

捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测相机的定位精度

钱 锋 贾建军 张 亮 王建宇

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要 分析了激光通信中捕获、跟踪、瞄准(ATP)系统对信标光光斑定位的需求,阐述了选用互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器的优势。提出了基于 STAR1000 探测器光斑探测相机的设计思路和光斑质心算法。由于 CMOS 探测器存在噪声和像元占空比有限等缺陷,影响了相机的定位精度。对影响定位精度的因素进行了分析和仿真,通过研制出的相机实验平台完成了测试和实验验证。实验结果证明降低噪声、提高像元占空比、扩大有效光斑直径均可提高定位精度。进而针对激光通信 ATP 系统的特点提出了提高相机定位精度的改进方案。

关键词 光通信;定位精度;质心算法;CMOS 探测器;捕获、跟踪、瞄准

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0205007

Positioning Accuracy of Spot-Detecting Camera in Acquisition, Tracking, Pointing System

Qian Feng Jia Jianjun Zhang Liang Wang Jianyu

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract Requirements of high-precision spot detection in laser communication acquisition, tracking, pointing (ATP) systems are analyzed, and the advantages of selecting complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) sensor are explained. According to the needs, design principles of a spot-detecting camera based on STAR-1000 sensor as well as hardware implementation methods of centroid algorithm are expounded. The positioning accuracy of the camera is affected by some defects, for example noise and limited duty cycle in the CMOS sensor. Several factors in positioning accuracy are analyzed and the effect is simulated. Test results from imaging experiment system formed verify these analyses. According to the experiment designer can improve positioning accuracy by reducing noise, improving duty cycle, and expanding the effective spot diameter. And then, suggestions for improving positioning accuracy are put forward which contrapose laser communication ATP system.

Key words optical communications; positioning accuracy; centroid algorithm; complementary metal-oxide-semiconductor sensor; acquisition, tracking, pointing

OCIS codes 060.2605; 120.1880; 040.5160

1 引 言

激光光通信技术的发展由来已久,欧美等国已相继在世界范围内开展了远距离激光通信领域的相关技术研究。其中高精度捕获、跟踪、瞄准(ATP)系统是实现远距离激光通信的关键技术之一。而光斑探测相机用于探测激光通信链路的信标光方向,使系统得到通信链路光束指向的角度偏差,从而获

得通信终端的位置信息,其定位精度直接决定了整个系统的性能。因此研究光斑探测相机的定位算法及影响定位精度的因素具有重要的意义。

在已经实现的欧空局 SILEX 计划、日本的 ETS-VI 计划和 OICETS 计划中,它们的 ATP 系统均达到了优于 $\pm 2 \mu\text{rad}$ 的跟瞄精度^[1,2],这些计划的粗跟踪系统都使用了电荷耦合器件(CCD)探测相

收稿日期: 2012-09-19; **收到修改稿日期**: 2012-10-16

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KGCX1-YW-16)资助课题。

作者简介: 钱 锋(1986—),男,博士研究生,主要从事光束跟瞄方面的研究。E-mail: qianfeng19861026@126.com

导师简介: 王建宇(1959—),男,博士,研究员,主要从事物理电子学和量子通信系统技术等方面的研究。

E-mail: jywang@mail. sitp. ac. cn(通信联系人)

机, SILEX 计划的精跟踪系统使用了 CCD 相机, ETS-VI 计划和 OICETS 计划的精跟踪相机则是四象限雪崩管探测器(QAPD)。在已经公布并投入激光通信使用的 ATP 系统中, 还鲜有采用互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器来实现信标光斑探测, 并且对其定位精度的深入研究也相对较少。

但随着 CMOS 探测器的日渐成熟, 利用 CMOS 探测器来实现 ATP 系统的光斑探测相机也成为了切实可行的方案。CMOS 探测器相对于 QAPD 具有更大的探测阵面和更高的像元一致性, 具有更高的探测概率和精度; 而 CMOS 相对于 CCD 探测器集成化程度更高、功耗小, 能够集成放大器、模数转换器(ADC)等, 减少了外围配置电路数量, 可降低系统复杂性, CMOS 探测器的结构也不会产生帧转移 CCD 具有的拖尾现象^[3]。CMOS 探测器集成化程度高功耗小, 易于实现大规模面阵, 其灵活的开窗功能还可进一步提高帧频, 且易于修改光斑跟踪中心。这些优势使得 CMOS 探测器易于满足远距离激光通信 ATP 系统中粗跟踪探测相机大视场的需

