

## 空间激光通信中精跟踪系统的实现与优化

陈少杰<sup>1,2</sup>, 张亮<sup>1</sup>, 吴金才<sup>1</sup>, 李长昆<sup>1</sup>, 王建宇<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 简述了空间激光通信中精跟踪系统的组成和控制结构, 分析了捕获、跟踪、瞄准系统精跟踪探测器使用质心算法进行信标光斑定位时的误差来源, 对精跟踪探测器信标光斑定位过程进行傅里叶频域分析. 推导得到消除质心算法系统误差的理论方案, 即信标光波长和精跟踪系统的 F 数乘积需大于精跟踪探测器的像元尺寸. 分析了精跟踪系统实现过程中关键参数的选取过程, 结合精跟踪系统的系统参数耦合关系, 为了不损失精跟踪视场, 在精跟踪探测器镜头前添加孔径光阑进行精跟踪系统优化, 以消除精跟踪探测器光斑定位时的系统误差. 理论计算和实验证明: 当孔径光阑的直径小于 9.32 mm 时, 精跟踪系统的相对孔径小于 0.045, 精跟踪误差仅为 0.03 pixel, 相比优化前的精跟踪系统, 跟踪精度提高了 1.9 倍.

**关键词:** 光通信; 捕获、跟踪、瞄准; 定位精度; 质心算法; 系统误差

**中图分类号:** TN929.1 **文献标识码:** A

## Realization and optimization of fine tracking system of free space laser communication

CHEN Shao-Jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Liang<sup>1</sup>, WU Jin-Cai<sup>1</sup>, LI Chang-Kun<sup>1</sup>, WANG Jian-Yu<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The composition and control structure of fine tracking system of free space laser communication are briefly described. The error sources of the beacon positioning of fine tracking detector using centroid algorithm of the acquisition, tracking and pointing system are analyzed. And the Fourier frequency domain of the beacon positioning process of fine tracking detector is analyzed too. The theoretical scheme for eliminating the systematic error of centroid algorithm is derived, that is, the product of the beacon light wavelength and the F number of the fine tracking system need to be larger than the pixel size of the fine tracking detector. The selection process of the key parameters in the implementation of the fine tracking system is analyzed, and considering the coupling relation of system parameters of fine tracking system, in order not to lose fine tracking field of view, the optimization of fine tracking system by adding aperture diaphragm before fine tracking detector lens is implemented for eliminating the systematic error of centroid algorithm. The theoretical calculation and experimental results show that when the aperture diameter is less than 9.32 mm, the relative aperture of the fine tracking system is less than 0.045, and the fine tracking error is only 0.03 pixel, and the tracking accuracy is improved by 1.9 times.

**Key words:** optical communications, acquisition, tracking, pointing, positioning accuracy, centroid algorithm, systematic error

**PACS:** 42.79.Sz

收稿日期: 2017-05-06, 修回日期: 2017-10-30

Received date: 2017-05-06, revised date: 2017-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(61302181)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61302181)

作者简介 (Biography): 陈少杰 (1990-), 男, 福建泉州人, 博士研究生, 主要从事光束精跟瞄方面的研究. E-mail: chenchenshaojie@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn

## 引言

空间激光通信具有速率高、终端小、保密性强等优势<sup>[1]</sup>,近年来得到了巨大的发展<sup>[2-3]</sup>.而由于使用束散角较小的激光进行通信,空间激光通信需要捕获、跟踪、瞄准(Acquisition, Tracking and Pointing, ATP)系统来建立和保持通信链路<sup>[4]</sup>.目前对于 ATP 系统的研究分为两个方面,一是轻小型化终端的研究,服务于低空紧急情况下的激光通信以及光通信的空间组网<sup>[5]</sup>;二是高鲁棒性、高精度系统的研究,应用于深空激光通信<sup>[6]</sup>、空间量子通信<sup>[7]</sup>等.本文主要研究后者.

跟踪精度是衡量 ATP 系统的重要指标,复合轴 ATP 系统的粗跟踪系统只是降低了精跟踪系统的输入误差,整个系统的最终跟踪精度由精跟踪系统决定<sup>[8]</sup>.典型的精跟踪系统组成和控制结构如图 1 所示,特定倍率的光学望远镜收集的信标光经过精跟踪执行机构快速反射镜后汇聚在精跟踪探测器上,粗跟踪残差和平台振动残差导致精跟踪探测器(CMOS 或 CCD)上的光斑飘动.精跟踪系统启动后,精跟踪探测器提取当前光斑的位置值,并计算出其与跟踪点之间的偏差,数字控制器根据这个偏差作闭环控制,输出数字量经过数模转换器转换成模拟量,再由驱动电路放大后驱动快速反射镜偏转一定的角度,实现将信标光斑稳定在跟踪点上.所以,精跟踪探测器对信标光斑的高精度定位是 ATP 系统实现高精度跟踪的基础.

ATP 系统中常用的光斑位置提取算法主要有形心算法和质心算法等,这些算法各有优缺点,其中质心算法精度高,稳定性好,计算处理时间短,得到广泛使用.文献[9]分析了基于质心算法的 CCD 测角精度与成像光斑弥散圆尺寸之间的关系,实验证明了 CCD 成像光斑相对尺寸在 2~3 之间为最佳;文献[10]从探测率和虚警率的角度分析了探测器像元大小对跟踪系统的影响,得出了跟踪系统的探测器像元尺寸选择的最优方案;文献[11]对比分析了阈值质心算法、窗口质心算法和基于光点模型的质心算法的光斑定位精度和算法鲁棒性,仿真结果表明基于光点模型的质心算法能实现 0.02 pixel ( $1\sigma$ ) 的光斑定位精度.

