

# 基于空频域特征的白天星地信标光跟踪算法

张子玄<sup>1,2</sup>, 贾建军<sup>1,2\*</sup>, 强佳<sup>1</sup>, 张亮<sup>1,2</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** 提出了一种白天信标光图像跟踪算法。分析了太阳光反射进相机视场的噪声以及探测器噪声在空域和频域的特点,使用两个频域滤波器检测候选区域。研究表明,所提算法具有较高的精度、较快的速度以及较高的可靠性,可用于白天环境下星地信标光的跟踪探测。

**关键词** 光通信; 捕获跟踪瞄准系统; 信标光跟踪; 频域滤波

**中图分类号** TN919.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201946.0206004

## Daytime Satellite-to-Ground Beacon Tracking Algorithm Based on Spatial and Frequency Domain Features

Zhang Zixuan<sup>1,2</sup>, Jia Jianjun<sup>1,2\*</sup>, Qiang Jia<sup>1</sup>, Zhang Liang<sup>1,2</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

**Abstract** A beacon image tracking algorithm during daytime is proposed. The camera view field noise reflected by sunlight and detector noise in the spatial and frequency domains are analyzed. Two frequency domain filters are used to detect candidate regions. The results show that the algorithm has high precision, high speed, and high reliability, and can be applied to the daytime satellite-to-ground beacon tracking.

**Key words** optical communications; acquisition, tracking and pointing system; beacon tracking; frequency filter

**OCIS codes** 060.2605; 070.2615; 100.4999

## 1 引 言

空间激光通信与量子通信具有保密性好、通信速率高以及功耗低等优点,得到越来越多的重视,逐渐成为星地信息传输的重要手段,在当今的民用与军用领域均有很好的应用前景<sup>[1]</sup>。目前包括中国在内的多个国家均完成了星地激光通信实验<sup>[2-4]</sup>,现行星地激光通信捕获跟踪的过程大多基于对信标光的跟踪探测机制。我国于 2016 年 8 月发射的“墨子号”量子科学实验卫星的量子通信和激光通信再一次证明了这种机制的实用性。但是,目前基于信标光跟踪的激光通信受限于物理条件,只能在晴朗的夜间进行通信,这限制了通信的时效性与数据量。

为获得更多的卫星通信数据,可以从增加通信次数和提高传输速率两方面入手。因此利用卫星在白天经过地面站的时间进行通信是一种很好的解决方法。

星地链路建立的优劣关键在于其通信系统中的捕获跟踪瞄准(ATP)子系统的跟踪精度<sup>[5]</sup>。白天光通信中,主要的挑战在于对信标光的稳定跟踪。虽然目前跟踪系统中均配置了窄带滤光片,但由于太阳光频谱分布宽,在探测波段内仍存在较大的背景干扰。采用降低曝光时间等手段虽然能够降低背景强度,但同时也造成了信标光强度的损失,仍存在个别场景下出现突发亮背景目标干扰。因此需要研究针对白天跟踪探测的算法。

收稿日期: 2018-09-14; 修回日期: 2018-10-22; 录用日期: 2018-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(U17382042)、国家重点研发计划(2017YFA0303900)

\* E-mail: jjun10@mail.sitp.ac.cn

研究白天的信标光跟踪算法存在两个难点:1)需克服白天的背景辐射噪声影响,白天阳光充足,地面尤其是云层的反射较为强烈,跟踪相机易受到干扰,导致跟踪虚假目标,从而影响了初始捕获以及跟踪精度;2)需克服相机噪声影响,比如坏点<sup>[6]</sup>与条状噪声<sup>[7]</sup>,在夜间进行实验时,背景噪声几乎不存在,可以利用区域分割以及阈值质心算法等多种方法滤除噪声,但是白天的背景较强,并且卫星与云层都在运动,区域分割以及阈值质心算法几乎不可行。基于以上两个难点,需要考虑合适的算法来实现稳定精确地跟踪,并能配合跟踪系统完成光闭环。

