

# 探测器条状噪声对精跟踪系统光斑定位的影响

陈少杰<sup>1,2</sup>, 张 亮<sup>1</sup>, 王建宇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 捕获、跟踪、瞄准系统精跟踪探测器在不同噪声下对精跟踪系统进行光斑位置定位的影响不同。分析了探测器条状噪声的来源,理论推导了条状噪声对质心算法的影响。采用阈值质心算法对含有条状噪声和椒盐噪声的图像进行光斑定位,仿真分析了不同阈值、不同光斑图像信噪比下 X 轴和 Y 轴的光斑定位偏差,对比了 X 轴和 Y 轴的光斑定位精度。仿真结果表明,沿 Y 轴方向延伸的条状噪声使得 X 轴光斑定位精度优于 Y 轴。实验分别测试了不同系统配置、不同干扰幅度下精跟踪系统 X 轴和 Y 轴的跟踪精度。实验结果表明,对于两个正交轴对称的精跟踪系统, X 轴的跟踪精度优于 Y 轴,从而验证了条状噪声的存在使得 X 轴的光斑定位精度优于 Y 轴的结论,实验结果和仿真分析结果相符。

**关键词** 光通信; 捕获、跟踪、瞄准系统; 条状噪声; 质心算法; 定位精度

**中图分类号** TN929.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0906008

## Effect of Stripe Noise of Detector on Light Spot Location of Fine Tracking System

Chen Shaojie<sup>1,2</sup>, Zhang Liang<sup>1</sup>, Wang Jianyu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Active Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The noise of fine tracking detectors in acquisition, tracking and pointing systems is different, which has different influences on the position location of light spots. The source of the strip noise of detectors is analyzed, and the influence of the strip noise on centroid algorithm is deduced theoretically. The threshold centroid algorithm is used to locate the light spots of images with stripe noise and salt and pepper noise, and location deviations of X axis and Y axis corresponding to different signal-to-noise ratios and different threshold values are simulated, and the light spot location accuracies of X axis and Y axis are compared. The simulation results show that the light spot location accuracy of X axis is better than that of Y axis when the stripe noise exists in Y axis direction. The tracking accuracies of X axis and Y axis of the fine tracking system under different system configurations and different interference amplitudes are experimentally tested. It proves that, for fine tracking system with two symmetrical orthogonal axes, the tracking accuracy of X axis is better than that of Y axis, which verifies that the location accuracy of X axis is better than that of Y axis when the stripe noise exists. The results obtained from simulation and experiment are identical.

**Key words** optical communications; acquisition, tracking and pointing systems; strip noise; centroid algorithm; location accuracy

**OCIS codes** 060.2605; 120.1880; 040.5160

收稿日期: 2017-04-10; 收到修改稿日期: 2017-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(61302181)

作者简介: 陈少杰(1990—),男,博士研究生,主要从事光束精跟瞄方面的研究。E-mail: chenchen-shaojie@163.com

导师简介: 王建宇(1959—),男,博士,研究员,主要从事物理电子学以及信息获取与处理技术方面的研究。

E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn(通信联系人)

# 1 引 言

空间激光通信相比于微波通信,具有频带宽、速度高、抗干扰和抗截获能力强、结构轻小等优点,非常适用于深空、星际、空空、空地等链路之间的通信<sup>[1]</sup>,欧洲各国、日本和美国等在空间激光通信领域已经开展了大量的研究工作<sup>[2]</sup>。目前,空间激光通信向空间组网和深空激光通信方向发展<sup>[3-4]</sup>。由于使用较小束散角的激光进行通信,空间激光通信需要利用捕获、跟踪、瞄准(ATP)系统来建立和保持通信链路<sup>[5]</sup>。在美国、日本和欧洲空间局的空激光通信中,ATP系统的跟踪精度可达 $1\sim 5\ \mu\text{rad}$ <sup>[6]</sup>。复合轴ATP系统的粗跟踪系统仅减小了精跟踪系统的输入误差,整个系统的最终跟踪性能由精跟踪系统决定<sup>[7]</sup>。在空间激光通信中,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,探测器噪声、背景辐射等因素的影响,导致得到的光斑位置 and 实际位置之间存在偏差。Lee<sup>[8]</sup>提出了一种基于模型的光斑位置提取算法来抑制探测器噪声的影响,从而提高光斑定位精度;在该仿真分析过程中假设每个像素的固定噪声相同,且幅值在一定范围内,而此假设在实际ATP系统分析中难以普遍适用,原因在于不同精跟踪探测器的噪声结构形态不同,对系统进行光斑位置定位的影响不同。本文研究了基于STAR1000 CMOS探测器的ATP精跟踪系统,分析了探测器条状噪声的来源,推导了探测器条状噪声对质心算法的影响,仿真分析了光斑图像在条状噪声和椒盐噪声下阈值质心算法的光斑定位精度,而光斑的定位精度直接影响精跟踪系统的跟踪精度,结合实验分析了探测器条状噪声下的精跟踪性能,为发展高精度的ATP系统提供参考。

# 2 条状噪声的来源

STAR1000探测器结构示意图如图1所示,该探测器由5部分组成:像元阵列、行和列地址选择逻辑单元、列放大器、输出放大器和采样数模转换器(ADC)。每个像元中包含1个光电二极管和3个晶体管,如图2所示。光电二极管一直处于反向偏压状态,在探测器曝光周期到来时,晶体管T1收到1个脉冲信号,从而将光电二极管阴极电压复位,同时将先前积累的光电子清空,随后进入曝光周期。光生电子在曝光周期中不断累积,降低了晶体管T2的栅极电压,每个像元上对应的光强信息决定了输出电平和复位电平之间的差值。探测器中同一列像元的信号输出经1列放大器进入输出放大器,信号经输出放大器的放大后再经过

