning of the spot center position does not exceed 0.2 pixel when there is no overlap of the spots, and the standard deviation of the positioning of the spot center position stays below 0.5 pixel when there is overlap of the spots. The smaller the degree of overlapping R_{overlap} of the two spot images, the better the stability, and the stability of the non-overlapping spot is better than that of the overlapping spots as a whole, so the proposed algorithm has good effect on the separation of overlapping spots.

Key words wireless optical communication; two-dimensional reflector; double-spot overlap detection; beam alignment