分析了基于质心算法的 ATP 系统光斑定位误差,阐述了质心算法的系统误差来源,对精跟踪探测器光斑定位过程进行频域分析,得出了消除光斑定

位质心算法系统误差的理论方案,并结合 ATP 系统精跟踪视场的需求,对设计完成的 ATP 系统的精跟踪系统进行优化,同时搭建了跟踪精度测试系统,对精跟踪系统优化前后的性能进行测试和对比评估.

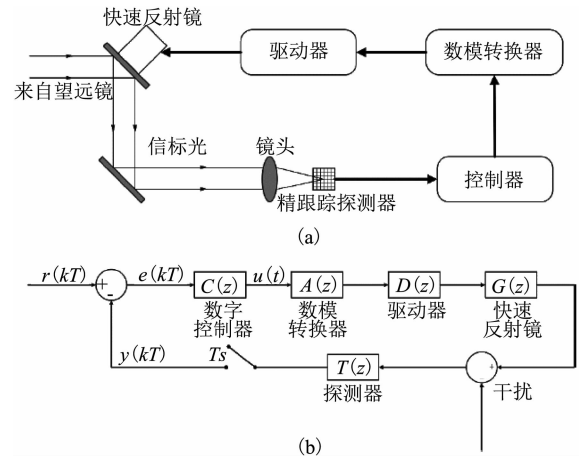


图 1 精跟踪系统(a)系统组成,(b)控制结构

Fig. 1 Fine tracking system (a) system composition, (b) control structure

## 1 质心算法误差分析

在空间 ATP 系统应用中,如图 2 所示,发射信标光源近似离空间终端接收光学系统的光阑无穷远,空间光学系统等效为夫琅禾费衍射系统,所以,汇聚在精跟踪探测器上的信标光斑能量可视为高斯分布,如图 3 所示,假设精跟踪探测器平面内信标光成像的实际质心位置为  $(x_c, y_c)$ ,该位置等效于像平面的能量重心,即

$$\begin{cases} x_c = \frac{\iint_{(x,y) \in S} x I_c(x,y) dx dy}{\iint_{(x,y) \in S} I_c(x,y) dx dy} \\ y_c = \frac{\iint_{(x,y) \in S} y I_c(x,y) dx dy}{\iint_{(x,y) \in S} I_c(x,y) dx dy} \end{cases}, \quad (1)$$

其中  $x, y$  分别为精跟踪探测器像平面的横纵坐标,  $S$  信标光斑的包含空间区域,  $I_c(x, y)$  为信标光斑在精跟踪探测器平面上的光强分布函数. 式(1)为空间域上的连续积分,而由于精跟踪探测器像元大小的有限性,精跟踪探测器得到的信标光斑图像为  $I_c(x, y)$  在像元位置的采样值,则精跟踪探测器计算所得的信标光斑质心位置为  $(x_D, y_D)$ , 即

$$\begin{cases} x_D = \frac{\sum_{k=1}^A x_k I_k}{\sum_{k=1}^A I_k} \\ y_D = \frac{\sum_{k=1}^A y_k I_k}{\sum_{k=1}^A I_k} \end{cases}, \quad (2)$$

其中  $A$  为探测器像元个数,  $(x_k, y_k)$  为探测器像元的几何中心坐标,  $I_k$  为第  $k$  个有效像素点的光强分布函数采样值. 利用像元的几何中心坐标代替实际的像元进行连续积分, 由于探测器像元尺寸不可能无限小,  $(x_k, y_k)$  的光强分布函数的平衡点很难精确的处在第  $k$  个像元的几何中心, 于是在精跟踪探测器使用质心算法进行信标光斑定位时存在系统误差.

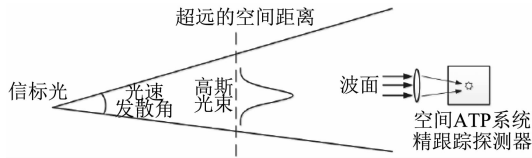


图2 空间光路示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of spatial light path

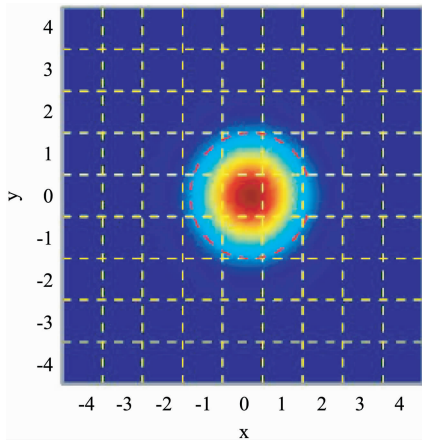


图3 精跟踪探测器上的信标光斑能量分布  
Fig. 3 The energy distribution of the beacon spot on the fine tracking detector