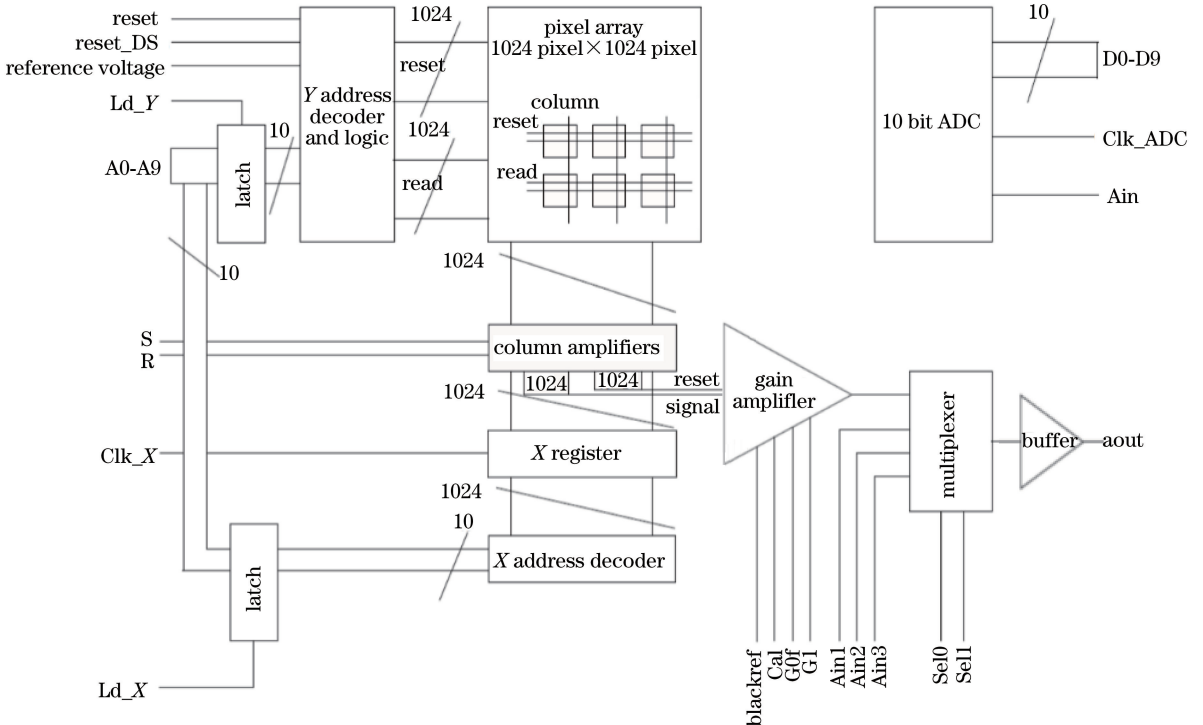


图1 STAR1000探测器结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of STAR1000 detector

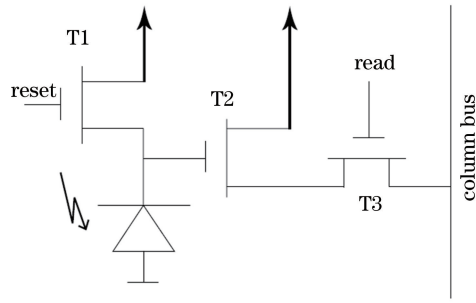


图 2 像元结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of pixel

ADC 量化,从而可得到对应的光强信息。

在探测器结晶基板和半导体制造过程中,结晶缺陷及重金属等污染残留导致结晶和各像元的光电二极管暗电流不均匀,而 STAR1000 探测器对像元信号的采集和处理是以像元阵列的列为单位进行的,同一列的像元信号共同经过列放大器和输出放大器级联放大,不同列的级联放大因子由于电路噪声的存在而略有差异,进而导致了探测器条状噪声的产生。图 3 为 STAR1000 CMOS 探测器采集到的光斑图像(10 bit 量化,低 8 位)及其傅里叶频谱,从图中可以看出,光斑周围存在垂直方向的条状噪声。

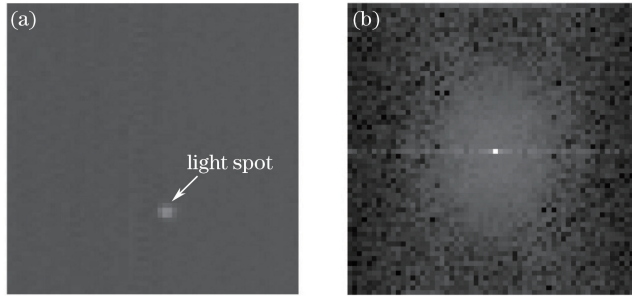


图 3 光斑图像及其傅里叶频谱。(a)含有条状噪声的光斑图像;(b)傅里叶频谱

Fig. 3 Light spot image and its Fourier spectrum. (a) Light spot image with stripe noise; (b) Fourier spectrum

### 3 条状噪声对质心算法的影响

在 ATP 系统中常用的光斑位置提取算法主要包括形心算法和质心算法等<sup>[9]</sup>。这些算法各有优缺点,其中质心算法精度高、稳定性好、计算时间短,得到广泛使用。探测器光敏面上的像元灰度分布为  $I(x, y)$ ,  $(x, y)$  为像元在探测器光敏面坐标系中的位置,通过(1)式计算可得图像的质心坐标  $(x_D, y_D)$  为

$$\begin{cases} x_D = \frac{\sum xI(x, y)}{\sum I(x, y)} \\ y_D = \frac{\sum yI(x, y)}{\sum I(x, y)} \end{cases} \quad (1)$$