求, 也易于实现精跟踪探测相机的高帧频^[4]。在激光通信 ATP 系统中有良好的应用前景。

然而由于 CMOS 探测器自身存在的噪声和有限的像元占空比等缺陷, 必将对光斑的定位精度产生影响。本文给出了基于 STAR1000 探测器(CMOS 探测器)的相机系统结构和定位算法, 分析了影响定位精度的因素, 并给出了提高定位精度的解决途径, 对发展基于 CMOS 探测器的 ATP 系统具有一定的参考价值。

2 光斑跟踪相机的系统结构及光斑质心算法

基于 STAR1000 研制的光斑跟踪相机结构如图 1 所示, 整个相机由现场可编程门阵列(FPGA)实现对探测器的控制驱动与采集, 并实时完成光斑质心提取和图像传输。在工作时相机通过通信接口完成跟踪伺服机构的工程参数传输及图像数据传输。

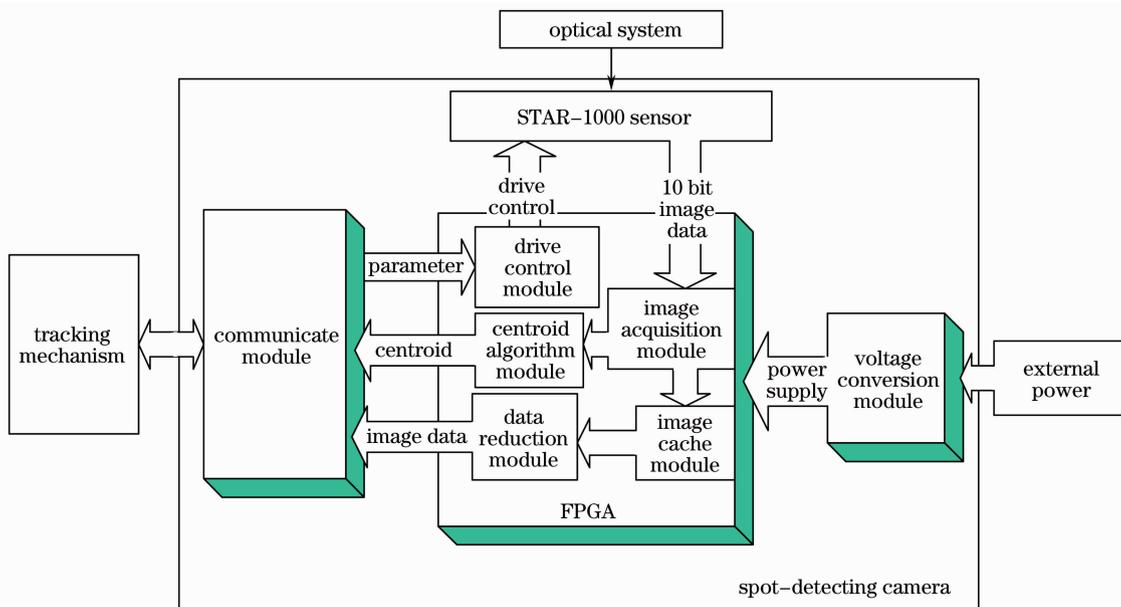


图 1 相机的系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of camera system

目前比较常用的光斑位置提取算法主要是形心算法和质心算法等^[5]。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, 使用较为广泛。质心算法基于平面几何中求质心的原理, 探测系统将算得的光斑质心位置作为信标激光光斑的能量中心。探测器光敏面上图像光强分布为 $v(x, y)$, 其中 (x, y) 表示图像像元在探测器焦平面坐标系中的位置, 通过

$$\left\{ \begin{aligned} C_x &= \frac{\sum_{(x,y) \in S} xW(x,y)}{\sum_{(x,y) \in S} W(x,y)} \\ C_y &= \frac{\sum_{(x,y) \in S} yW(x,y)}{\sum_{(x,y) \in S} W(x,y)} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