此外, 随机误差也会影响精跟踪探测器的光斑定位精度, 随机误差来源于光斑定位过程中外界环境噪声和精跟踪探测器自身噪声, 如 A/D 转换噪声、量化噪声、暗电流噪声、散粒噪声、电路噪声等, 随机误差对精跟踪探测器光斑定位精度的影响可用噪声等效角  $f_{NEA}$  来度量, 对于质心算法有:

$$f_{NEA} = \sqrt{\{S + N_p [V_{ar}(R_F) + \Delta t R_T] / S^2\} N(N+1) / 3}$$

$$, \quad (3)$$

其中  $S$  为信号强度;  $\Delta t$  为相机曝光时间;  $N$  为质心窗口的半峰全宽;  $N_p$  为质心窗口像素总数, 为  $(2N+1)2$ ;  $R_F$  为单个像素  $1\sigma$  固定噪声;  $V_{ar}(R_F)$  为固定噪声对应的等效噪声;  $R_T$  为单个像素上的背景信号 (含杂散光和暗电流)<sup>[11]</sup>. 使用改进型的质心算法能够抑制随机噪声, 提高光斑定位精度, 而在 ATP 系统中, 精跟踪系统的干扰抑制带宽一般要达到 100 Hz 以上, 精跟踪探测器帧频要达到 2 000 Hz 甚至更高<sup>[12]</sup>, 改进型的质心算法增加了复杂度, 使得算法的运行时间增长, 影响光斑定位的实时性, 难以满足精跟踪探测器的高帧频需求, 所以通过优化 ATP 光学参数, 来消除质心算法的系统误差, 从而提高精跟踪探测器的光斑定位精度成为切实可行的方案.

## 2 光斑定位的傅里叶频域分析

由于光斑定位过程中,  $x$  轴方向和  $y$  轴方向的对称性, 分析  $x$  轴方向的光斑定位过程,  $y$  轴方向同理. 当信标光汇聚在精跟踪探测器上, 如图 4 所示, 信标光斑像点能量分布函数  $I(x)$  与精跟踪探测器单个像元响应函数  $p(x)$  卷积得到像元接收能量函数  $f(x)$ , 其中  $I(x)$  服从高斯分布, 考虑精跟踪探测器像元填充率为 100%, 各像元响应函数相同, 为

$$p(x) = \begin{cases} 0, & x < -d/2 \\ 1/d, & -d/2 < x < d/2 \\ 0, & x > d/2 \end{cases}, \quad (4)$$

其中  $d$  为精跟踪探测器的像元尺寸, 则  $p(x)$  等效于矩形函数, 所以

$$f(x) = I(x) \otimes p(x) \quad . \quad (5)$$

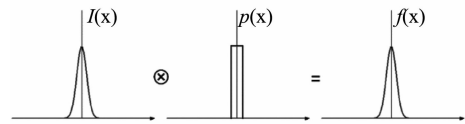


图4  $I(x)$  与  $p(x)$  卷积得到  $f(x)$   
Fig. 4  $I(x)$  and  $p(x)$  convolution to obtain  $f(x)$

像元接收能量函数  $f(x)$  再与精跟踪探测器的像元采样函数  $s(x)$  相乘得到  $g(x)$ , 如图 5 所示,  $g(x)$  即为精跟踪探测器得到的信标光斑的离散采样值, 而  $F(w)$ 、 $S(w)$ 、 $G(w)$  分别为  $f(x)$ 、 $s(x)$ 、 $g(x)$  的傅里叶变换, 则

$$\begin{cases} g(x) = f(x) \times s(x) \\ G(w) = F(w) \otimes S(w) \end{cases}, \quad (6)$$

其中,  $S_c$  为精跟踪探测器镜头调制传递函数的空间

截止频率.

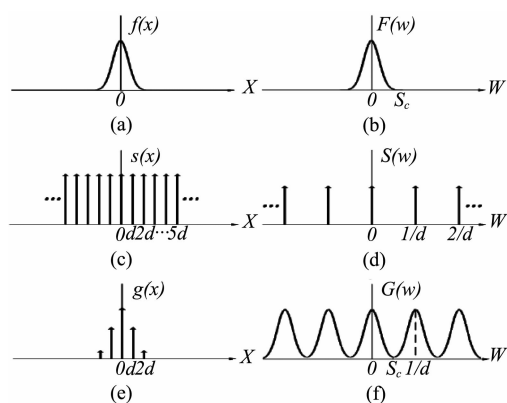


图5 精跟踪探测器的光斑探测过程 (a) 像元接收能量函数  $f(x)$ , (c) 像元采样函数  $s(x)$ , (e) 信标光斑的离散采样值  $g(x)$ , (b) (d) (f) 分别为 (a) (c) (e) 的傅里叶变换

Fig. 5 Detection process of fine tracking detector (a) pixel received energy function  $f(x)$ , (c) pixel sampling function  $s(x)$ , (e) discrete sampling value of beacon  $g(x)$ , (b) (d) (f) are Fourier transforms of (a) (c) (e), respectively

使用质心算法进行信标光斑定位, 实际的信标光斑质心横坐标  $x_f$  为<sup>[13]</sup>

$$x_f = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx} = -\frac{F'(0)}{2\pi j F(0)}, \quad (7)$$

而精跟踪探测器通过信标光斑的离散采样值  $g(x)$  计算所得的信标光斑质心坐标  $x_g$  为

$$x_g = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x g(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} g(x) dx} = -\frac{G'(0)}{2\pi j G(0)}, \quad (8)$$

