

5.2 km 距离无线激光通信跟踪实验

柯熙政, 严希, 杨雅淇, 胡欣

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘要: 为了实现远距离通信下, 湍流大气中传输时光束的跟踪, 设计了光斑跟踪系统; 对该系统的硬件结构、工作原理、系统跟踪控制算法及光斑图像处理算法进行了研究, 首先, 根据系统硬件构成及控制算法实用性, 选择采用 PI 算法作为系统的跟踪控制算法, 接着, 为了提高在光斑图像处理方面算法的运算速度, 选择采用改进的中值滤波算法来对系统所采集到的光斑图像进行处理, 然后, 在阈值分割方面, 为了获取更加精确的光斑灰度图像, 系统采用迭代法来选择阈值, 进而对图像进行阈值分割, 最后, 采用该系统进行了 5.2 km 的光斑跟踪实验, 并对实验结果进行分析; 实验结果表明, 本系统可以有效的对湍流大气中的光斑进行跟踪, 跟踪精度可达 $5.4 \mu\text{rad}$, 基本符合空间激光通信系统对跟踪系统的要求。

关键词: 光斑跟踪系统; PI 算法; 中值滤波算法; 跟踪精度

5.2 km Distance Wireless Laser Communication Tracking Experiment

Ke Xizheng, Yan Xi, Yang Yaqi, Hu Xin

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

Abstract: For the problem of laser spot detection in the turbulent atmosphere in the case of Long distance communication, a laser spot tracking system is designed, The system's hardware structure, working principle, system tracking control algorithm and optical spot image processing algorithm are studied. First, according to the system hardware structure and the practicability of the control algorithm, the PI algorithm is selected as the tracking control algorithm of the system. Then, in order to improve the speed of algorithm in the spot image processing, we choose the improved median filter algorithm to process the spot image collected by the system. Then, in terms of threshold segmentation, in order to get more accurate grayscale images, the system uses iterative method to select the threshold, and then thresholds the image. finally, the laser spot tracking experiment of 5.2 km is carried out with this system, and the results of the experiment are analyzed, the experimental results show that the system can track the light spot steadily, and the tracking precision can reach $5.4 \mu\text{rad}$, it meets the requirements of the space laser communication system for the tracking system.

Keywords: laser spot tracking system; PI algorithm; median filter algorithm; tracking precision

0 引言

无线激光通信中捕获、对准和跟踪 (acquisition, pointing and tracking, APT) 系统已被广泛应用于许多工业、军事和商业中。在无线激光通信系统中, APT 技术是成功建立并持续保持通信链路的关键^[1-2]。因此, 研究无线激光通信系统中的 APT 技术意义重大。APT 技术是一种光—机—电一体化的技术, 其主要任务就是自动、有效、快速的建立激光通信链路, 并且维持通信链路的长久、持续以及稳定。APT 系统由捕获机构、精跟踪机构、光学机构、探测器以及伺服控制机构组成。

在实际的激光通信系统设计中, 通常 APT 系统需要将

捕获阶段的探测单元设计为大视场, 跟踪阶段的伺服控制单元设计为高带宽、高精度。目前, 相关研究机构通常使用的策略是将工作过程划分成粗跟踪和精跟踪两个阶段。粗跟踪部分一般采用较大视场角的探测设备, 负责对入射激光信标光进行捕获, 进而引入精跟踪视场, 对出射光束进行低精度指向。精跟踪部分的工作则是在粗跟踪部分工作完成之后, 其任务是进一步减小系统的跟踪残差, 缩小光束的抖动范围。

2005 年, 艾勇等^[3]在 APT 技术方面完成脱离计算机下的独立 DSP 板控制复合轴伺服系统, 并完成空间目标自动扫描搜索与跟踪试验, 跟踪精度可达到 $1 \mu\text{rad}$, 跟踪带宽可达 200 Hz。2010 年, 佟首峰等^[4]针对四象限探测器的特点, 使用两级增益放大、数字信号处理 (digital signal processing, DSP) 振镜, 完成光斑实时检测与跟踪, 跟踪精度为 $2.1 \mu\text{rad}$ 。2016 年, 董冉等^[5]为了解决自由空间光通信对 APT 系统的高精度高带宽要求, 设计研制了一种精跟踪系统。该系统以高帧频 CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 相机为探测机构, 以音圈电机驱动的 FSM