计算得到的图像灰度质心 (C_x, C_y) , 即为光斑的能量中心^[6]。其中 $W(x, y)$ 为质心计算过程中的权重,

在激光通信时信标光的光斑灰度值应大于背景灰度值,可以通过阈值来区分背景与光斑像元。则权重 $W(x, y)$ 的计算方式为

$$W(x, y) = \begin{cases} v(x, y) - T, & v(x, y) \geq T \\ 0, & v(x, y) \leq T \end{cases}, \quad (2)$$

式中 T 为区分光斑和背景而设置的阈值。由(1)式和(2)式可得,只要在最终计算质心的除法运算中保留商小数点后足够多的位数,计算精度可以任意地提高。但是探测相机的质心提取精度不能由该计算精度来衡量,探测器本身的性能和相机光学系统等诸多因素最终决定了真正的定位精度。

3 影响光斑定位精度的因素分析

3.1 相机噪声误差

在对探测相机进行静态的定位精度测试时,发现当信标光能量设定不变,光斑不做任何移动时,提取到得质心数据依旧存在着一个微小的抖动。这种抖动在很大程度上是由相机电路中的噪声所引起的。相机的噪声包括探测器上信号和背景的散弹噪声、暗电流及相机电路的读出噪声等,这些噪声对探测误差的影响称为噪声等效角 f_{NEA} ,对质心提取算法为^[7]

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

式中 S 为信号; Δt 为曝光时间; N 为质心窗口半峰全宽; N_p 为质心窗口像素总数,等于 $(2N+1)^2$; R_F 为单个像素 1σ 固定噪声; $V_{ar}(R_F)$ 为固定噪声对应

的等效信号; R_T 为单个像素上的背景信号,包括杂散光和暗电流。

由(3)式可知, f_{NEA} 与信噪比(SNR)成反比,因此增大信号强度或者减少噪声都可以降低 f_{NEA} ;另外光斑的大小也会影响 f_{NEA} ,可通过减小光斑大小来减小 f_{NEA} ,但这个方法最终会受到光学衍射极限的限制。为了抑制相机电路噪声应选用低噪声、高动态范围的探测器,在输出电路中尽量减少放大电路数量,可增加滤波电路并使用较高分辨率的 ADC 电路。或者采用集成化程度较高的探测器,减少系统复杂程度,减少引入噪声的环节。

3.2 像元填充因子有限引入的误差

对于采用 CMOS 探测器的光斑定位系统,由于其像元的填充因子有限,会造成像元量化光斑时像元灰度的空间非均匀性,从而造成点扩展函数畸变,致使成像系统获取数字化像点与“真实”的被测对象在能量分布上存在微量偏差^[8]。而对于实现动态光斑位置探测的相机来说,这种偏差必将导致相机探测到得质心位置与光斑位置真实值不同,影响定位精度。另一方面当光斑的细分程度越高,数字化光斑与真实光斑越接近,量化误差越小。因此当像元尺寸固定,像元填充因子和有效光斑直径是影响定位精度的重要因素。可通过 Matlab 来仿真不同像元填充因子、不同有效光斑直径条件下光斑移动时的定位精度,建立它们与定位精度的关系。

在仿真之前要建立与实验中相近的光斑模型,在激光通信中使用的光束多为高斯光束,而基模高斯光场的数学表达式为^[9]

$$u(r, z_b) = E_0 \frac{\omega_0}{W(z_b)} \exp\left\{-i[kz_b - \eta(z_b)] - r^2 \left[\frac{1}{W^2(z_b)} + \frac{ik}{2R(z_b)} \right]\right\}, \quad (4)$$