其中,  $F'(w)$  和  $G'(w)$  分别为  $F(w)$  和  $G(w)$  的一阶导数. 质心算法的系统误差  $\Delta x$  为

$$\Delta x = x_g - x_f = \frac{G(0)F'(0) - G'(0)F(0)}{2\pi j F(0)G(0)}. \quad (9)$$

由图5可知, 当精跟踪探测器的空间采样频率  $1/d$  大于精跟踪探测器镜头调制传递函数的空间截止频率  $S_c$  时, 即

$$1/d > S_c, \quad (10)$$

有

$$\begin{cases} G(0) = F(0) \\ G'(0) = F'(0) \end{cases}, \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)可得

$$\Delta x = 0, \quad (12)$$

所以, 当精跟踪系统参数满足式(10)时, 可消除精跟踪探测器使用质心算法进行信标光斑定位的系统误差. 而对于波长为  $\lambda$  为信标光, 有

$$S_c = 1/(\lambda F_{\#}) \quad (13)$$

其中,  $F_{\#}$  为精跟踪系统的光学  $F$  数, 有

$$F_{\#} = f_{\text{fin}} \Gamma / D \quad (14)$$

式中  $f_{\text{fin}}$  为精跟踪探测器的镜头焦距,  $\Gamma$  为光学望远镜倍率,  $D$  为精跟踪系统有效口径, 由式(10)、式(13)和式(14)可得

$$d < \lambda f_{\text{fin}} \Gamma / D \quad (15)$$

以此作为进行精跟踪系统参数优化、消除质心算法系统误差的理论依据.

### 3 精跟踪系统优化

对于待优化的 ATP 系统, 当端机设计完成后, 系统参数大多固定.

#### (1) 信标光波段 $\lambda$

由于短波长的激光光束对应的衍射极限角更小, 光学增益高, 而高分辨, 高灵敏度的硅材料探测器的响应峰值在 800 nm 附近, 所以信标光波段常选择在 800 nm 附近, 考虑到系统装调时光束的可视性, 本文中待优化的 ATP 系统信标光波长  $\lambda$  为 671 nm.

#### (2) 精跟踪探测器及其像元尺寸 $d$

CMOS 探测器相对于 CCD 探测器集成化程度高、功耗小, 能够集成数模转换器、放大器等, 可降低系统复杂性; 另外 CMOS 探测器易于实现大规模面阵, 具有灵活的开窗功能可进一步提高帧频, 进而实现较高的精跟踪干扰抑制带宽, 所以本文中待优化的 ATP 系统精跟踪探测器选用 STAR1000 CMOS 探测器, 像元尺寸  $d$  为 15  $\mu\text{m}$ .

#### (3) 光学望远镜倍率 $\Gamma$ 和精跟踪探测器的镜头焦距 $f_{\text{fin}}$

当 STAR1000 CMOS 探测器开窗大小为  $64 \times 64$  时, 能够达到 2000 Hz 以上的帧频, 满足精跟踪系统的带宽设计需求. 根据 ATP 系统工作流程, 粗跟踪系统对信标光轴跟踪后将信标光引入精跟踪视场, 由精跟踪执行结构对目标光轴进一步跟踪, 因此精跟踪视场的选择需要略大于粗跟踪系统的误差范围, 保证信标光有足够的概率进入精跟踪视场, 同时为了防止粗跟踪误差突变, 需要精跟踪视场  $\theta_{\text{fin}}$  留有一定裕量, 精跟踪视场  $\theta_{\text{fin}}$  为

$$\theta_{\text{fin}} = 64 \times d / (\Gamma \cdot f_{\text{fin}}) \quad (16)$$

粗跟踪残差的峰峰值一般在  $\pm 300 \mu\text{rad}$ , 标准方差约为 85.40  $\mu\text{rad}$ <sup>[14]</sup>, 所以文中待优化的 ATP 系统选

择精跟踪探测器的等效焦距  $f_{\text{eff}}$  为

$$f_{\text{eff}} = \Gamma \cdot f_{\text{fin}} = 2.5 \text{ m} \quad , \quad (17)$$

使得

$$\begin{aligned} \theta_{\text{fin}} &= 64d / (\Gamma \cdot f_{\text{fin}}) = 64 \times 15 \mu\text{m} \div 2.5 \text{ m} \\ &= 384 \mu\text{rad} > 300 \mu\text{rad} \quad . \quad (18) \end{aligned}$$

(4) 精跟踪系统有效口径  $D$

精跟踪系统光路如图 6 所示, 光学望远镜入瞳直径为  $D_1$ , 出瞳直径为  $D_2$ , 精跟踪探测器的镜头直径为  $D_{\text{fin}}$ , 有

$$D_1 / D_2 = \Gamma \quad , \quad (19)$$

当  $D_{\text{fin}}$  大于  $D_2$  时, 精跟踪系统的有效口径  $D$  等于  $D_1$ . 由于信标光接收和信号光接收共用同一光学望远镜, 为了保证信标光和信号光的接收功率满足进行信标光斑位置探测和信号光低误码率解调的需求, 同时考虑到空间终端的成本较大, 文中待优化的 ATP 系统  $D_1$  为 300 mm,  $D_2$  为 25 mm, 则  $\Gamma$  为 12, 由式(17)选择精跟踪探测器镜头焦距  $f_{\text{fin}}$  为 208 mm,  $D_{\text{fin}}$  略大于  $D_2$ , 取  $D_{\text{fin}}$  为 30 mm.