目前已存在一些针对 ATP 跟踪系统特殊工况的跟踪算法,但是均没有很好地解决白天星地链路的跟踪问题。如美国搭载于国际空间站的通信终端 OPALS (Optical Payload for Lasercomm Science)<sup>[8]</sup>设计主要基于一种用于白天跟踪的算法,这种算法首先寻找像素最大值点,然后将最大值点的周围点作为背景,将这一区域内的像素值与背景进行比较,如果像素值大于背景的个数多于一个提前设定的阈值,则为信标光。结果表明,在无云的条件该算法可以完成白天跟踪。但是,在实际使用中,当存在飞行器或者其他噪声影响时,跟踪不稳定。文献[9]提出了一种利用直方图均值化寻找阈值的方法,解决了夜间湖面光通信的信标光跟踪问题。文献[10]提出了一种使用邻域像素灰度拟合方法,较好地克服了大气扰动对信标光的影响。文献[11]主要解决了恒星背景光干扰导致跟踪精度下降的问题,提出了对质心坐标序列进行傅里叶变换(FFT)的去噪方法。文献[12]提出了一种应用于大气激光通信的光斑快速检测方法,该方法使用改进约束共轭梯度迭代算法对退化的激光光斑快速复原。

本文详细分析了白天背景噪声与信标光在空域与频域上的特征,提出了一种两个频域滤波器相配合的信标光跟踪算法,实现了利用频域对疑似信标光点的定位,再利用空域对疑似点进行筛选,最终得到准确结果;根据卫星拍摄的白天背景图像和实际信标光光斑建立大量的仿真图像,对算法精度、速度和稳定性进行了分析;将算法植入实物跟踪系统,测试算法在实际环境中的跟踪效果。

## 2 算法原理

### 2.1 白天信标光图像频域特性

数字图像可以看作是一个二维函数。通过傅里叶变换可以将相机采集到的空域信息转换到频域:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp \left[ -2\pi i \left( \frac{x \times u}{M} + \frac{y \times v}{N} \right) \right], \quad (1)$$

式中: $M$ 和 $N$ 分别为图像的宽度和长度; $f(x, y)$ 表示图像在 $(x, y)$ 处的像素值; $F(u, v)$ 表示 $(u, v)$ 点处的频域值。

图像的频域信息反映了图像灰度值变化的剧烈程度。卫星对地面站建立链路时,主要观测到的背景噪声为云层,云层大面积连在一起,属于低频噪声。当存在信标光光斑,会出现比云层更高的频率。对于探测器噪声,白天跟踪的主要影响因素为坏点,可以将其近似为椒盐噪声。相比周围背景,椒盐噪声一般为孤立的点,属于频率更高的区域。所以,对图像进行带通滤波理论上可以得到信标光光斑。图1(a)、(c)分别为对“墨子号”量子科学实验卫星实际拍摄的白天背景图像添加椒盐噪声与信标光光斑后进行仿真的结果,其中红框内为信标光,蓝框中为噪声,图1(a)中信标光强度较大,图1(c)中信标光强度较小。为了测试噪声的影响,在测量时添加了较多的噪声点。对仿真图像进行傅里叶变换并将其移动至中心,计算与复频域中心距离相同的点的幅值累加和,以对数作为纵坐标、距离作为横坐标。分别在原图、添加信标光和添加信标光与椒盐噪声三种情况下计算距离与幅值,并进行统计,得到如图1(b)、(d)所示的图像。图1(b)中黄色框内添加信标光与添加噪声的频域响应幅值基本重合,并且明显高于背景。从图1(b)紫框中能清楚地看到三种情况的差别。在高频段,如图1(b)中绿色框所示,背景与添加信标光的频域响应幅值相近,且与添加噪声情况下的差别较为明显。图1(c)所示的是高强度背景噪声、低强度信标光的情况。由图1(d)可以看出,由于背景较强,低频段信标光与背景基本重合,只有在中高频段可以看出信标光与背景噪声的区别。添加椒盐噪声和添加信标光的中频段有一小部分重合,但是由于背景噪声过强,信标光与背景重叠较多。

### 2.2 频域滤波器设计

由第2.1节可知,为了检测信标光,可以提取中频段靠后位置并舍弃高、低频段。但仅提取中频段信息不能恢复出信标光图像,在设计滤波器时还需要保留一定程度的低频段信息,所以巴特沃斯滤波器是一个较好的选择。提取信标光时存在两种可行方案:1)使用空域中值滤波器将噪声滤除,再使