每一像元上的灰度值都由信号  $I_S(x, y)$  和噪声  $I_N(x, y)$  组成,即

$$I(x, y) = I_S(x, y) + I_N(x, y), \quad (2)$$

则对于质心横坐标  $x_D$  有

$$\begin{aligned} x_D &= \frac{\sum x[I_S(x, y) + I_N(x, y)]}{\sum I(x, y)} = \frac{\sum xI_S(x, y) + \sum xI_N(x, y)}{\sum I(x, y)} \\ &= \frac{\sum xI_S(x, y)}{\sum I(x, y)} + \frac{\sum xI_N(x, y)}{\sum I(x, y)} = \frac{\sum xI_S(x, y)}{\sum I(x, y)} + \frac{\sum_{i=1}^{\max(\text{row})} [i \sum_{j=1}^{\max(\text{col})} I_N(x_i, y_j)]}{\sum I(x, y)}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\max(\text{row})$  和  $\max(\text{col})$  分别为行序号、列序号的最大值,即光斑窗口的行数和列数,  $i \sum_{j=1}^{\max(\text{col})} I_N(x_i, y_j)$  为行序号  $i$  与该行所有像元灰度值之和的乘积。同理,对于质心纵坐标  $y_D$  有

$$y_D = \frac{\sum y I_N(x, y)}{\sum I(x, y)} + \frac{\sum_{j=1}^{\max(\text{col})} [j \sum_{i=1}^{\max(\text{row})} I_N(x_i, y_j)]}{\sum I(x, y)}, \quad (4)$$

式中  $j \sum_{i=1}^{\max(\text{row})} I_N(x_i, y_j)$  为列序号  $j$  与该列所有像元灰度值之和的乘积。

令

$$\begin{cases} Z_x = \sum_{i=1}^{\max(\text{row})} [i \sum_{j=1}^{\max(\text{col})} I_N(x_i, y_j)] \\ Z_y = \sum_{j=1}^{\max(\text{col})} [j \sum_{i=1}^{\max(\text{row})} I_N(x_i, y_j)] \end{cases}, \quad (5)$$

则有

$$\begin{cases} Z_x = \frac{\sum_{i=1}^{\max(\text{row})} i \sum_{x,y} I_N(x, y)}{\max(\text{row})} + \sum_{i=1}^{\max(\text{row})} (i \Delta I_{N\_row}^i) \\ Z_y = \frac{\sum_{j=1}^{\max(\text{col})} j \sum_{x,y} I_N(x, y)}{\max(\text{col})} + \sum_{j=1}^{\max(\text{col})} (j \Delta I_{N\_col}^j) \end{cases}, \quad (6)$$

式中

$$\begin{cases} \Delta I_{N\_row}^i = \sum_{j=1}^{\max(\text{col})} I_N(x_i, y_j) - \frac{\sum I_N(x, y)}{\max(\text{row})} \\ \Delta I_{N\_col}^j = \sum_{i=1}^{\max(\text{row})} I_N(x_i, y_j) - \frac{\sum I_N(x, y)}{\max(\text{col})} \end{cases}. \quad (7)$$

一般地,精跟踪系统中光斑窗口行数和列数相等,可设  $\max(\text{col}) = \max(\text{row}) = W$ , 则

$$\Delta Z = Z_y - Z_x = \sum_{k=1}^W [k (\Delta I_{N\_col}^k - \Delta I_{N\_row}^k)]. \quad (8)$$

行像元灰度之和的标准差  $S_{\text{row}}$  与列像元灰度之和的标准差  $S_{\text{col}}$  为

$$\begin{cases} S_{\text{row}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^W \left[ \sum_{i=1}^W I_N(x_i, y_j) - \frac{\sum I(x, y)}{W} \right]^2}{W}} \\ S_{\text{col}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^W \left[ \sum_{j=1}^W I_N(x_i, y_j) - \frac{\sum I(x, y)}{W} \right]^2}{W}} \end{cases}. \quad (9)$$

如果存在条状噪声,且其延伸方向为  $Y$  轴方向,则有

$$S_{\text{row}} < S_{\text{col}}, \quad (10)$$

由(7)~(10)式可得

$$\Delta Z > 0. \quad (11)$$

如图4所示,光斑的绝对位置坐标为  $(x_T, y_T)$ , 两个坐标轴上的探测偏差分别为  $\Delta x$  和  $\Delta y$ , 则有

$$\begin{cases} \Delta x = x_D - x_T \\ \Delta y = y_D - y_T \end{cases}, \quad (12)$$

由(11)式可知

$$\Delta y > \Delta x. \quad (13)$$

由于探测器存在条状噪声,在使用质心算法进行光斑定位时,计算所得的光斑位置与光斑实际(绝对)位置之间存在偏差,当条状噪声的延伸方向为 Y 轴方向时,质心纵坐标偏差大于横坐标,反之,当条状噪声的延伸方向为 X 轴方向时,质心横坐标偏差大于纵坐标。

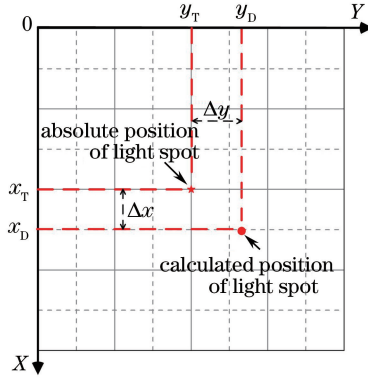


图 4 光斑质心偏差

Fig. 4 Centroid deviation of light spot

为了抑制探测器噪声对光斑定位精度的影响,常采用改进型的质心算法,如基于模型的质心算法、窗口质心算法以及阈值质心算法等<sup>[8]</sup>。在没有配置惯性传感器前馈闭环的 ATP 系统中,为了达到较强的干扰抑制能力,需要探测器拥有 2000 Hz 甚至更高的帧频<sup>[10]</sup>,实时进行光斑位置定位则需要采用复杂度较低的算法,因此阈值质心算法得到广泛应用。使用阈值质心算法计算所得的光斑质心坐标为 $(x_{th}, y_{th})$ ,计算公式为<sup>[11]</sup>

$$\begin{cases} x_{th} = \frac{\sum x W(x, y)}{\sum W(x, y)} \\ y_{th} = \frac{\sum y W(x, y)}{\sum W(x, y)} \end{cases}, \quad (14)$$