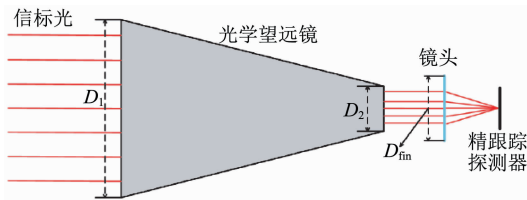


图 6 精跟踪系统光路  
Fig. 6 Light path of the fine tracking system

对于待优化的 ATP 系统, 由于

$$\lambda f_{\text{fin}} \Gamma / D = 0.671 \times 2.5 \div 0.3 = 5.59 \mu\text{m} \quad , \quad (20)$$

探测器像元尺寸  $d$  为  $15 \mu\text{m}$ , 系统参数关系不满足式(15), 精跟踪探测器使用质心算法进行光斑定位时存在系统误差. 为了优化精跟踪系统, 消除质心算法系统误差, 同时不改变精跟踪视场和信号光接收功率, 在精跟踪探测器的镜头前添加孔径光阑, 如图 7 所示, 孔径光阑直径为  $D_d$ , 当  $D_d$  小于  $D_2$  时, 精跟踪系统的有效口径  $D'$  为

$$D' = D_d \Gamma \quad , \quad (21)$$

代入式(15)得

$$D_d < \lambda f_{\text{fin}} / d = 9.32 \text{ mm} \quad , \quad (22)$$

所以为了优化精跟踪系统, 孔径光阑直径  $D_d$  应小于 9.32 mm. 设

$$\beta = \lambda f_{\text{fin}} \Gamma / D' \quad , \quad (23)$$

则  $\beta$  和  $D_d$  和关系曲线如图 8 所示, 结合上述分

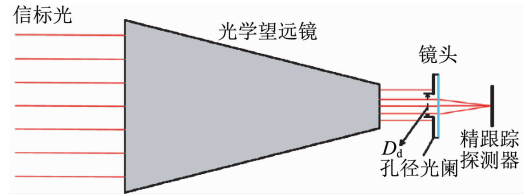


图 7 精跟踪探测器镜头前添加孔径光阑  
Fig. 7 Add an aperture in front of the fine tracking detector lens

析, 当  $D_d$  大于 9.32 mm 时, 精跟踪探测器使用质心算法进行光斑定位时存在系统误差, 当  $D_d$  小于 9.32 mm 时,  $\beta > d = 15 \mu\text{m}$ , 可消除质心算法系统误差.

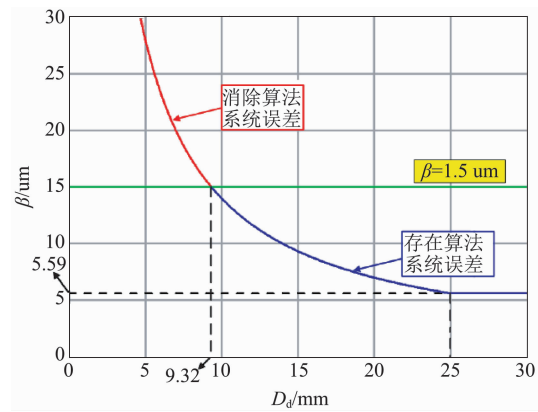


图 8  $\beta$  和  $D_d$  和关系曲线  
Fig. 8  $\beta$  versus  $D_d$

在空间 ATP 系统应用中, 空间光学系统等效为夫琅禾费衍射系统, 精跟踪探测器上得到的信标光斑直径  $d_{\text{beam}}$  可近似等于精跟踪光学系统的艾里斑直径, 则有

$$d_{\text{beam}} = 2.44 \lambda F_{\#} \quad , \quad (24)$$

则加入孔径光阑进行精跟踪优化前后, 精跟踪探测器上  $x$  轴方向上的光斑能量分布  $I(x)$  如图 9 所示, 其中  $I_0$  为精跟踪优化前的信标光斑中心光强. 由图 9 可知, 精跟踪系统优化前后, 光斑直径所占的有效像素大小并无明显变化, 都为 3 pixel 左右. 增加孔径光阑前, 光斑能量分布的高斯宽度较小, 精跟踪探测器使用自适应曝光技术获取的光斑图像能量较为集中, 而光斑边缘的能量微弱, 相对信噪比较低, 使用质心算法进行光斑定位时, 相对信噪比较低的光斑边缘权重反而大, 导致了光斑定位系统误差的产生; 而增加孔径光阑进行精跟踪系统优化, 相比于精跟踪优化前, 增加了光斑能量分布的高斯宽度, 精跟踪探测器使用自适应曝光技术获取的