式中 $W(z_b) = \omega_0 \sqrt{1 + z_b^2/z_0^2}$, $R(z_b) = z_b(1 + z_b^2/z_0^2)$, $\eta(z_b) = \arctan(z_b/z_0)$, $z_0 = n_0 \pi \omega_0^2/\lambda$ 。而 z_b 为光轴上一点到束腰的距离, ω_0 为束腰半径, n_0 为介质的折射率, $k = 2\pi/\lambda$ 为光波的波数, λ 为光波的波长, E_0 为初始场强, r 为参考平面上的点与光轴的距离。由于光斑的质心探测中只关心像元上的灰度值,即光强,可不关心光束的相位。因此将(4)式归一化处理后得到简化后的光强函数:

$$E(r, z_b) = \exp\left[-\frac{r^2}{W^2(z_b)}\right]. \quad (5)$$

当相机在通信光路上的位置及光学系统确定后, $W(z_b)$ 为常数,其值等于探测面上光斑强度下降为光轴中心 e^{-2} 处点距光轴的距离。在后续验证实验中当大于阈值的有效光斑直径为 11 pixel 时,在 $r=4$ pixel 处得到光强约为中心光强的 e^{-2} ,可认为此时的 $W(z_b) \approx 4$ 。

根据这些实验参数,得到修正后与实验中探测器阵面上有效光斑分布相近的光强函数:

$$E(x, y) = \exp\left[-\left(\frac{11}{D}\right)^2 \cdot \frac{(x-D/2)^2 + (y-D/2)^2}{4^2}\right], \quad \sqrt{\left(x-\frac{D}{2}\right)^2 + \left(y-\frac{D}{2}\right)^2} < D,$$

$$E(x,y) = 0, \quad \sqrt{\left(x - \frac{D}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{D}{2}\right)^2} \geq D, \quad (6)$$

式中 D 为大于阈值的有效光斑直径, 光斑起始的中心位置在 $(0.5D, 0.5D)$ 。仿真过程如图 2 所示, 考虑简单情况, 将一个像元分为弱感光区域和感光区域, 感光区域为中间正方形, 设一维方向上的像元占空比为 p 。光斑从起始点在一维方向上以 0.06 pixel 的步长移动 20 步。每移动一次重新计算光斑质心。

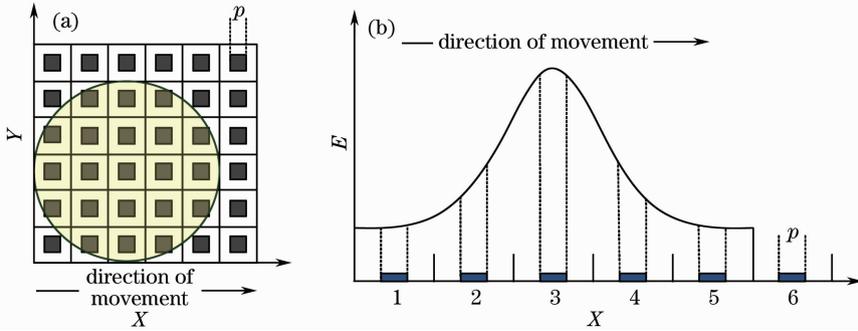


图 2 光斑移动示意图。(a)平面图;(b)截面图

Fig. 2 Diagrams of spot movement. (a) Planar view; (b) sectional view

3.2.1 像元填充因子的影响

用 Matlab 软件仿真像元填充因子的影响, 仿真中有效光斑直径为 5 pixel, 弱感光区域不感光。在不同像元占空比 p 下仿真光斑移动过程中的质心变化。理想的质心位置变化应该是一条起始点为 $(2.5, 2.5)$, 斜率为 0.06 的直线。计算仿真得到的质心位置与理想值的误差, 即为定位误差。仿真结果如图 3 所示。