式中  $W(x, y)$  为质心计算过程中的权重,且有

$$W(x, y) = \begin{cases} I(x, y) - T, & I(x, y) \geq T \\ 0, & I(x, y) \leq T \end{cases}, \quad (15)$$

式中  $T$  为阈值。如果所选择的阈值过低,将达不到抑制噪声干扰的作用,而所选择的阈值过高将会去除光斑的边缘信息。因此,过高或过低的阈值都会影响光斑定位精度,从而导致系统跟踪性能下降。

## 4 仿真和实验

### 4.1 仿真分析

STAR1000 CMOS 探测器在无光照时连续采集图像,获得  $n$  幅  $60 \text{ pixel} \times 60 \text{ pixel}$  的含有条状噪声的图像,条状噪声的延伸方向为 Y 轴方向,每个像素灰度值采用 10 bit 量化,采集到的噪声图像的统计结果如图 5 所示,可见每幅图像的噪声幅值范围为  $80 \sim 90 \text{ dB}$ ,平均值约为  $84.5 \text{ dB}$ 。为了进行对比分析,使用 10 bit 量化的 KODAK KAI-0340 CCD 探测器在无光照时连续采集图像,获得  $n$  幅  $60 \text{ pixel} \times 60 \text{ pixel}$  的含有椒盐噪声的图像(10 bit 量化,低 8 位),图像样本如图 6 所示,通过对该系列图像进行统计分析,可以得到不同图像中椒盐噪声的幅值相同,均为 16,但噪声出现的位置是随机的。从图 6 的 4 个样本中也可以看出,不同图像中的椒盐噪声坐标位置不同。

构建理想的高斯分布光斑,其绝对位置坐标为  $(30, 30)$ ,将高斯分布光斑叠加在噪声图像上,采用阈值质心算法进行光斑位置定位。对于不同信噪比( $R_{SNR}$ )的光斑图像,由阈值质心算法求取的质心位置坐标如图 7、8 所示,其中图 7 对应于含有条状噪声的光斑图像,图 8 对应于含有椒盐噪声的光斑图像。由图 7 可知,对于含有条状噪声的光斑图像,当所选的阈值低于 90 时,计算所得的质心偏移  $\Delta y > \Delta x$ ,此时阈值的选取并

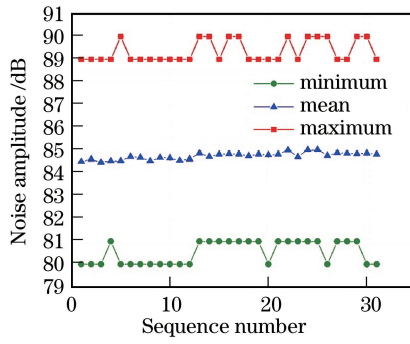


图 5 图像噪声水平

Fig. 5 Image noise level

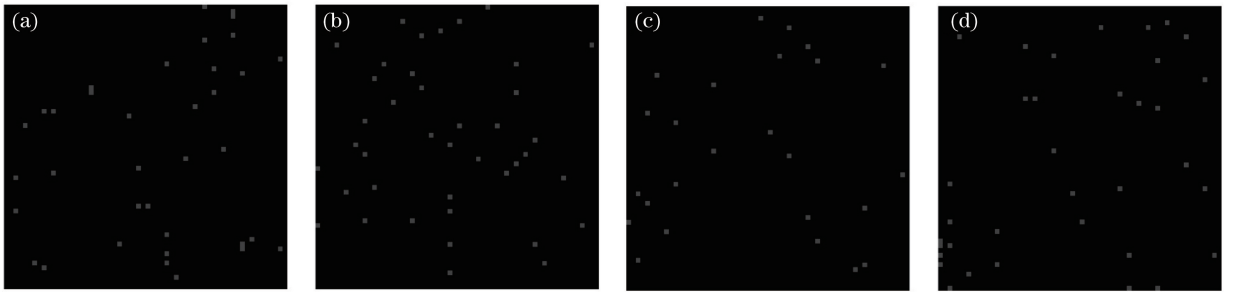


图 6 含有椒盐噪声的图像。(a)样本 1;(b)样本 2;(c)样本 3;(d)样本 4

Fig. 6 Images with salt and pepper noise. (a) Sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3; (d) sample 4