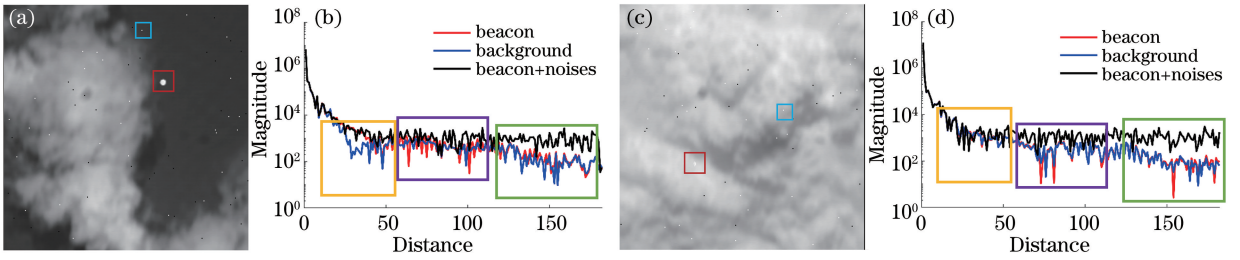


图 1 白天信标光频域特性。(a)高强度信标光仿真图像;(b)对应于图 1(a)的频域响应幅值与中心距离间的关系;(c)低强度信标光仿真图;(d)对应于图 1(c)的频域响应幅值与中心距离间的关系

Fig. 1 Frequency features of daytime beacon. (a) Simulation image of high intensity beacon; (b) frequency-domain response corresponding to Fig. 1(a) versus central distance; (c) simulation image of low intensity beacon; (d) frequency-domain response corresponding to Fig. 1(c) versus central distance

用高通滤波器提取信标光,但是在信标光光斑很小时,中值滤波有可能将信标光滤除;2)使用带通滤波器滤除噪声并提取信标光,但是在强背景噪声条件下仅使用带通滤波器去除椒盐噪声较为困难,需要不断使用空域判断条件迭代来找出信标光位置,这就影响了计算速率。这里提出一种利用两个频域滤波器相互配合的信标光提取算法。设计带通滤波器,在低阻部分使用 2 阶巴特沃斯滤波器,滤除最低频率信息的同时保留一部分中间频率的信息,频率越大保留的信息越多。高阻部分使用 4 阶巴特沃斯滤波器加快截断,即

$$\begin{cases} H_{hp}(u, v) = \frac{1}{1 + (\sqrt{2} - 1)[D_0/D(u, v)]^{2n}} \\ H_{ls}(u, v) = \frac{1}{1 + [D(u, v)/D_1]^{2r}} \\ H(u, v) = H_{hp} \cdot H_{ls} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $H_{hp}$ 为高通滤波器传递函数; $H_{ls}$ 为低通滤波器传递函数; $H$ 为带通滤波器传递函数; $\cdot$ 表示矩阵 Hadamard 乘积; $D(u, v)$ 表示点 $(u, v)$ 到中心的距离; $n$ 与 $r$ 为滤波器阶数; $D_0$ 和 $D_1$ 分别为高通通过频率与低通截止频率。

图像的空域可以看作不同复频率的叠加,需要在图像一个明暗周期内具有一定的分辨能力。考虑信标光信噪可能比较低,需要在周期内有 4 个值。图像开窗大小为  $256 \times 256$  个像素,所以可选的像素数范围为  $51.2(256/5) \sim 85.3(256/3)$ ,为使间隔信息不固定,尽可能遍历更多的像素,像素数不选 64。结合图 1 中信息,综合考虑选择设置高通通过频率  $D_0$  为 60 个像素,低通截止频率  $D_1$  为 70 个像素。

### 2.3 信标光空域特征与基于空域信息的判别方式

由于星地通信中星地终端距离很远,但是镜头口径很小,因此可以利用夫琅禾费衍射公式推测光斑的光强分布<sup>[13]</sup>:

$$E(P) = C' \int_0^R \int_0^{2\pi} \exp[-ikr\theta \cos(\varphi - \Psi)] r d\varphi dr, \quad (3)$$

