

面阵探测器点目标探测随机误差度量方法研究

刘负负^{1,2}, 王旭^{1,2}, 张亮^{1,2*}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 为了提高星地光通信中捕获跟踪瞄准系统的目标探测精度, 需要对面阵探测器上信标光斑位置探测的随机误差进行高精度分析评估。基于影响光斑探测的多种随机因素, 建立了不依赖于目标信号点扩散函数的质心定位噪声等效角 (NEA) 模型, 并仿真了不同因素对 NEA 的影响。结果显示, 不同目标信号点扩散函数下的 NEA 的变化趋势相似: 随噪声的增大而增大, 随信号强度的增大而减小, 随光斑半径的增大而增大。不同目标信号点扩散函数下所计算出的 NEA 数值不同, 最大差异小于 30%。研究结论为目标位置探测的随机误差提供了测量方法和理论分析依据, 对远距离星地光通信链路的建立与保持具有重要意义。

关键词 探测器; 质心探测; 面阵探测器; 噪声等效角; 光通信

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0404001

Measurement Method of Random Errors in Spot Target Detection by Flat-Panel Detector

Liu Fufu^{1,2}, Wang Xu^{1,2}, Zhang Liang^{1,2*}

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

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

Abstract In order to improve the target's detection accuracy of the acquisition, tracking, and pointing system used in satellite-to-ground optical communications, the analysis and evaluation with high precision are needed for the random errors influencing the position determination of the beacon spots on the flat-panel detector. Considering a variety of random factors influencing spot detection, a noise equivalent angle (NEA) model for the centroid localization which is not dependent on the point spread function of target signals is established and the influences of different factors on the NEA are simulated. The results show that the change trend of NEA value under each point spread function of target signals is similar. It increases with the increase of noise, decreases with the increase of signal intensity, and increases with the increase of spot radius. The NEA values calculated under different point spread functions of target signals are different, but the maximum difference is less than 30%. The research result provides a new measurement method and a theoretical analysis basis of random errors existing in target position detection, and is of great significance to the establishment and maintenance of long-distance satellite-to-ground optical communication links.

Key words detectors; centroid detection; flat-panel detector; noise equivalent angle; optical communication

OCIS codes 040.1490; 040.5160; 060.2605; 250.0040

收稿日期: 2020-08-25; 修回日期: 2020-09-24; 录用日期: 2020-10-10

基金项目: 上海市青年科技启明星项目(19QA1410400)、上海市市级科技重大专项(2019SHZDZX01-ZX01)

* E-mail: zhliang@mail.sitp.ac.cn

1 引言

激光链路的构建是空间光通信的核心技术之一。空间光通信系统的信号光束散角较小,需要利用捕获(Acquisition)、跟踪(Tracking)、瞄准(Pointing)系统(ATP系统)^[1]来实现激光链路的构建。ATP系统采用面阵探测器检测目标位置,目标信标光斑在面阵探测器上的位置变化与跟踪机构形成闭环控制,实现了外界扰动下的目标精确跟踪指向。因此,信标光斑的定位误差在终端光学系统焦距确定的情况下会直接影响目标位置的确定,进而影响整个 ATP 系统的探测精度^[2]。