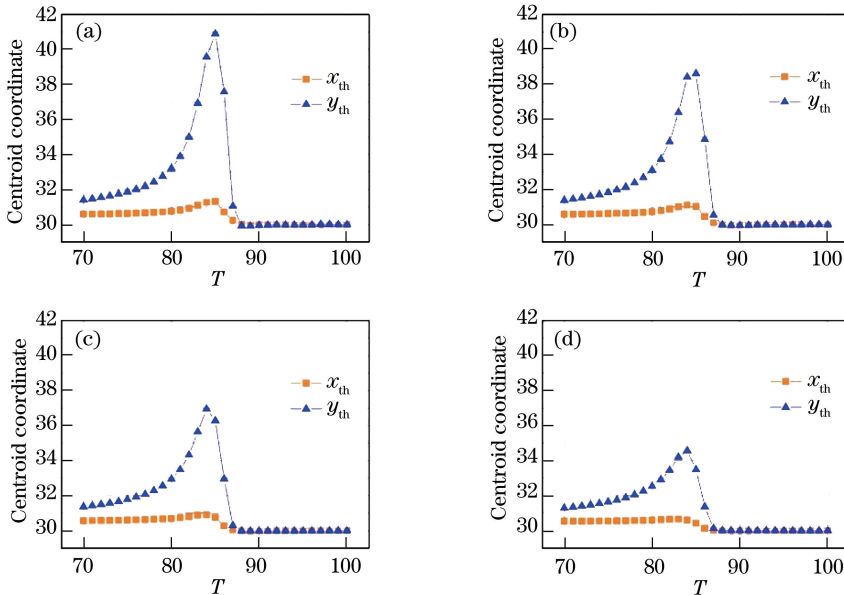


图 7 含条状噪声光斑图像的质心坐标。(a)  $R_{SNR} = 15.0$  dB;(b)  $R_{SNR} = 17.5$  dB;(c)  $R_{SNR} = 20.0$  dB;(d)  $R_{SNR} = 22.5$  dB

Fig. 7 Centroid coordinates of light spot images with strip noise. (a)  $R_{SNR} = 15.0$  dB;

(b)  $R_{SNR} = 17.5$  dB; (c)  $R_{SNR} = 20.0$  dB; (d)  $R_{SNR} = 22.5$  dB

没有完全抑制条状噪声对质心算法的影响;当所选的阈值为 84 时,条状噪声中的暗条纹因低于阈值而被去除,而高于阈值的亮条纹导致  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  分别达到最大值,且有  $\Delta y > \Delta x$ 。另外,光斑图像信噪比越大,噪声对定位偏差的影响越小。不同结构形态的噪声对光斑定位的影响不同,对于含有椒盐噪声的光斑图像,由图 8 可知,当所选的阈值小于噪声幅值时,不同信噪比下 Y 轴定位偏差大于 X 轴,但当所选阈值大于噪声幅值且光斑图像信噪比较大时,X 轴定位偏差大于 Y 轴,如图 8(c)、(d)所示;另外,当所选阈值大于噪声幅值时,计算所得的光斑质心位置坐标并不等于绝对位置坐标(30,30),可见对于含有椒盐噪声的光斑图像,使用阈值

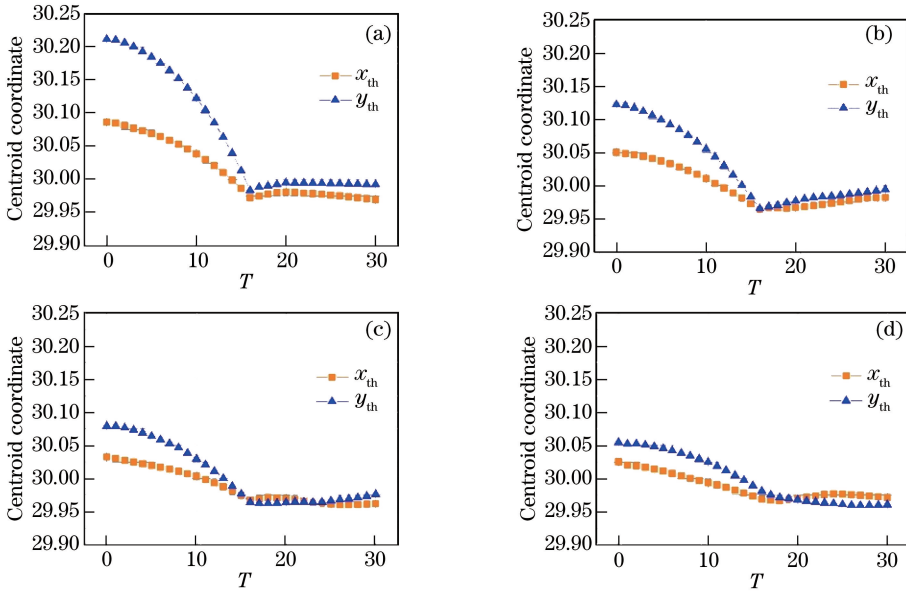


图 8 含椒盐噪声光斑图像的质心坐标。(a)  $R_{SNR} = 15.0$  dB; (b)  $R_{SNR} = 17.5$  dB; (c)  $R_{SNR} = 20.0$  dB; (d)  $R_{SNR} = 22.5$  dB  
 Fig. 8 Centroid coordinates of light spot images with salt and pepper noise. (a)  $R_{SNR} = 15.0$  dB;  
 (b)  $R_{SNR} = 17.5$  dB; (c)  $R_{SNR} = 20.0$  dB; (d)  $R_{SNR} = 22.5$  dB

质心算法进行光斑定位时存在系统偏差。

对于含有条状噪声的光斑图像,由于噪声幅值最大为 90 dB,同时为了保护光斑的有效边缘信息,采用  $T=90$  的阈值质心算法进行光斑定位。对于含有椒盐噪声的光斑图像,取  $T=16$ 。 $x$ 、 $y$  坐标的定位标准差分别为

$$\begin{cases} \delta_x = \sqrt{\frac{\sum (x_{th} - x_T)^2}{n - 1}} \\ \delta_y = \sqrt{\frac{\sum (y_{th} - y_T)^2}{n - 1}} \end{cases}, \quad (16)$$

式中  $n$  为采集到的光斑图像数量。光斑定位误差越小,对应的定位精度越高。当  $n=100$  时,得到的光斑定位误差如图 9 所示,可以看出,对于含条状噪声的光斑图像,信噪比越大,光斑定位精度越高;而沿  $Y$  轴方向延伸的条状噪声在  $X$  轴方向的分布并不均匀,采用同一阈值计算  $W$  时得到光斑  $Y$  轴的定位误差  $\delta_{y\_stripe}$  高于  $X$  轴的定位误差  $\delta_{x\_stripe}$ ,即光斑  $X$  轴定位精度优于  $Y$  轴。对于含椒盐噪声的光斑图像,光斑定位精度对信噪比的变化并不敏感, $X$  轴定位精度和  $Y$  轴定位精度交错在一起;椒盐噪声的疏密和分布位置的随机性导致光斑定位精度存在波动。