收稿日期: 2018-04-20; 修回日期: 2018-05-23。

基金项目: 国家自然科学基金(61377080); 江苏省省级前瞻性研究专项资金(第三批)项目资助(BE2013088); 国家科技创新计划(13C26213201857)。

作者简介: 柯熙政(1962-), 男, 陕西临潼人, 教授, 博士生导师, 主要从事自由空间光通信方向的研究。

(fast steering mirror) 为执行机构, 由计算机进行控制和运算。进行了通信距离为 2 km 的激光通信实验, 结果表明, 粗、精跟踪系统联合能将光斑偏移量的标准差稳定在 $6 \mu\text{rad}$ 以内。2016 年, 赵馨等^[6]对 APT 系统的组成原理、系统设计、工程实现进行了研究。在此基础上开展室内模拟实验及野外演示验证实验, 室内模拟实验跟踪精度达到 $2 \sim 3 \mu\text{rad}$, 野外两端动态演示实验在飞艇与船舶间进行, 跟踪精度可达 $5 \sim 25 \mu\text{rad}$ 。

本文研制了一种基于 PC 机的精跟踪系统, 实现对远场光斑地实时跟踪, 采用有效的数字式控制器来对系统进行调节控制, 通过相关的图像处理技术来抑制噪声的干扰。最后, 采用该系统进行了 5.2 km 的光斑跟踪实验, 并对实验结果进行了分析。

1 跟踪系统硬件结构

空间光通信 APT 跟踪结构如图 1 所示, 硬件结构可分为探测单元、控制单元、执行单元、辅助通信单元 4 个部分。探测单元采用的是维视图像公司的 MV-EM200 型 CCD 相机, 其最大分辨率为 $1\,600 \times 1\,200$, 有效像素为 200 万, 像素尺寸为 $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$, 帧频最高可达 10 帧/秒, 该工业相机具有高分辨率、高清晰度、色彩还原好、低噪声等优点。控制单元为两台 PC 机, 控制单元是整个精跟踪系统的大脑, 调节、控制着整个系统的工作运转。一般采用快速倾斜镜或者伺服电机作为系统执行单元, 由于本系统在整体设计上需要用执行单元带动光学系统进行俯仰方向和方位方向上的偏转, 故选用伺服电机作为系统的执行单元。本系统执行单元采用的是高精度二维瞄准云台, 其机械摆角在方位方向为 ± 360 度, 俯仰方向为 ± 60 度, 角度分辨率为 0.001 度。辅助通信单元的作用就是将一端采集到的误差数据通过射频通信的方式传输给另一端, 以实现系统的闭环跟踪控制, 辅助通信单元采用的是正点原子公司的 ATK-SIM800C 射频通信模块。

激光束从发射端经发射天线发射出去, 聚焦在接收端的标靶上。由 CCD 探测接收图像, 根据事先设计好的光斑检测算法, 进行光斑检测, 提取误差信号, 将误差信号通过射频通信单元反馈给控制单元, 驱动二维云台进行调整, 如此反复循环, 以使光斑图像始终保持在 CCD 视场的特定区域内, 达到跟踪对准的目的。

2 数字式控制器设计

在本系统中, 伺服控制系统主要包括有中枢控制计算机、数字式控制器、伺服驱动机构、反馈控制机构以及伺服电机等部分。本系统中使用的伺服电动机是永磁式交流伺服电机。编码器在装配上与伺服电机的转轴同轴连接, 用于实时地检测伺服电机的转动位置。精跟踪探测器用来探测光束的传输方向, 进而得到系统的反馈误差信号, 对系统进行闭环控制。