式中: $R$ 为相机镜头半径; $C' = -iA \exp(ikf)/(\lambda f)$ ,其中 $A$ 为入射光场振幅, $k$ 为波数, $\lambda$ 为波长, $f$ 为焦距; $Q(r, \varphi)$ 为相机镜头上任意一点,其中 $r, \varphi$ 分别表示极坐标下的极径和极角; $P(\rho, \psi)$ 为焦平面上一点,其中 $\rho, \psi$ 分别表示极坐标下的极径和极角; $\theta$ 为衍射角。

化简(3)式并将其代入贝塞尔函数,得到 $P$ 点的光强  $I = I_0 [2J_1(kR\theta)/(kR\theta)]^2$ ,其中 $J_1$ 为一阶贝塞尔函数, $I_0$ 为中心点光强。地面信标光在星上探测器成像光斑的光强分布基本符合贝塞尔函数,得到主亮斑的直径近似为

$$D = 1.22\lambda f/R. \quad (4)$$

由于入射光不一定直接照射在像元中心,星地链路容易受到大气湍流的影响,导致光斑变形,因此相机实际拍摄到的光斑最大值有 1~4 个。考虑信标光能量较强的情况、光斑旁瓣以及成像系统非理想等条件,信标光为孤立点的可能性很小。最亮点周围像素亮度按距离依次递减。因此在确定信标光光斑时需要在其周围发现递减的像素点。

第 2.1 节中提出利用两个滤波器相互配合能够解决大多数问题,但是仅根据滤波后响应寻找傅里叶逆变换(IFFT)后的最大值,在面对一些特殊工况时会出现跟踪错误。因此提出了两个基于空域信息的附加判别条件。

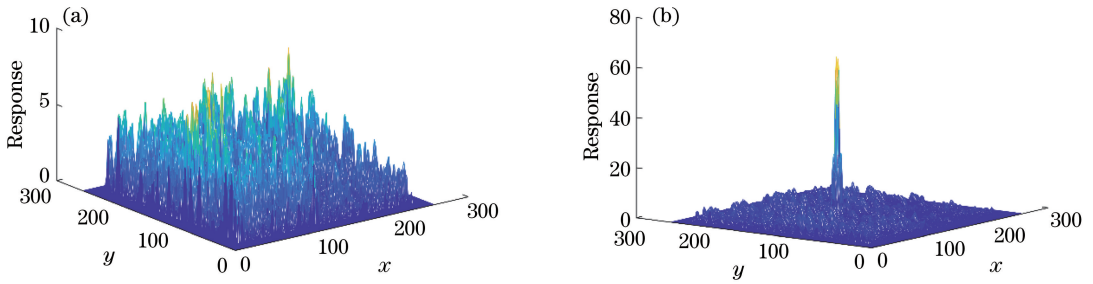


图 2 有无信标光条件下的滤波响应对比。(a) 无信标光; (b) 有信标光

Fig. 2 Comparison of filtering response between with and without beacon light. (a) Without beacon; (b) with beacon

第一个附加判别条件是评估傅里叶逆变换后的相应最大值是否大于阈值。图 2(a) 为无信标光时的滤波响应, 图 2(b) 为同一张图像添加信标光后的响应。在有信标光的条件下使用傅里叶逆变换后, 响应最大值位置较为准确, 但是当信标光不存在时, 不能给出正确结果。这个判别条件主要可以筛选图像中没有信标光、图像信标光较弱或者被中值滤波滤除的情况。第二个判别方式是峰值周围像素值的判别方法。在最高值点周围一定有与其亮度相差不多的点, 这些点的亮度会随着距离的增加而衰减, 并且这些点亮度应该高于背景。当信标光与周围对比度较低且噪声点出现在背景较弱的地方时, 噪声点较难去除。如图 3(a)