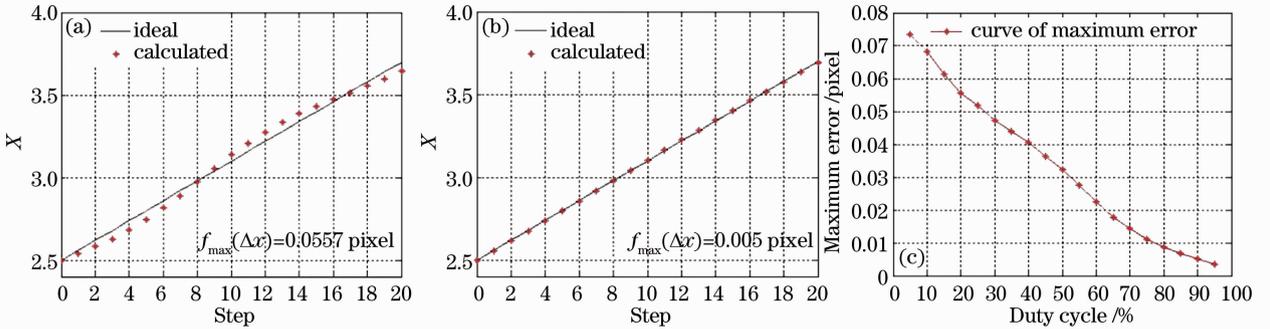


图 3 占空比仿真。(a) $p=20\%$; (b) $p=90\%$; (c) 最大误差随占空比的变化曲线

Fig. 3 Simulation for duty cycle. (a) $p=20\%$; (b) $p=90\%$; (c) curve of maximum error

仿真中随着像元占空比的上升, 光斑移动过程中质心计算值与理想值的误差 $f_{\max}(\Delta x)$ 在逐渐减小, 变化曲线如图 3(c) 所示。说明当有效光斑直径确定, 在探测光斑质心位置时像元占空比上升可减小定位误差, 提高定位精度。

3.2.2 有效光斑直径的影响

为研究有效光斑直径的影响, 在 Matlab 软件仿真时设定像元占空比 $p=80\%$ 不变, 因为实际 CMOS 探测器像元除感光区外的部分也有一定感光能力, 所以在仿真中改善模型, 设置弱感光区域感光能力为感光区的 60% 。对不同有效光斑直径下光斑移动过程中最大的定位误差进行仿真分析。仿真结果如图 4 所示。

当有效光斑直径在扩大过程中, 一方面光斑的

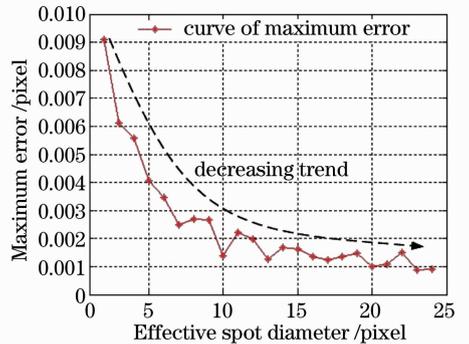


图 4 有效光斑直径仿真

Fig. 4 Simulation for effective spot diameter

细分程度更高, 提高了定位精度; 另一方面光斑的弥散程度也在加强, 使能量分布变得均匀, 减弱了(1)式中加权值 $W(x,y)$ 的作用, 降低了定位精度进一

步提高的能力。从仿真结果来看随着光斑直径的变大,最大定位误差呈下降趋势,趋向于一个较低的误差值,但误差不会消失。

4 实验验证

对 STAR1000 探测相机进行定位测试,并对影响定位精度的两个因素(像元占空比和有效光斑直径)进行实验验证。实验系统如图 5 所示,STAR1000 探测器像元尺寸为 $15\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$,镜头焦距为 90 mm,

一个像元对应 $166.7\ \mu\text{rad}$ 。平行光管为 5 m,二维可调精密位移平台一维方向上移动 $50\ \mu\text{m}$,对应移动 $10\ \mu\text{rad}$,即在探测面上对应移动 0.06 pixel。为减少外界的震动干扰,整个实验平台都安放在具有隔振效果的气浮平台之上。实验过程中,调节位移平台使光斑在探测面的一维方向上移动,每次位移平台移动 $50\ \mu\text{m}$,移动 20 步,以覆盖光斑移动一个像元的现象。