光斑图像能量分布相对均匀,消除了使用质心算法进行光斑定位时的系统误差,提高了光斑定位精度,但牺牲了系统的信噪比和灵敏度。

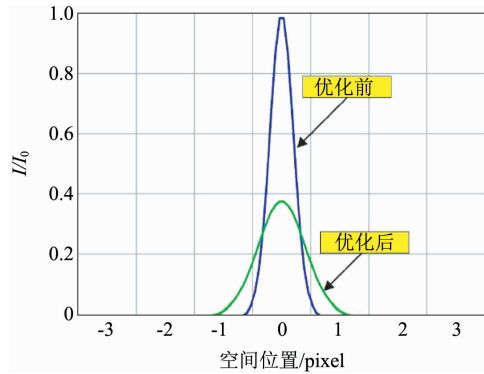


图9 光斑能量分布  
Fig. 9 The energy distribution of the spot

#### 4 实验测试及分析

为了测试精跟踪系统优化前后 ATP 系统的跟踪性能,搭建了跟踪精度的测试实验装置,如图 10 所示,整个实验系统放置在气浮平台上,平行光管生成平行光由光学望远镜收集压缩后,依次经过干扰快速反射镜(FSM)、跟踪快速反射镜、孔径光阑、精跟踪探测器镜头汇聚在精跟踪探测器上,由精跟踪探测器进行光斑定位,精跟踪探测器使用自适应曝光技术,保证了每一帧信标光斑图像的信噪比,以减小随机误差对光斑定位精度的影响. 信号发生器预先设定好粗跟踪残差干扰信号,经过 FSM 驱动器驱动干扰 FSM 摆动,再由跟踪 FSM 对扰动后的光束进行跟踪. 干扰 FSM 和跟踪 FSM 都选用 PI 公司的 S330.8 压电陶瓷振镜,该振镜内部集成有应变片传感器,可对振镜的偏转角度进行精确测量,实现角度偏转的闭环控制,从而在两个正交轴上实现亚微弧度级分辨率的角度调整. 信号发生器生成的干扰信号及其概率密度统计如图 11 所示,干扰信号近似服从高斯分布<sup>[14]</sup>. PI 公司 S330.8 压电陶瓷振镜驱动电压范围为 0 到 100 V,对应偏转范围为 10 mrad,为了让其工作在最佳的线性区,图 10 所示的 FSM 驱动器加入初始偏置电压 50 V,则图 11(a)中的干扰信号加到 FSM 驱动器后,驱动干扰 FSM 生成的角

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

| $D_d/\text{mm}$                    | 25      | 16.73   | 12.55   | 10.04   | 9.65    | 9.29    | 8.96    | 8.66    | 8.37    |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\theta_{\text{err}}/\text{pixel}$ | 0.05729 | 0.03993 | 0.03341 | 0.03149 | 0.03143 | 0.03073 | 0.03062 | 0.03044 | 0.03064 |

度偏转变化量如图 12 所示,其角度偏转变化量的标准差为 55.38  $\mu\text{rad}$ .

精跟踪探测器使用质心算法进行光斑定位,通过质心序列的标准差  $\theta_{\text{err}}$  来分析跟踪性能. 跟踪实验结果如表 1 和图 13 所示. ATP 系统精跟踪误差主要受限于精跟踪探测器的光斑定位误差和精跟踪系统的干扰抑制带宽,当干扰抑制带宽足够高时,光斑定位误差成为制约精跟踪精度的瓶颈. 由式(23)得即

$$\beta = \frac{\lambda}{D'/(f_{\text{fin}}\Gamma)} = \frac{\lambda}{A}, \quad (25)$$

其中  $A$  归一化后的精跟踪系统的相对孔径,有

$$A = D'/(f_{\text{fin}}\Gamma) = D_d/f_{\text{fin}}, \quad (26)$$

由图 13 可知,当孔径光阑的直径  $D_d$  减小时,精跟踪系统的有效焦距不变时,相对孔径  $A$  减小,精跟踪探测器使用质心算法进行光斑定位的系统误差减小,精跟踪误差降低,提高了 ATP 系统的跟踪精度,当孔径光阑的直径  $D_d$  减小到 9.32 mm 左右时,此时相对孔径  $A$  为 0.045,消除了质心算法系统误差,跟踪误差仅为 0.03 pixel,相比优化前的跟踪精度提高了 1.9 倍,对于单像素空间分辨率为 6  $\mu\text{rad}$  的系统,跟踪精度达到了 0.18  $\mu\text{rad}$ . 此后继续减小孔径光阑的直径  $D_d$ ,即使用较小相对孔径的光学系统,跟踪误差并无明显变化,此时跟踪误差主要来源于精跟踪系统干扰抑制带宽的不足以及探测器随机噪声造成的光斑定位误差.

精跟踪探测器帧频为 2 000 Hz,每一帧的最大曝光时间为 0.5 ms,当信标光发射功率一定时,孔径光阑的直径  $D_d$  过小,精跟踪探测器接收到的信标光功率较低,可能导致精跟踪探测器用最大曝光时间仍无法获取高信噪比的光斑图像,而信噪比较低的光斑图像将难以抑制随机噪声的干扰,使得光斑定位精度下降. 所以,对于本文待优化的 ATP 系统而言,最优的相对孔径  $A$  在 0.041 到 0.043 之间,对应使用的孔径光阑直径  $D_d$  范围 8.5 mm 到 9.0 mm 之间.