所示, 其中红色框中为目标, 黑色框中为噪声点, 信标光较弱, 周围背景较强, 同时噪声点周围背景较弱。从图 3(b) 中可以看出, 红色框中的目标响应略小于黑色框中的噪声点响应。仅使用最大值不能得到准确结果。因此, 提出了一种新的判别方法, 即先找到滤波后结果图中的最大值点, 在原图像中以该点为中心寻找最大像素值, 然后在最大值点周围最邻近的 8 个像素中寻找与最大值点差值小于 20 且高于更外围背景的像素个数, 当像素个数大于阈值时, 认为该点为目标点。由前所述, 光斑主斑覆盖 4 个像素的概率最大。选择 4 个像素有可能会漏检, 但是在实际跟踪中错检的危害明显大于漏检, 因此选择周围像素的个数为 4。

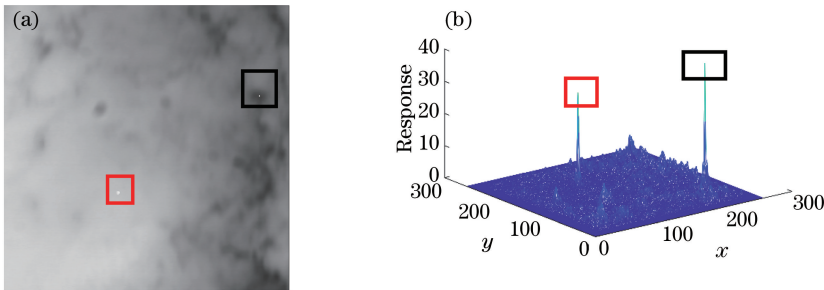


图 3 特殊工况下的带通滤波器响应图。(a) 仿真图像; (b) 响应图像

Fig. 3 Band pass filter response under special working condition. (a) Simulation image; (b) response image

## 2.4 算法小结

所提算法的流程如图 4 所示。其中  $T_1$  为条件判断的阈值。所提算法与美国国际空间站已经在轨验证

过的算法<sup>[8]</sup>的区别如表 1 所示。与 OPALS 上的算法相比, 所提算法能很好地解决信标光强度小于背景噪声强度以及存在突发性坏点的情况下信标光的跟踪。

表 1 所提算法与 OPALS 上的算法比较

Table 1 Difference between our algorithm and algorithm on OPALS

Item	Proposed algorithm	Algorithm on OPALS
Working condition	Satellite-to-ground beacon tracking during daytime	Satellite-to-ground beacon tracking during daytime
Domain	Spatial and frequency	Spatial
Beacon band	Visible light	Near-infrared
When beacon intensity is less than background noise	Satisfied	Dissatisfied
When defective pixel is suddenly appeared	Satisfied	Dissatisfied

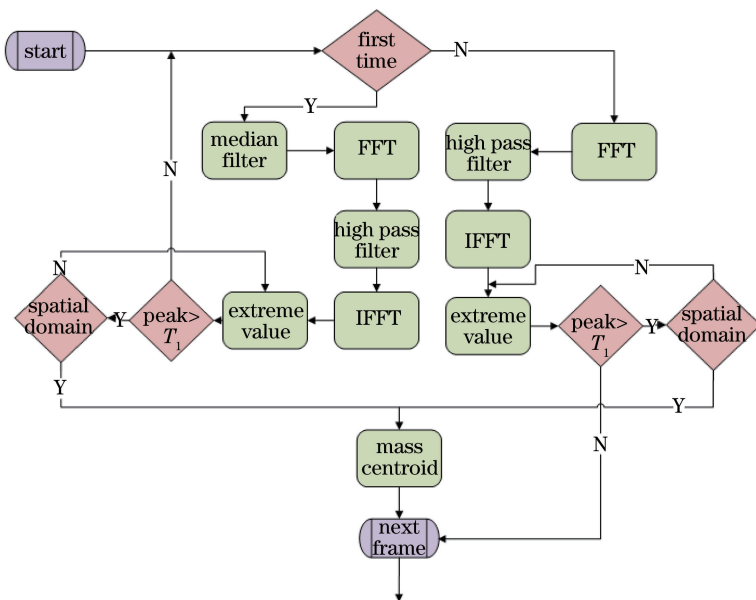


图 4 所提算法的流程

Fig. 4 Flow of proposed algorithm

### 3 仿 真

仿真图像的建立是将实际拍摄到的白天背景与夜间跟踪光斑进行合成。其中白天的背景采用“墨子号”实际拍摄到的 16 张白天有云背景图像,在这 16 张背景图像上分别添加 200 个不同位置的信标光,构成 3200 张仿真图像。使用实际夜间通信中拍摄到的 50 张不同信标光光斑图像组成信标光库。在合成图像时,随机选取信标光库内的信标光,添加光斑的位置可表示为