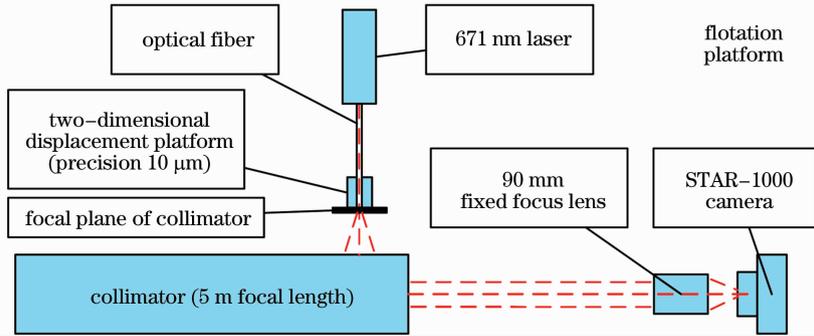


图 5 实验系统

Fig. 5 Experimental system

4.1 噪声误差实验

调节光强和镜头焦距使探测面上有效光斑直径为 7 pixel,在探测面 X 轴方向上一维移动光斑,每次移动完成稳定后连续拍摄 100 幅图像并计算质

心,分析处于静态时质心的抖动现象(即噪声情况),调节镜头使有效光斑直径为 11 pixel,重复上述实验。实验结果如图 6 所示,可以看到光斑直径为 7 pixel 时[图 6(a)、(b)]质心的抖动要小于有效光

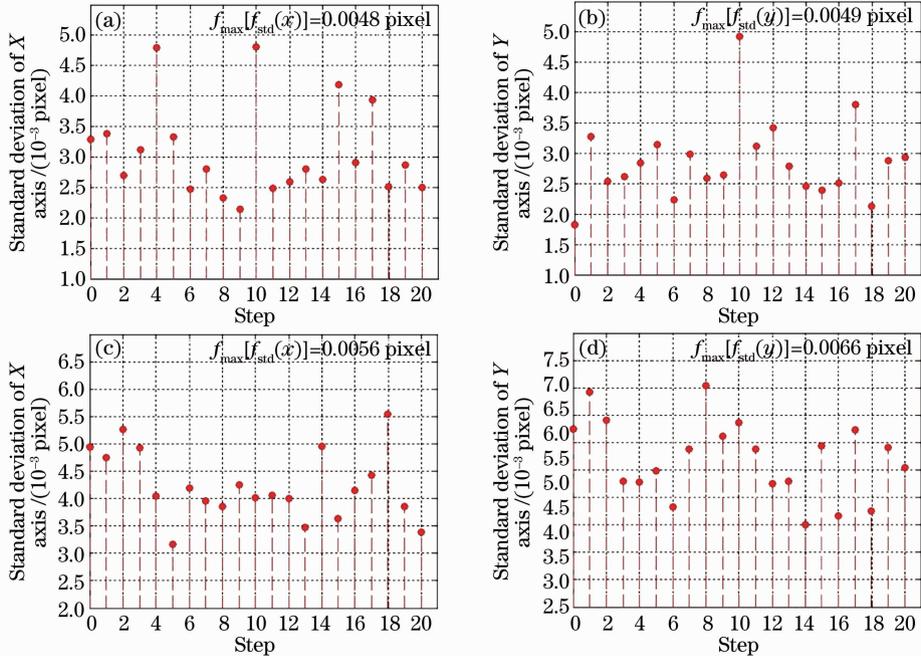


图 6 噪声误差实验数据。(a) $D=7$ pixel 时 X 轴抖动;(b) $D=7$ pixel 时 Y 轴抖动;(c) $D=11$ pixel 时 X 轴抖动;(d) $D=11$ pixel 时 Y 轴抖动

Fig. 6 Experimental data of noise errors. (a) Jitter of X-axis($D=7$ pixel); (b) jitter of Y-axis($D=7$ pixel); (c) jitter of X-axis($D=11$ pixel); (d) jitter of Y-axis($D=11$ pixel)

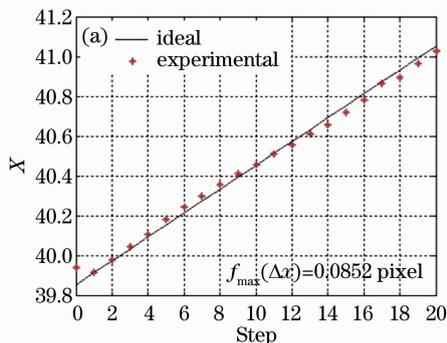
斑直径为 11 pixel[图 6(c)、(d)]的情况。实验证明光斑的汇聚程度越高、信号越强,对相机的噪声误差抑制效果越佳。