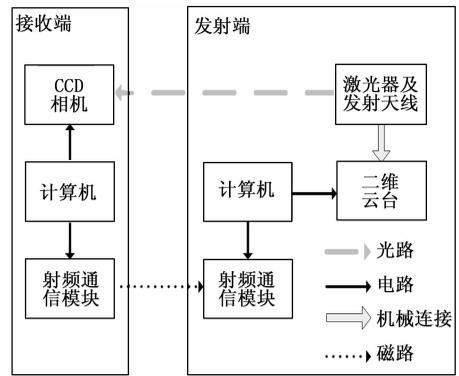


图 1 光斑跟踪实验系统

伺服控制系统通常要具备高精度、高稳定性、快速响应的特点, 但要满足这些要求, 一般又不能面面俱到。一般应根据具体情况, 进行有效地补偿、校正以及调节, 使整个伺服系统具备优良的动、静态特性。目前在这方面, 采用数字控制的方法是最常见的, 同时该方法也相对比较成熟、完善。因此, 在本系统中通过数字式控制器来对伺服电机在方位方向和俯仰方向上的转动进行调节、控制, 以使转台伺服系统在运转上拥有较好的精确度、可靠性以及稳定性。

数字式控制器的本质是数学算法, 是将伺服电机的控制算法通过计算机语言编写进控制软件中, 进而通过操作控制软件来达到对伺服电机精确、稳定控制的目的。目前在伺服电机控制中, 大多采用的是 PID 算法作为系统的数字式控制器。PID 算法控制有着计算简单、调整方便的优点, 也因此一直被各个研究机构广泛应用着。当被控对象结构、性能、参数等不明确, 或者数学模型的表达式不能确定时, 此时通过 PID 控制技术来确定系统控制器的结构与参数最为方便。

在本系统中, 为了实现无静差, 在前向通路设置积分环节。由于系统输入的高频噪声较大, 且系统跟踪的光束漂移变化速率较慢, 故在控制器中不引入微分环节。系统最终选择 PI 算法作为数字式控制器对伺服电机的控制进行调。

计算机是一种采样控制系统, 系统根据采样时刻输入与给定之间的差值进行控制。故将模拟 PI 算法进行离散化设计^[7], 离散化公式如下:

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) \right] \quad (1)$$

式中, T 为采样周期, K_p 为比例系数, T_i 为积分时间常数。

通过计算机进行数字式控制器设计时, 还需要进行数据输入、输出及计算的工作, 这些步骤都需要损耗一定时间, 这样就会造成控制算法的控制作用出现延迟的问题。因此, 必须对传统 PI 算法进行改进。本数字式控制器采用变速积分算法对系统的控制进行优化。

设置一个系数 $f[e(k)]$, 它是 $e(k)$ 的一个函数, 该函数的表达式如公式 (2) 所示:

$$f[e(k)] = \begin{cases} 1 & |e(k)| < B \\ \frac{A - |e(k)| + B}{A} & |e(k)| < B \\ 0 & B \leq |e(k)| < A + B \\ & |e(k)| > A + B \end{cases} \quad (2)$$

式中, A 、 B 是偏差 $e(k)$ 的上界和下界。

每次采样后将 $f[e(k)]$ 和 $e(k)$ 相乘。

原积分项:

$$u_i(k) = K_p \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i) \quad (3)$$

变速积分的积分项:

$$u_i(k) = K_p \frac{T}{T_i} \left[\sum_{i=1}^{k-1} e(i) + f(e(k))e(k) \right] \quad (4)$$

变速积分 PI 算法相比于标准 PI 算法, 有着诸多优点。

具体如下:

- 1) 完全消除了积分饱和现象;
- 2) 大大减小了超调量;
- 3) 适应能力强;
- 4) 参数整定容易, 对于 A 、 B 两参数的取值不用太精确, 可进行一次性确定。