$$\begin{cases} x = 48 \times \sin(2\pi i/200) + 128 \\ y = 48 \times \sin(2\pi i/200 + \pi/3) + 128 \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $i$  表示图像编号。在图像上添加密度为 0.001 的椒盐噪声。图 5 为 16 张选用背景,其中的红色点是计算出的信标光轨迹,每张背景图编号如图 5 左上角所示。

对上述的 3200 张图像进行连续检测,保持所设置的参数不变,并统计误差,如图 6 所示。图 6(a)为在统计得到的每个背景中检测到的目标点与理论目标点之间的欧式距离的平均值,由于 12 号背景噪声复杂,所以误差相比其他背景较大。图 6(b)为利用图 5(a)中的背景图像 1,在 200 个不同位置的  $x$  和  $y$  方向的误差。可以看出,所提算法对于仿真图像跟踪具有较高的精度,其误差控制在 0.3 pixel 内,并且所有背景图像中的仿真图像均跟踪成功。统计对应的计算时间,得到的计算速度为 127.6 frame/s,该速度满足粗跟踪实际

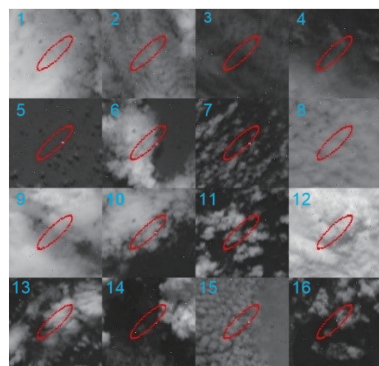


图 5 仿真图像

Fig. 5 Simulation maps

控制带宽的需求。结果表明,所提算法在理论上具有较好的可行性,在运算速度与精度上均能满足实际要求。在不使用频域判断的条件下,仅使用高通滤波器时,在 3200 幅仿真图中会有 249 frame 跟踪到错误区域,而单独使用带通滤波器时,仅有 3 frame 能实现跟踪。相较于之前算法,所提算法在仿真时能得到较为准确且快速的结果。

### 4 跟踪系统实验

#### 4.1 跟踪系统介绍

图 7(a)为所用的跟踪测试系统,图 7(b)为动态测试环境。使用激光器在墙面上的散射光斑模拟信标光。

#### 4.2 开环定位误差分析

测量开环定位误差的主要方法是在测试时保持

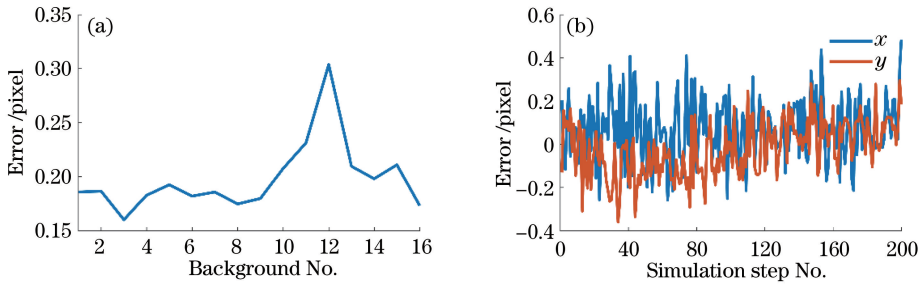


图 6 仿真图像误差。(a)全部背景平均误差;(b)图 5 背景 1 中的误差

Fig. 6 Simulation image error. (a) Mean error of all background; (b) error of background 1 of Fig. 5