对于含条状噪声的光斑图像,当光斑图像的信噪比在 20~45 dB 之间时,光斑定位误差如图 10 所示,可

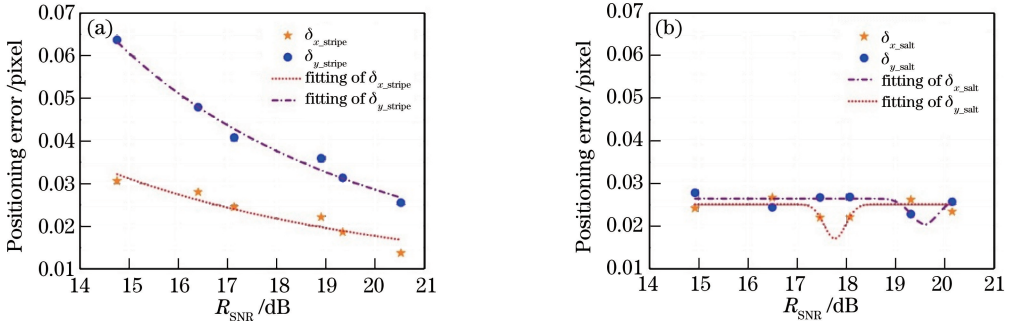


图 9 光斑定位误差及其拟合曲线。(a) 含条状噪声的图像; (b) 含椒盐噪声的图像

Fig. 9 Light spot positioning error and fitting curves. (a) Image with stripe noise; (b) image with salt and pepper noise

可以看出,随着信噪比的增大, $X$  轴的定位误差  $\delta_{x\_stripe}$  和  $Y$  轴的定位误差  $\delta_{y\_stripe}$  趋于接近,在信噪比约为 32 dB 时两者趋于相等,可见信噪比的增大弱化了条状噪声对光斑定位的影响。仿真过程中假设探测器的填充率为 100%且不存在像元非均匀性,则当信噪比大于 36 dB 时,两轴的定位误差都为 0,此时光斑图像趋于饱和。

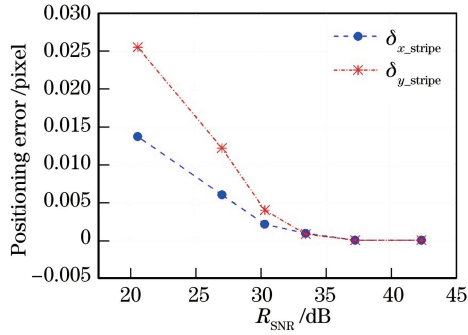


图 10  $R_{SNR}$  较大时含条状噪声光斑图像的的定位误差

Fig. 10 Positioning error of light spot image with stripe noise under large  $R_{SNR}$

#### 4.2 实验分析

实验系统示意图如图 11 所示,波长为 671 nm 的激光器输出的激光经光纤衰减器后进入平行光管,由平行光管模拟出远场分布的平行光,平行光经过干扰快反镜后进入精跟踪系统。受扰动后的平行光束首先被精跟踪探测器探测,计算出跟踪点与光斑当前质心位置的偏差,数字控制器根据此偏差进行闭环控制,输出电压经数模转换器(DAC)转换为模拟量,然后由驱动电路放大后驱动跟踪快反镜,使其偏转一定角度,将信标光斑稳定在跟踪点上,跟踪过程中跟踪点为固定坐标。对于两个正交轴( $X$  轴和  $Y$  轴)对称的精跟踪系统,探测器的光斑定位精度在两轴上的差异将直接导致跟踪精度在两轴上的差异,对精跟踪探测器存在条状噪声下的精跟踪系统跟踪性能进行分析,可以得到条状噪声对光斑定位的影响。实验中光纤衰减器采用可调光学衰减器(型号 V600A, Thorlabs 公司, 美国),其最大输入功率可达 100 mW;通过对衰减器施加 0~5 V 的驱动电压可以控制光的透射率,透射率随着所施加电压的增大而减小,从而实现 2.5~30 dB 的衰减范围。干扰源由信号发生器控制干扰快反镜产生,信号发生器的输出如图 12 所示,干扰信号的概率密度服从高斯分布<sup>[12]</sup>。干扰快反镜和跟踪快反镜均采用压电陶瓷振镜(型号 S330.8, PI 公司, 德国),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。