#### 5 结论

ATP 系统精跟踪探测器对信标光斑的高精度定位是实现高精度跟踪的基础,使用质心算法进行光

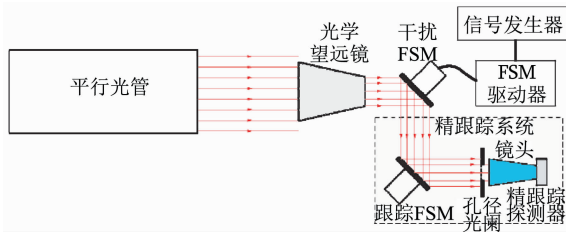


图 10 实验系统  
Fig. 10 Experimental system

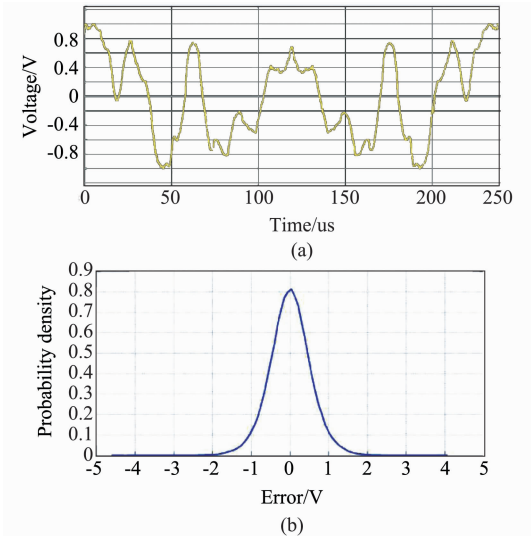


图 11 干扰信号 (a) 信号发生器生成的干扰信号 (b) 干扰信号的概率密度  
Fig. 11 Disturbing signal. (a) Disturbing signal generated by signal generator, (b) probability density function of disturbing signal

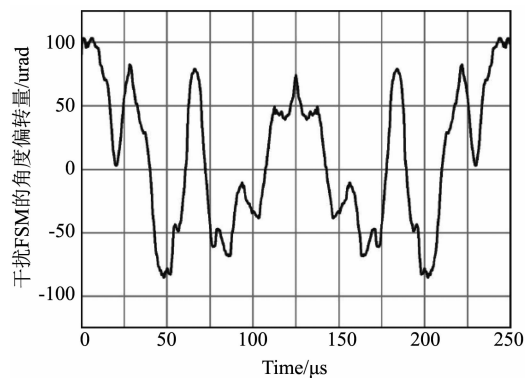


图 12 干扰 FSM 的角度偏转量  
Fig. 12 Angle deflection of the disturbing FSM

斑定位时存在系统误差和随机误差,对精跟踪探测器使用质心算法进行光斑定位的过程进行傅里叶频域分析,推导了质心算法系统误差的来源,结合 ATP 系统跟踪阶段的视场需求,通过分析光学参数的耦合关系,提出了一种消除质心算法系统误差的方案,

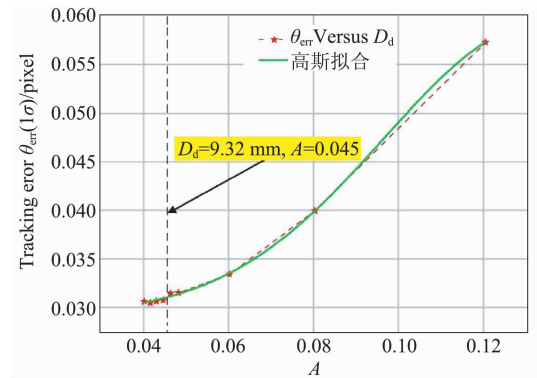


图 13 跟踪误差  $\theta_{err}$  随着相对孔径  $A$  的变化  
Fig. 13 Tracking error  $\theta_{err}$  versus  $A$

进而实现精跟踪系统优化. 使用该优化方案在精跟踪探测器镜头前添加可变直径的孔径光阑,对于待优化的 ATP 精跟踪系统,当孔径光阑的直径减小到 9.32 mm 时,此时相对孔径  $A$  为 0.045,跟踪误差仅为 0.03 pixel,对于单像素空间分辨率为  $6 \mu\text{rad}$  的系统,跟踪精度达到了  $0.18 \mu\text{rad}$ ,相比优化前的精跟踪系统,跟踪精度提高了 1.9 倍,得到了较好的精跟踪优化性能. 该研究对发展高精度的 ATP 系统具有一定的参考价值.

References

[1] BHATNAGAR M R, ARTI M K. Performance Analysis of Hybrid Satellite-Terrestrial FSO Cooperative System [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 013, **25** (22) : 2197 – 2200.

[2] MURPHY D V, KANSHY J E, GREIN M E, *et al.* LLCDC operations using the Lunar Lasercom Ground Terminal [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2014, **8971** (1933) : 450 – 453.

[3] BAI Shuai, WANG Jian-Yu, ZHANG Liang, *et al.* Development progress and trends of space optical communications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress* (白帅, 王建宇, 张亮, 等. 空间光通信发展历程及趋势. *激光与光电子学进展*), 2015, **52** (7) : 070001.

[4] MOHAN S, ALVAREZSALAZAR O, BIRNBAUM K, *et al.* Pointing, acquisition, and tracking architecture tools for deep-space optical communications [C]. *SPIE LASE*. International Society for Optics and Photonics, 2014: 450 – 453.

[5] ZHAO Shang-Hong, WU Ji-Li, LI Yong-Jun, *et al.* Present status and developing trends of satellite laser communication [J]. *Lasers & Optoelectronics Progress* (赵尚弘, 吴继礼, 李勇军, 等. 卫星激光通信现状与发展趋势. *激光与光电子学进展*), 2011, **48** (9) : 092801.