当系统频繁的进行控制时很有可能会引起系统振荡, 为了克服由于控制动作过于频繁而带来的系统振荡, 在保证信号光路畅通, 接收信号强度满足探测要求的情况下, 系统允许一定的稳态误差 $e(k)$, 当 $e(k)$ 很小时, 可以不采取控制措施。如此, 就可以克服执行单元动作过于频繁而产生的磨损。引入非线性环节 $F(k)$, 令其输出为:

$$F(k) = \begin{cases} e(k) & |e(k)| > C \\ 0 & |e(k)| \leq C \end{cases} \quad (5)$$

其中: C 为死区阈值。

3 光斑图像处理

在无线激光通信中, 由于受到大气湍流与平台振动的干扰, 在无抗干扰措施的情况下, 光束无法持续对准接收端天线, 这就使得通信链路无法维持长时间的畅通, 也就是通信链路很容易发生中断。为了保证通信链路的始终不会因为各种干扰而发生中断, 跟踪系统探测单元必须要能够实时、精确的确定目标光斑的位置信息, 进而获取到该目标光斑的偏差数据, 然后通过控制单元与执行单元对这个偏差进行消除。因此, 目标光斑位置的精确探测是无线激光通信具有可靠性、稳定性的基础。由于 CCD 相机采集到的原始光斑图像受到大气湍流、环境噪声等的影响, 使得图像质量非常不理想, 严重影响到整个的跟踪系统跟踪精度的提高, 所以必须对采集到的原始光斑图像进行

处理。

在本系统中, 先要对采集到的光斑图像进行直方图均衡化处理, 然后通过一种改进的中值滤波算法来抑制图像噪声, 再通过自适应阈值分割处理将图像中所有像素分割为光斑和背景两部分。针对二值化后的图像, 还需要进一步进行光斑的外边缘提取, 本系统采用经典的 Canny 边缘检测算法来对所采集的光斑图像进行边缘提取, 然后对提取的光斑的外边缘进行标准圆拟合, 从而得到一个标准的圆形光斑边缘, 最后对该圆形光斑边缘进行区域填充的形态学运算。

所谓直方图均衡化处理就是将原始图像直方图的灰度中较集中的灰度区域转变为能在全部灰度范围分布的技术。实际上就是将图像通过非线性拉伸, 然后重新将图像像素值进行分配, 目的就是使特定灰度区域的像素数量基本一致。直方图均衡化就是经过一种灰度值映射关系将原始图像转化为每个灰度级都存在基本一致的像素数的输出图像。通过均衡化处理后的图像, 像素级别要尽可能的多, 且每个灰度级尽量均匀分布。因此, 处理后的图像会拥有很强的对比度以及较大的动态范围

中值滤波是为了减小图像中加性噪声的影响, 提高图像的质量。对于本系统来说, CCD 相机采集到的原始光斑图像, 光照引起的散斑和 CCD 相机的内部随机噪声是检测系统噪声的主要来源。此外, 为了满足检测系统的实时性, 算法必须具有很快的处理速度。噪声滤除实际上是低通滤波的过程, 即不让高频的噪声信号通过。需要注意的是, 由于图像细节部分与噪声一样, 也处在信号的高频部分, 所以滤波算法会模糊图像的细节部分。一个较好的去噪方法, 要在保证图像细节不变模糊的前提下, 来尽量消除噪声对图像的影响。因此, 图像处理过程中选择中值滤波算法。

中值滤波本质上是一种统计排序滤波器^[9]。对于一个 $n \times n$ 方形窗口的中值滤波器, 一次排序就需要 $n^2(n^2 - 1)/2$ 次比较运算。要处理本系统中的图像, 所需时间很长。因此, 本文采用一种优化的中值滤波方案, 不仅大大提高了其运算速度, 而且易于软件的实现。

本系统中选用滤波窗口的大小为 3×3 。具体方法是: 求出窗口中各列像素灰度值的中值, 之后将中间一行的中值作为计算结果, 如图 2 所示。

对于原来的 $n \times n$ 大小的二维阵列, 改进后的算法可使其简化为 $n+1$ 个含有 n 个像素的一维阵列。从而同样的窗口进行一次运算需要的次数为 $n(n^2 - 1)/2$, 减少为原来的 $\frac{1}{n}$, 大大提高了运算速度。