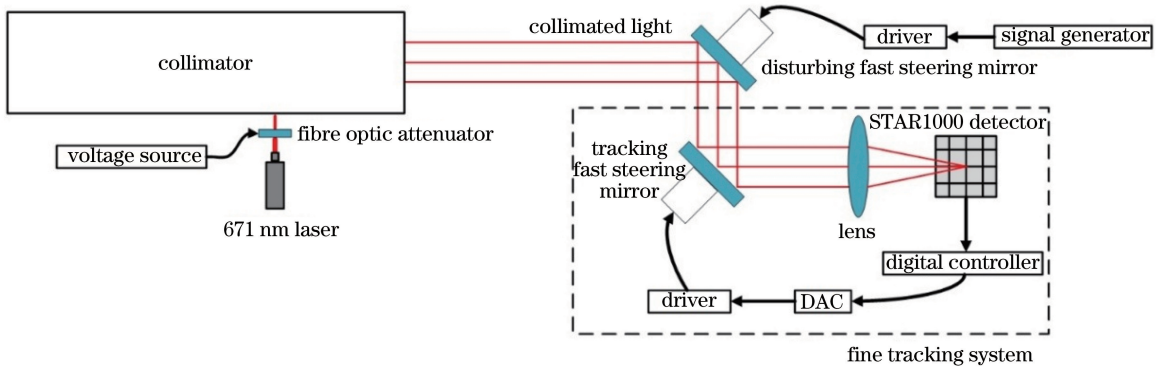


图 11 实验系统示意图

Fig. 11 Diagram of experimental system

当光纤衰减器的驱动电压  $V_{FOA}$  变化时,帧频为 2000 frame·s<sup>-1</sup> 的精跟踪探测器获得的光斑图像(10 bit 量化,高 8 位)如图 13 所示,可以看出当  $V_{FOA}$  减小时,光纤衰减器的透射率增大,模拟得到实验系统的远场信标光功率增加;在相同曝光时间下,精跟踪探测器获得的信标光斑图像的信噪比增大,而在  $V_{FOA} = 1.4$  V 时,光斑趋于饱和。



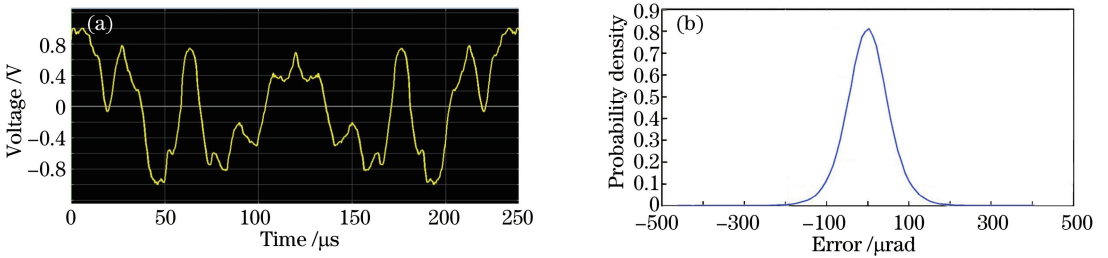


图 12 (a)信号发生器生成的干扰信号;(b)干扰信号的概率密度

Fig. 12 (a) Disturbing signal generated by signal generator; (b) probability density of disturbing signal

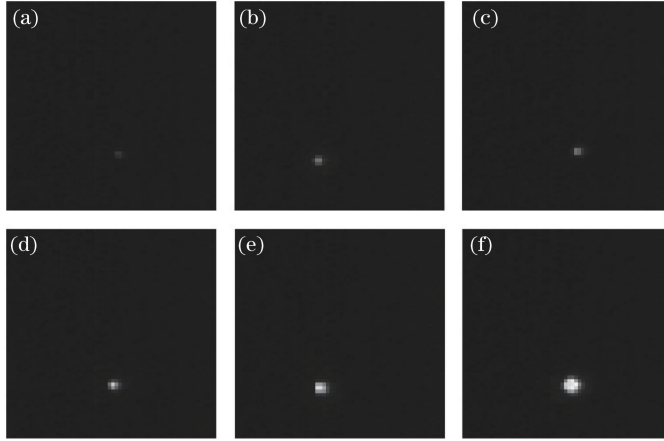


图 13 光斑图像。(a)  $V_{FOA}=2.4$  V;(b)  $V_{FOA}=2.2$  V;(c)  $V_{FOA}=2.0$  V;(d)  $V_{FOA}=1.8$  V;(e)  $V_{FOA}=1.6$  V;(f)  $V_{FOA}=1.4$  V

Fig. 13 Light spot images. (a)  $V_{FOA}=2.4$  V; (b)  $V_{FOA}=2.2$  V; (c)  $V_{FOA}=2.0$  V; (d)  $V_{FOA}=1.8$  V;

(e)  $V_{FOA}=1.6$  V; (f)  $V_{FOA}=1.4$  V

当  $V_{FOA}=1.8$  V 时,光斑定位采用  $T=90$  的阈值质心算法,设图 12 所示的干扰信号幅值为 1,实验结果如表 1 所示。可以看出:当干扰信号幅值一定时,DAC 分辨率越高,探测器帧频越高,对应的跟踪误差越小;在相同 DAC 分辨率或相同探测器帧频下,X 轴的跟踪误差均低于 Y 轴。当 DAC 分辨率为 16 bit 且探测器帧频为  $3000 \text{ frame}\cdot\text{s}^{-1}$  时,干扰信号幅值增大后的跟踪误差如图 14 所示,可以看出跟踪误差随干扰信号幅值的增加而增大,但 X 轴的跟踪误差仍低于 Y 轴。跟踪误差越小,跟踪精度越高,因此探测器中延伸方向为 Y 轴的条状噪声导致 X 轴的跟踪精度优于 Y 轴。

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

Number of Experiment	DAC resolution /bit	Frame rate / ( $10^3 \text{ frame}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Disturbing signal amplitude /arb. units	X axis tracking error /pixel	Y axis tracking error /pixel
1	12	2	1	0.085	0.142
2	16	2	1	0.073	0.133
3	16	3	1	0.062	0.090