由于 STAR1000 探测器使用了双相关采样技术,且内部集成 ADC 降低了系统复杂度,相机电路噪声引起的误差已大大减小。可以看到在两次实验中质心在两个轴向上的标准差[$f_{std}(x)$ 和 $f_{std}(y)$]均不到 0.007 pixel。对于跟瞄精度要求 $\pm 2 \mu\text{rad}$ 、单个像元对应 $4 \mu\text{rad}$ 的跟瞄系统来说,这样小的噪声误差对定位精度影响已可忽略。所以,通过减小有效光斑直径来增大信噪比、减小噪声误差,进而提高定位精度的效应也可以忽略。有效光斑直径对定位精度的影响主要体现在光斑的数字量化过程中。

4.2 动态的定位精度实验

4.2.1 占空比的影响实验

STAR1000 探测器像元 X 轴向、Y 轴向上的占空比并不相同, $p_x > p_y$ 。检测相同有效光斑直径下(有效光斑直径 7 pixel),两次实验分别向两个轴向



上一维移动光斑,验证占空比对定位误差带来的影响。由于移动步数和质心值之间的关系是线性的,斜率为 0.06 pixel,因此可用一元线性回归的方法来拟合理想的光斑移动方程:

$$\bar{m} = b_0 + bh, \quad (7)$$

式中 h 为移动步数, \bar{m} 为质心数据, b 为斜率 0.06,而 b_0 的计算公式为

$$b_0 = \frac{(\sum_{t=1}^{21} h_t^2)(\sum_{t=1}^{21} m_t^2) - (\sum_{t=1}^{21} h_t m_t)^2}{21 \sum_{t=1}^{21} h_t^2 - (\sum_{t=1}^{21} h_t)^2} =$$

$$\bar{m} - 0.06\bar{h}, \quad (8)$$

\bar{m} 为一次实验 21 个质心数据(移动 20 步的质心数据加上起始位置)的均值, \bar{h} 为移动步数的均值为 10。实验中得到的质心值与方程的偏差即为动态定位误差。

实验结果如图 7 所示。X 轴向上移动的定位误差要优于 Y 轴向上移动的定位误差,而占空比 $p_x > p_y$,这也验证了像元占空比越大动态定位误差越小。

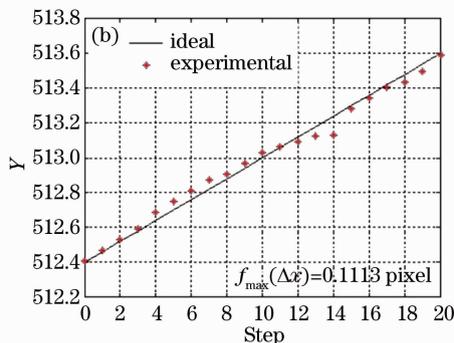


图 7 占空比实验数据。(a) X 轴上一维移动;(b) Y 轴上一维移动

Fig. 7 Experimental data of duty cycle. (a) Move on X-axis; (b) move on Y-axis

4.2.2 有效光斑直径的影响实验

实验中保持激光光强不变,调节镜头焦距使光斑在探测面上适当离散以达到需要的有效光斑直径。在有效光斑直径为 5、7、9、11、13 pixel 时,分别

测试光斑在 X 轴向上移动时的最大定位误差。实验结果如图 8 所示,当有效光斑直径扩大时,动态最大定位误差与仿真结果相似,呈下降趋势。可以看到落在探测阵面上的有效光斑直径从 5 pixel 上升