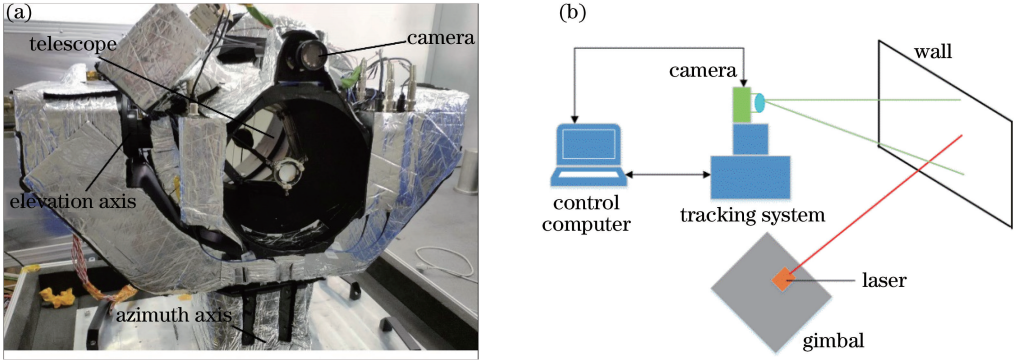


图 7 测试系统与环境。(a)测试系统;(b)测试环境示意图

Fig. 7 Testing system and environment. (a) Testing system; (b) schematic of testing environment

信标光位置不动,转台指向不同的角度,记录算法得到的信标光质心结果。图 8 为测试环境,红框内为信标光光斑。使用转台连续转动一个很小的固定角度,完成一个往返行程,利用记录算法计算得到光斑质心。对其中前一半行程结果进行拟合。由于后一半行程与前一半行程方向相反,步进相同,根据前一半行程的拟合结果参数可以直接计算后一半行程的理论位置,得到拟合结果与实测结果的误差。由于算法在  $x, y$  方向的计算方法相同,并且转台控制方法也相同,所以在此以  $x$  方向为例。图 9 为在  $x$  方向以步进  $0.0005^\circ$  转动,往复运动距离为  $0.0255^\circ$  时得到的原始数据,拟合结果与实际计算结果如图 9(a)所示,两者误差如图 9(b)所示。计算得到后

半段拟合与测试结果之间的误差有效值为  $0.081 \text{ pixel}$ ,相机分辨率为  $52 \mu\text{rad}$ ,误差为  $4.2 \mu\text{rad}$ 。



图 8 信标光图像

Fig. 8 Photo of beacon

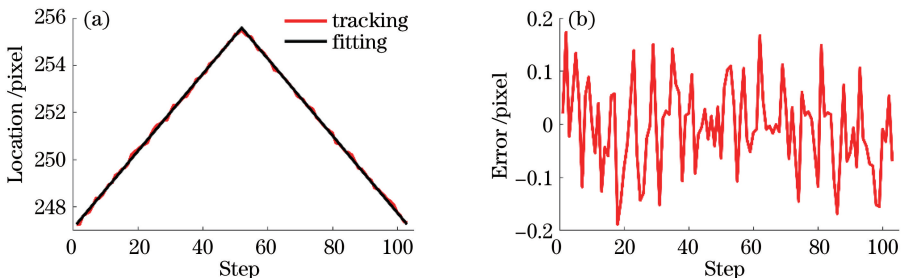


图 9  $x$  方向实际跟踪结果与拟合值。(a)实际跟踪结果与拟合值;(b)拟合误差

Fig. 9 Actual tracking result and fitting value in  $x$  direction. (a) Actual tracking results and fitting value; (b) fitting error

### 4.3 闭环跟踪误差分析

将所提算法计算的质心结果引入控制系统中进行闭环测试,测试方式如图 7(b)所示,其稳定跟踪状态时的跟踪结果示意图如图 10 所示。计算得到稳定跟踪状态的跟踪误差为 0.25 pixel。所提算法对于跟踪系统的精度影响不大,该算法得到的结果较好。