当 DAC 分辨率为 16 bit 且探测器帧频为  $2000 \text{ frame}\cdot\text{s}^{-1}$  时,跟踪误差随  $V_{FOA}$  的变化如图 15 所示,可以看出当  $V_{FOA}<1.4$  V 时,光斑图像趋于饱和。过于饱和的光斑失去了能量高斯分布的信息,而探测器像元大小和量化位数的有限性导致 X 轴的光斑定位精度随  $V_{FOA}$  的减小而减小,在实验中,则有 X 轴的跟踪误差随  $V_{FOA}$  的减小而增大;而当  $V_{FOA}$  减小时,条状噪声对精跟踪探测器光斑定位的影响被弱化,这使 X 轴的跟踪误差与 Y 轴的跟踪误差趋于相等。由于探测器填充率和响应线性度的有限性以及像元非均匀性的缺陷,实验中高信噪比对应的光斑定位误差与理论仿真结果存在差异,并不为 0。此外,精跟踪带宽和精跟踪执行分辨率也比较有限,这些误差的矢量和导致 X 轴的跟踪误差和 Y 轴的跟踪误差在  $V_{FOA}<1.0$  V 时均稳定在 0.95 pixel 左右。综上,为了降低条状噪声对精跟踪系统光斑定位的影响,可适当增大光斑图像的信噪比。

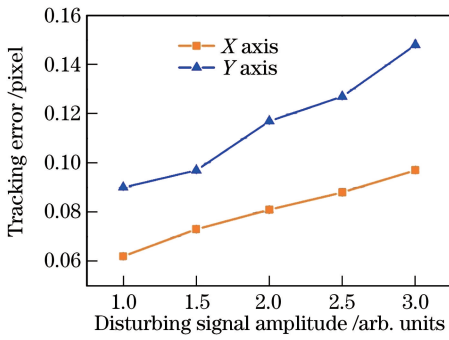


图 14 不同干扰信号幅值时的跟踪误差  
Fig. 14 Tracking errors under different disturbing signal amplitude

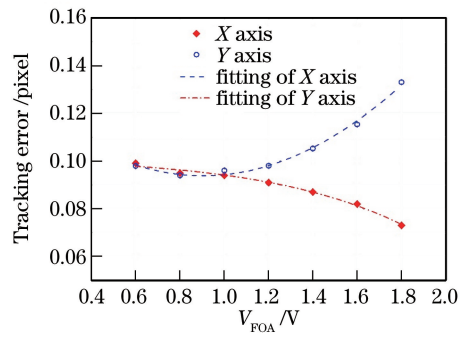


图 15 不同  $V_{FOA}$  时的跟踪误差  
Fig. 15 Tracking errors under different  $V_{FOA}$

在 ATP 系统实际应用中,当链路距离和链路环境一定时,可通过提高信标光发射功率或增加 ATP 系统的光学接收望远镜口径来提高所接收到信标光的能量,以实现大信噪比的光斑图像获取。

## 5 结 论

对于基于 STAR1000 CMOS 探测器的 ATP 精跟踪系统而言,探测器制作过程中的非均匀性和电路的按列读取导致探测器存在条状噪声。采用质心算法对光斑进行定位,理论分析得到条状噪声导致沿噪声延伸方向的光斑定位偏差大于其正交方向,仿真分析了分别存在条状噪声和椒盐噪声时不同光斑图像信噪比和不同阈值的阈值质心算法对光斑定位的影响。对于延伸方向沿 Y 轴的条状噪声,光斑定位精度随信噪比的增大而提高,当信噪比高于 20 dB 时,光斑定位精度小于 0.03 pixel,但两个轴上的光斑定位精度存在差异,即 X 轴的光斑定位精度优于 Y 轴。对于两轴正交对称的精跟踪系统,当 DAC 分辨率、探测器帧频以及干扰幅值均不相同, X 轴的跟踪精度均优于 Y 轴,从而验证了探测器的条状噪声导致两个轴的光斑定位精度存在差异。该差异随信噪比的增加而减小,因此增大光斑图像信噪比是弱化噪声对光斑定位影响的途径之一。该研究结果对高精度 ATP 系统的发展提供一定参考。

## 参 考 文 献

- [1] Jiang Huilin, Tong Shoufeng, Zhang Lizhong. The technologies and systems of space laser communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 2-5.  
姜会林, 佟首峰, 张立中. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 2-5.
- [2] Bai Shuai, Wang Jianyu, Zhang Liang, *et al.* Development progress and trends of space optical communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 070001.  
白 帅, 王建宇, 张 亮, 等. 空间光通信发展历程及趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 070001.
- [3] Jiang Lun, Hu Yuan, Wang Chao, *et al.* Optical system in one-point to multi-point simultaneous space laser communications[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0506001.  
江 伦, 胡 源, 王 超, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学系统研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0506001.
- [4] Wang Yan, Zhang Huaxun, Zhang Meng, *et al.* New pulse-position modulation technology in deep-space optical communications[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0505008.  
王 岩, 张化勋, 张 猛, 等. 深空通信中新型脉冲位置调制技术研究[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505008.
- [5] Mohan S, Alvarezsalazar O, Birnbaum K, *et al.* Pointing, acquisition, and tracking architecture tools for deep-space optical communications[C]. SPIE, 2014, 8971: 89710H.
- [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] Ortiz G G, Lee S, Monacos S P, *et al.* Design and development of a robust ATP subsystem for the Altair UAV-to-ground lasercomm 2.5-Gbps demonstration[C]. SPIE, 2003, 4975: 103-114.
- [8] Lee S. Pointing accuracy improvement using model-based noise reduction method[C]. SPIE, 2002, 4635: 65-71.
- [9] Liu Yunqing, Jiang Huilin, Tong Shoufeng, *et al.* Study on stabilizational tracking technology for atmospheric laser

communication system[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0505005.

刘云清, 姜会林, 佟首峰, 等. 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.

- [10] Ansari A H. Digital control design of a CCD-based tracking loop for precision beam pointing[C]. SPIE, 1994, 2123: 328-333.
- [11] Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, *et al.* Positioning accuracy of spot-detecting camera in acquisition, tracking, pointing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205007.  
钱 锋, 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.
- [12] Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin, *et al.* Primary environment influence factors to tracking precision in space-ground laser communication[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(1): 89-94.  
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[J]. 光子学报, 2010, 39(1): 89-94.