图像阈值分割在图像处理方面应用的比较广泛, 同样也是一种比较成熟的技术, 由于图像中的目标区域和其背景在灰度值上差异很大, 于是将图像看作是两种不同灰度

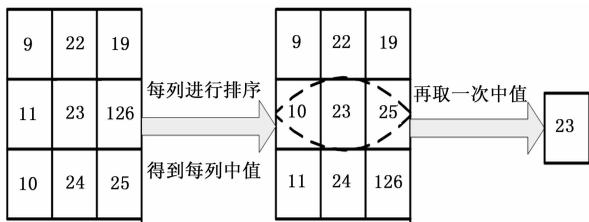


图 2 改进的中值滤波

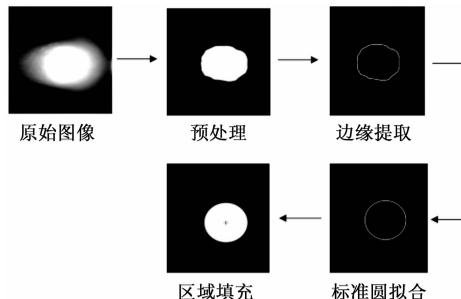


图 3 光斑图像处理

级的区域的拼接，即分为目标区域和背景区域，为图像选择一个合适的阈值，然后分别出图像中每个像素对应的是目标区域还是背景区域，最终生成一个相应的二值图像。

阈值分割的目的是把图像中所有像素划分为两部分——光斑和背景^[10-11]。这里采用的是迭代法选择阈值的方法。具体实现步骤如下：

- 1) 扫描图像，计算出最大、最小灰度，并计算出两者的平均值作为初始阈值 T 。
- 2) 利用阈值 T 将图像分为两个区域 R_1, R_2 。
- 3) 对区域 R_1, R_2 中的所有像素计算平均灰度值 u_1, u_2 。
- 4) 计算新的阈值： $T = \frac{1}{2}(u_1 + u_2)$ 。
- 5) 重复步骤 2~4，直到逐次迭代所得的 T 值与上次计算的 T 值相同为止。

得到阈值 T 后，再进行二值化处理，二值化阈值变换的函数表达式如下：

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < T \\ 255 & x \geq T \end{cases} \quad (6)$$

其中： x 为原始灰度值， T 为之前用迭代法求出的阈值。

本系统采用 Canny 边缘检测算法来对所采集的光斑图像进行边缘提取，Canny 边缘检测算法在计算过程中其最终的目的是确定数字图像灰度值变化的梯度最大量，提取到光斑的边缘后，得到一个非规则的圆，圆拟合算法根据最小二乘原理用圆来逼近激光光斑轮廓，可以计算出标准圆的圆心和半径。从而得到一个标准的圆形光斑边缘，最后对该圆形光斑边缘进行区域填充的形态学运算，从而从目标光斑中提取对表达和描绘区域形状有意义的图像。

放置一滤光片，由于本实验激光束波长为 650 nm，故使用 650 nm 的带通滤光片。

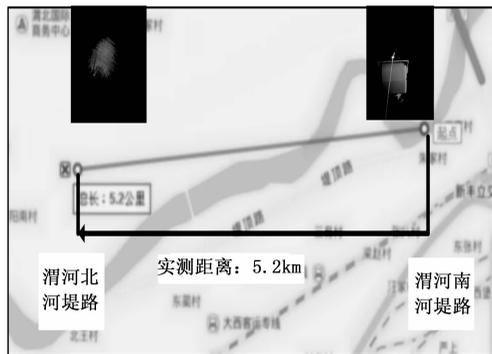


图 4 实验场地

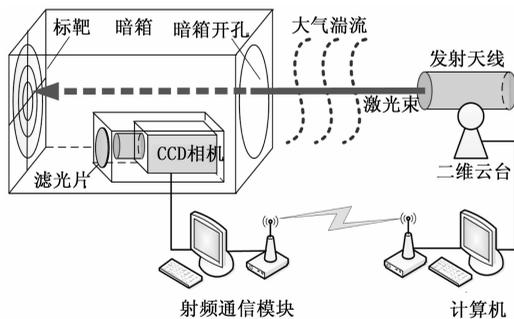


图 5 光斑跟踪实验

4 光斑跟踪实验

本次实验的测试日期为 2017 年 12 月 5 日下午 6 时至 2017 年 12 月 6 日上午 6 时（晴朗微风，辅助通信信号良好）。实验场地如图 4 所示，发送端位于渭河南河堤路，接收端位于渭河北河堤路，两端直线距离约为 5.2 km。