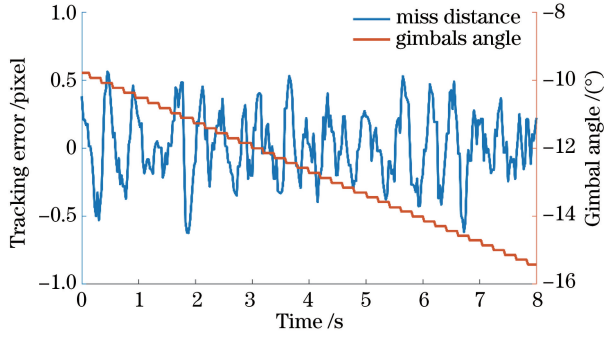


图 10 动态跟踪误差

Fig. 10 Dynamic tracking error

## 5 结 论

为了克服白天星地通信中遇到的背景噪声以及探测器自身噪声等问题,提出了一种基于频域和空域特性的白天信标光跟踪算法。分析了白天光通信过程中背景噪声、探测器噪声以及信标光光斑在空域与频域上的特性,设计了两种频域滤波器(即高通滤波器与带通滤波器)相配合的跟踪算法。使用高通滤波配合图像中值滤波,可提高运算速度,但是高通滤波配合中值滤波对微弱信标光的检测能力弱,所以需配合使用带通滤波器。将傅里叶逆变换响应数值的大小和信标光的空域特征作为判断依据,进一步过滤不合适的假目标以确定目标准确位置。对所提算法进行了仿真图像测试和系统集成测试。仿真图像使用“墨子号”量子科学实验卫星实际拍摄的白天云层背景图像与夜间通信信标光光斑,并添加噪声。结果表明算法准确度在 0.3 pixel 以内,具有较高的精度,且速度较快,可满足实际应用需求。实际跟踪系统实验通过静态定位的精度测试和动态跟踪测试进行系统集成测试,以验证所提算法的有效性。实验结果证明所提算法的定位精度较高,受背景亮度影响小,动态处理速度与精度可以满足实际跟踪系统需求。

### 参 考 文 献

[1] Jiang H L, Tong S F, Zhang L Z. 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] Oaida B V, Wu W, Erkmen B I, *et al.* Optical link design and validation testing of the Optical Payload for Lasercomm Science (OPALS) system [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8971: 89710U.

[3] Jono T, Takayama Y, Shiratama K, *et al.* Overview of the inter-orbit and the orbit-to-ground laser communication demonstration by OICETS [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6457: 645702.

[4] Sova R M, Young D W, Juarez J C, *et al.* 80 Gb/s free-space optical communication demonstration between an aerostat and a ground terminal [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6304: 630414.

[5] 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.

[6] Qian F, Jia J J, Zhang L, *et al.* Defective pixel correction of spot-detecting camera in satellite-to-ground laser communication ATP system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5): 0505007.  
钱锋, 贾建军, 张亮, 等. 星地激光通信 ATP 系统探测相机的坏点校正 [J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505007.

[7] Chen S J, Zhang L, Wang J Y. Effect of stripe noise of detector on light spot location of fine tracking system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0906008.  
陈少杰, 张亮, 王建宇. 探测器条状噪声对精跟踪系统光斑定位的影响 [J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0906008.

[8] Abrahamson M J, Biswas A. Achieving operational two-way laser acquisition for OPALS payload on the International Space Station[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9354: 935408.

[9] Zuo T, Xiao Y J, Huang H B. Design and experiment of coarse tracking for beacon on the lake surface in FSO communications [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2012, 23(3): 489-494.  
左韬, 肖永军, 黄海波. 湖面自由空间光通信信标光的粗跟踪设计与实验 [J]. 光电子 • 激光, 2012, 23(3): 489-494.

[10] Zhang L. Research on beacon spot image algorithm in satellite-ground optical communication [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.  
张丽. 星地光通信中的信标成像光斑定位算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

- [11] Zhang Z P. Study in the algorithm of beacon light prediction and tracking in satellite laser communication [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.  
张志平. 空间光通信信标光预测跟踪算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [12] Gao S J, Sheng L, Wu Z Y, *et al.* Rapid restoration and real-time detection on spot image of atmospheric laser communication [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(8): 2393-2399.  
高世杰, 盛磊, 吴志勇, 等. 大气激光通信光斑图像的快速复原与实时检测[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2393-2399.
- [13] Yu S Y, Han Q Q, Ma J, *et al.* Size selection of dispersive spot imaging on CCD in a satellite optical communication terminal [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(1): 69-73.  
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): 69-73.