由于距离遥远,空间光通信中面阵探测器上接收的信标光斑目标一般信噪比较低,此外由于背景辐射、大气湍流,探测器材料和制作工艺等因素的影响^[3-4],理论计算出的星点目标质心位置和实际质心位置之间存在误差,且这些误差按照来源可简单分为系统误差和随机误差两部分^[5-6]。系统误差本质上是星点定位算法中采用像元几何中心坐标代替像元真实能量中心坐标进行计算而引入的误差。系统误差的分布呈现以像元尺寸大小为周期的规律性变化,因此找到该变化规律即可对其进行补偿^[5]。随机误差主要来源于成像过程中产生的各种噪声,如响应非均匀性噪声、读出噪声、暗电流噪声和散粒噪声等。非均匀性响应噪声可以在后期通过两点校正、多项式校正、逐像素点校正等方法^[7-11]进行补偿,但这些方法得出的响应非均匀性受到光子散粒噪声、暗噪声、读出噪声等大量随机因素的影响,无法最大程度地进行平场校正^[12]。其他随机噪声一般在设计图像采集电路时采取针对性的措施或采用暗场图像校正、多幅图像单向素时域均值处理等方法予以尽量去除^[5,12],也可通过一些滤波和阈值算法^[13-14]将目标信号与背景噪声分离以进一步提高信噪比。但是,基于目前的硬件发展水平以及信标光斑星点小目标的特征,这些方法在增加计算开销、提高系统复杂度的同时,容易使光斑质心产生偏移从而引入更大的定位误差^[15]。

目前,已经实现了 1000 km 级的星地量子通信^[16],但未来需要发展到 10000 km 及更远距离以提高实用化水平,链路指向精度将由目前的 μrad 提高到 100 nrad 以下,目标探测的随机误差将会成为 ATP 系统不可忽略的关键问题。为了对面阵探测器的目标定位随机误差进行高精度定量化的衡量,本文面向星地量子通信对链路建立的需求,考虑多

种导致信标光斑位置探测随机误差的因素,包括探测器本底噪声、光照强度和光斑尺寸等,建立了质心定位的随机噪声等效角模型,典型工况仿真证明了此数学模型的合理性。

2 目标位置探测原理与信号模型

2.1 质心定位算法

质心定位算法具有计算简单、稳定性好的优点,是星点目标探测领域最常见的定位算法。在该方法中,探测器平面内信标光成像的实际位置等效于像平面的能量重心。由于面阵探测器像元大小的有限性,所得到的信标光斑图像中的每个像元的响应值实际是面阵探测器经模/数转换得到的采样值^[17],因此质心定位算法可表示为

$$x_c = \frac{\iint_{(x_i, y_j) \in s} x_i D(x_i, y_j)}{\iint_{(x_i, y_j) \in s} D(x_i, y_j)} \approx \frac{\sum_{j=1}^{N_2} \sum_{i=1}^{N_1} x_i D(x_i, y_j)}{\sum_{j=1}^{N_2} \sum_{i=1}^{N_1} D(x_i, y_j)}, \quad (1)$$

$$y_c = \frac{\iint_{(x_i, y_j) \in s} y_j D(x_i, y_j)}{\iint_{(x_i, y_j) \in s} D(x_i, y_j)} \approx \frac{\sum_{j=1}^{N_2} \sum_{i=1}^{N_1} y_j D(x_i, y_j)}{\sum_{j=1}^{N_2} \sum_{i=1}^{N_1} D(x_i, y_j)}, \quad (2)$$

式中: $D(x_i, y_j)$ 是面阵探测器上横、纵坐标分别为 x_i, y_j 的像元响应值; s 为参与星点信标光斑质心计算的空间区域; i, j 分别为横、纵坐标轴方向的像元编号; N_1, N_2 分别为横、纵坐标轴方向的像元个数。

2.2 噪声信号的分布模型

引起探测随机误差的噪声按照能量分布形式可进一步描述为均匀分布噪声、高斯分布噪声和泊松分布噪声。均匀分布噪声主要指量化噪声,是在图像由模拟输出电压转化为数字电压时引入,一旦探测器和模拟数字转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)模块电路确定后,量化噪声就为一定值。高斯分布噪声主要包括暗电流噪声和读出噪声^[18]。泊松分布噪声主要包括光子散粒噪声和暗电流散粒噪声。

由于泊松噪声是一种信号依赖噪声,随着信号的增强而增大,且平均光子噪声等于入射光子数的平方根;高斯噪声是由光敏器件中电子热随机运动产生的一种加性白噪声,无论光照强度是多少,噪声的平均水平不变。因此为了便于分析,本文忽略在探测器和 ADC 模块电路确定时固定不变的量化噪