在渭河北河堤路的实验接收端放置实验标靶；在标靶前方放置 CCD 相机对标靶上光斑目标进行检测。图 5 为实验方案，为了消除背景光对 CCD 相机的干扰，相机镜头前

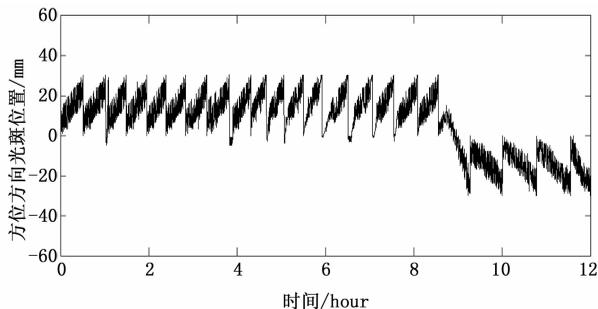


图 6 方位方向光斑跟踪曲线

本次精跟踪实验设定的跟踪阈值为 30 mm，对应于发送端的调整步长为 5.4 μrad 。实验所测光斑数据如图 6 和图 8 所示，图 6 为方位方向光斑位置的飘移情况，在实验的 12

小时内光斑共有 23 次飘出阈值, 跟踪系统对其进行了 23 次调整, 每次调整之后均能回到零点位置, 其中在方位方向的正向上有 18 次飘出阈值, 在负向上有 5 次飘出阈值。在整个跟踪过程中, 光斑飘移的整体趋势可以分成 3 个阶段, 第一个阶段是实验的前 8.5 小时, 在这个阶段, 光斑飘移的整体趋势为方位方向正向, 且有 18 次飘出阈值, 其中分别在实验的 1 时、4 时以及 6.5 时光斑存在负向的飘移, 这是因为实验期间, 存在杂散光及调试系统时人为抖动的影响, 第二个阶段是 8.5 时至 9.5 时, 这个阶段光斑先向方位方向正向飘移至 10 mm 左右, 然后开始向方位方向负向飘移, 大概在 9.5 时飘移至方位方向负向阈值处, 第三个阶段是 9.5~12 时, 在这个阶段, 光斑飘移的整体趋势为方位方向负向, 有 5 次飘出阈值。图 7 是对所采集的数据进行处理后的结果, 在整个跟踪过程中误差均值为 6.5239 mm, 光斑抖动的标准差为 14.3531 mm。图 8 为俯仰方向光斑位置的飘移情况, 在实验的 12 小时内光斑共有 14 次飘出阈值, 跟踪系统对其进行了 14 次调整, 每次调整之后均能回到零点位置, 并且光斑飘移的整体趋势为俯仰方向正向。图 9 是对所采集的数据进行处理后的结果, 在整个跟踪过程中误差均值为 14.3078 mm, 光斑抖动的标准差为 6.5477 mm。