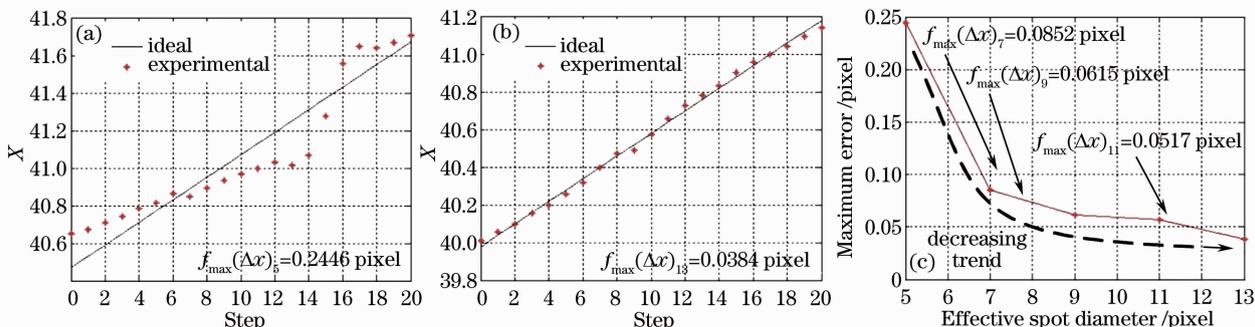


图 8 有效光斑直径影响。(a) $D=5$ pixel;(b) $D=13$ pixel;(c) 最大误差随光斑的变化曲线

Fig. 8 Influences of effective spot diameter. (a) $D=5$ pixel; (b) $D=13$ pixel; (c) curves of maximum error

为 13 pixel 时, 定位误差从 0.2446 pixel 降至 0.0384 pixel。对于单个像元对应 4 μrad 的探测系统来说, 定位精度已经从 1 μrad 优化到 0.15 μrad , 足以满足跟瞄精度要求 $\pm 2 \mu\text{rad}$ 的 ATP 系统。

5 结 论

提出了在 ATP 系统中由于 CMOS 探测器缺陷造成的定位精度问题。分析了影响定位精度的 3 个重要因素(噪声、像元占空比、有效光斑直径)。使用 Matlab 软件得到了仿真结论: 像元占空比越高, 有效光斑直径越大, 定位误差越小。通过搭建的相机实验平台得到了与仿真结论相符的实验结论。实验中的相机探测器采用了双相关采样技术且集成了 ADC, 由噪声引起的定位误差已小于 0.007 pixel。当调节光学系统, 使落在探测阵面上的有效光斑直径从 5 pixel 上升为 13 pixel 时, 定位误差可从 0.2446 pixel 优化至 0.0384 pixel, 定位精度大为提高, 足以满足跟瞄系统的需求。

从以上的实验与结论可以看到, 针对激光通信 ATP 系统在设计基于 CMOS 器件的光斑探测相机时, 为提高探测精度必须采用有效的降噪技术, 使用较高像元占空比的探测器, 并且需要调节光学系统以适当增大有效光斑直径。

参 考 文 献

- 1 Liu Liren. Laser communications in space I optical link and terminal technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 2~3
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007,

34(1): 2~3

- 2 Liu Liren. Laser communications in space II test and verification techniques on the ground[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 149~155
刘立人. 卫星激光通信 II 地面检测和验证技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 149~155
- 3 Fu Ping. Research on chancing vertical smearing of frame transfer array CCD image sensor [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2004, **26**(1): 72~75
傅 平. CCD 图像传感器拖尾的研究[J]. 压电与声光, 2004, **26**(1): 72~75
- 4 Zhang Liang, Wang Jianyu, Jia Jianjun *et al.*. Design and performance of fine tracking system based on CMOS for quantum communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0205008
张 亮, 王建宇, 贾建军等. 基于 CMOS 的量子通信精跟踪系统设计及检验[J]. 中国激光, 2011, **38**(2): 0205008
- 5 Liu Yunqing, Jiang Huilin, Tong Shoufeng. Study on stabilizational racking 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
- 6 Yu Siyuan, Han Qiqi, Ma Jing *et al.*. Size selection of dispersive spot imaging on CCD in a satellite optical communication terminal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 67~71
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[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 67~71
- 7 Shinhak Lee. Pointing accuracy improvement using model-based noise reduction method[C]. *SPIE*, 2002, **4635**: 65~71
- 8 Zeng Guiying, Xie Yuan. Sub-pixel locating accuracy for a CMOS imaging system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(7): 70~73
曾桂英, 解 源. CMOS 成像系统亚像元定位精度研究[J]. 光电工程, 2011, **38**(7): 70~73
- 9 Li Yongliang. Research on Key Technologies of Laser Beam Propagation Simulation and Properties of the Satellite-to-Ground Laser Communication Links[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. 14~16
李永亮. 星地激光通信中光束传输仿真和链路特性关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011. 14~16

栏目编辑: 王晓琰