[6] BURNSIDE J W, CONRAD S D, PILLSBURY A D, *et al.* Design of an inertially stabilized telescope for the LLCDC [C]. *Conference on Free-Space Laser Communication Technologies XXIII*. 2011: 79230L – 79230L – 8.

(下转第 46 页)

自调节技术研究.

### 3 结论

介绍了基于线性渐变滤光片的微型化长波近红外物联网节点,采用线性渐变滤光片作为核心分光元件,与线列 InGaAs 焦平面传感器的光敏芯片相耦合,在物联网节点内部实现了 950 ~ 1700 nm 近红外光谱数据的采集和无线传输. 整机无移动部件,摆脱了光纤、数据线和电源线的限制. 相关实验表明,节点的性能指标达到设计要求,具有微型化、低功耗特点,可以满足多数近红外光谱分析应用,为物联网向长波近红外光谱分析领域扩展提供技术支持.

### References

- [1] CHU Xiao-Li, LU Wan-Zhen. Research and application progress of near infrared spectroscopy analytical technology in China in the past five years [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (褚小立, 陆婉珍. 近五年我国近红外光谱分析技术研究与应用进展. *光谱学与光谱分析*), 2014, **34**(10): 2595 - 2605.
- [2] QIN Hong, MA Jing-Yi, CHEN Shao-Jiang, *et al.* Identification of haploid maize kernel using NIR spectroscopy in reflectance and transmittance modes: a comparative study [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(1): 292 - 297.
- [3] LUYPAERT J, ZHANG M H, MASSART D. Feasibility study for the use of near infrared spectroscopy in the quali-

tative and quantitative analysis of green tea, *Camellia sinensis* [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2003, **478**(1): 303 - 312.

- [4] CHU Xiao-Li. Handbook of Near-Infrared Spectral Analysis Technology [M]. Beijing: China Machine Press (褚小立. 近红外光谱分析技术实用手册, 北京: 机械工业出版社), 2016: 15 - 29.
- [5] XUE Li, HAIMEI Gong, JIAXIONG Fang, *et al.* The development of InGaAs short wavelength infrared focal plane arrays with high performance [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **80**: 112 - 119.
- [6] XING Huang, XUE Li, MING Shi, *et al.* The 1/f noise characteristics of In<sub>0.83</sub>Ga<sub>0.17</sub>As photodiodes with SiN<sub>x</sub> passivation films fabricated by two different techniques [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, **67**: 596 - 599.
- [7] N A O'Brien, C A Hulse, D M Friedrich, *et al.* Miniature Near-Infrared (NIR) Spectrometer Engine for Handheld Applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8374**: 837404 - 1 - 8.
- [8] ZHANG Ya-Guang, ZHUANG Xin-Gang, WANG Xu-Quan, *et al.* Wavelength calibration of a new monolithically integrated spectral sensor [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2017, **36**(1): 15 - 19.
- [9] DAVID L D, STEVEN J C, LINDSEY O, *et al.* Rare-earth glass reference materials for near-infrared spectrometry: sources of x-axis location variability [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2003, **490**: 85 - 98.
- [10] GE Ming-Feng, QI Hong-Xing, WANG Yi-Kun, *et al.* Hyperspectral imaging remote sensing technology based on light weight unmanned helicopter platform [J]. *Infrared and Laser Engineering* (葛明锋, 齐洪兴, 王义坤, 等. 基于轻小型无人直升机平台的高光谱遥感成像系统. *红外与激光工程*), 2015, **44**(11): 3402 - 3407.

(上接第 41 页)

- [7] Qian Feng. Research on the high precision ATP system in satellite-to-earth quantum communications [D]. University of Chinese Academy of Sciences (钱锋. 星地量子通信高精度 ATP 系统研究. 中国科学院大学), 2014.
- [8] ORTIZ G G, LEE S, MONACOS S P, *et al.* Design and development of robust ATP subsystem for the Altair UAV-to-ground lasercomm 2.5-Gbps demonstration [C]. High-Power Lasers and Applications. International Society for Optics and Photonics, 2003: 103 - 114.
- [9] YU Si-Yuan, HAN Qi-Qi, MA Jing, *et al.* Size selection of dispersive spot imaging on CCD in a satellite optical communication terminal [J]. *Chinese Journal of Lasers* (于思源, 韩琦琦, 马晶, 等. 卫星光通信终端 CCD 成像光斑弥散圆尺寸选择. *中国激光*), 2007, **34**(1): 69 - 73.
- [10] OSBORNE R W, ZHANG X, WILLET P, *et al.* Effect of sensor pixel size on tracking [J]. *Proc Spie*, 2013, **8857**

(2): 455 - 474.

- [11] LEE S. Pointing accuracy improvement using model-based noise reduction method [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2002, **4635**: 65 - 71.
- [12] ANSARI A H. Digital control design of a CCD-based tracking loop for precision beam pointing [J]. *Proc Spie*, 1994, **2123**: 328 - 333.
- [13] BRACEWELL R. The Fourier transform and its applications [M]. McGraw-Hill Book Co, 2000: 155 - 156.
- [14] HAN Cheng, BAI Bao-Xing, YANG Hua-min, *et al.* Primary environment influence factors to tracking precision in space-ground laser communication [J]. *Acta Photonica Sinica* (韩成, 白宝兴, 杨华民, 等. 空地激光通信跟踪精度主要外界影响因素研究. *光子学报*), 2010, **39**(1): 89 - 94.