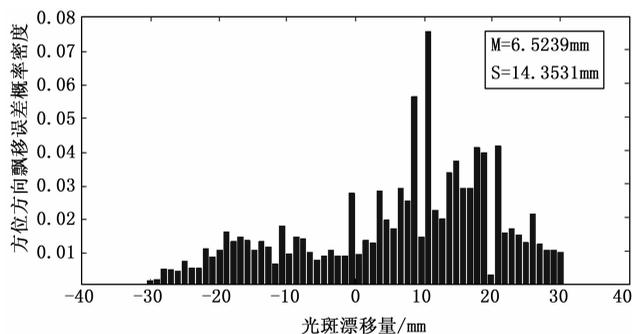


图 7 方位方向光斑位置误差统计

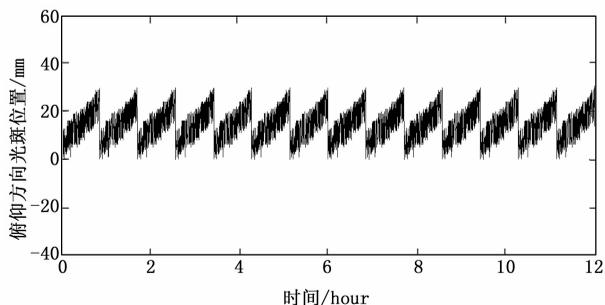


图 8 俯仰方向光斑跟踪曲线

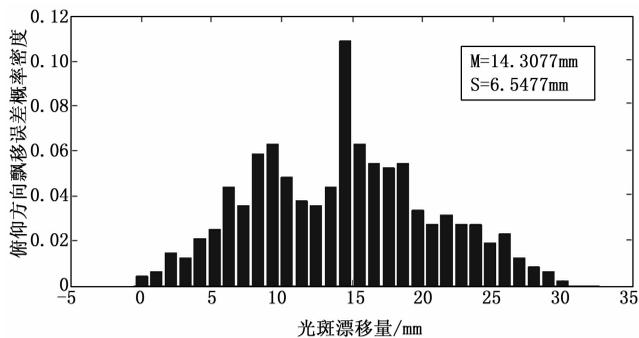


图 9 俯仰方向光斑位置误差统计

跟踪, 系统根据自身硬件设备和所处的实验环境的特点采用改进的 PI 算法作为数字式控制器来进行调节控制, 并通过改进的中值滤波算法来抑制跟踪过程中噪声的干扰, 再通过阈值分割、边缘检测、标准圆拟合以及区域填充等处理得到一个比较理想的目标光斑。最后在野外进行了 5.2 km 的光斑跟踪实验, 并对实验结果进行了分析。结果表明, 该系统可以有效的对湍流大气中的光斑进行跟踪, 系统跟踪精度可达 $5.4 \mu\text{rad}$, 符合空间激光通信系统对跟踪系统的的要求。此研究为大气激光通信 APT 系统的对准与跟踪提供了可靠的检测依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Tong Shoufeng, Zhao Xin. Modeling of fine tracking sensor for free space laser communication system [J]. IEEE, 2016, 978 (1): 441-445.
- [3] 艾勇. 空间光束实时捕获、跟踪实验与分析 [J]. 光子学报, 2005, 34 (6): 944-946.
- [4] 佟首峰, 刘云清, 姜会林. 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): 1757-1760.
- [5] 董冉, 肖永军, 单欣. 自由空间光通信跟踪系统设计及其通信实验 [J]. 红外与激光工程, 2016, 41 (10): 2719-2722.
- [6] 赵馨, 宋岩松, 佟首峰. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验 [J]. 中国激光, 2016, 41 (3): 125-130.
- [7] 卢宁, 柯熙政, 张华. 自由空间激光通信中 APT 粗跟踪研究 [J]. 红外与激光工程, 2010, 05: 943-949.
- [8] 马艳芳. 空间光通信 APT 光斑检测算法研究 [J]. 数字技术与应用, 2017, 11 (2): 115-116.
- [9] 刘杏双. 基于无信标光 APT 系统捕获性能分析 [J]. 现代电子技术, 2017, 7 (4): 20-23.
- [10] 王志淋, 李新明. 跟踪与数据中继卫星系统资源调度优化问题 [J]. 中国空间科学技术, 2017, 35 (1): 36-42.
- [11] 王春阳, 李金刚. 激光光斑漂移的检测 [J]. 应用光学, 2017, 28 (2): 206-208.

5 结论

APT 系统一直是空间光通信系统能否取得成功的关键, 本文设计了一套光斑跟踪系统, 用于对远场光斑进行实时