声和可以在后期补偿的响应非均匀性噪声,仅考虑高斯分布噪声和泊松分布散粒噪声。

2.3 信标光斑点扩散函数模型

如果不考虑弥散斑的影响,根据目标面积是否可以充满观测相机的分辨率视场,将空间目标在探测器上的成像分为点目标或面目标。如果目标的面积不能充满相机瞬时视场的覆盖范围,空间目标的成像为

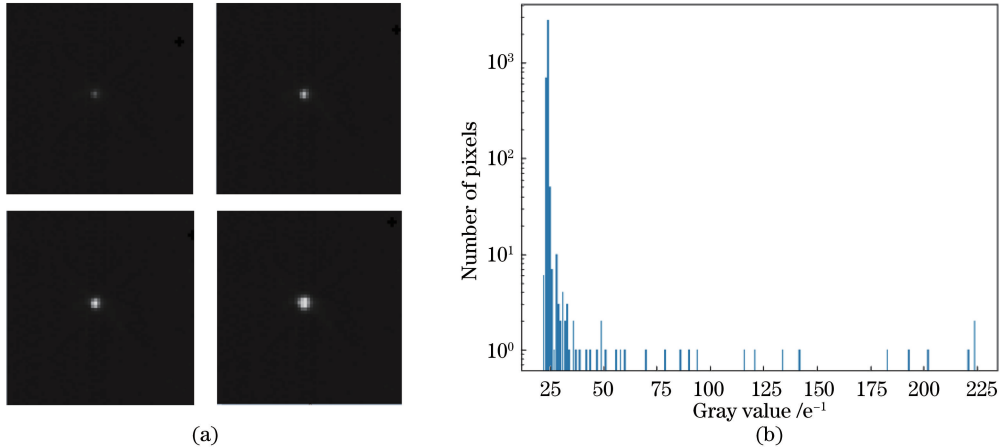


图 1 原始星点图和星点灰度直方图。(a)原始星点图;(b)星点灰度直方图

Fig. 1 Original star spot images and star spot gray histogram. (a) Original star spot images; (b) star spot gray histogram

由于远距离下的光信号传输受光学系统中孔径光阑衍射效应的影响,将图 1(a)中点状信标光斑进一步放大细分,所成图像为夫琅禾费衍射图样,即艾里光斑,如图 2 所示。可以看出,光斑的入射能量呈中心高、四周低的近似二维高斯分布的空间形态。所以在实际研究中,将会聚在探测器上的艾里光斑分布模型近似为二维高斯分布模型^[14],数学表达式为

$$D(x_i, y_j) = D_0 \exp \left\{ - \left[\frac{(x_i - x_0)^2}{r_x^2} + \frac{(y_j - y_0)^2}{r_y^2} \right] \right\}, \quad (3)$$

式中:\$(x_0, y_0)\$为光斑能量的中心位置;\$r_x, r_y\$分别为横、纵坐标轴方向上的点扩散函数半径;\$D_0\$为光斑的中心能量值。

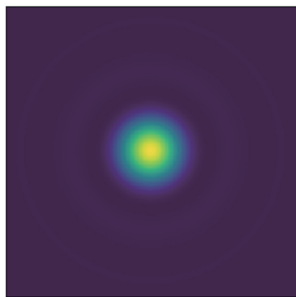


图 2 衍射斑图像

Fig. 2 Diffraction spot pattern

点目标,否则成像为面目标^[19]。根据相机实际所采集到的信标光斑图像,如图 1(a)所示,探测器的面元尺寸为 60 pixel×60 pixel,目标光斑所占据的最大像素数目约为 6 pixel×6 pixel,即目标所占据的像素数目不到像素总数的 1%。在像素灰度分布直方图中表现为没有明显的双峰,如图 1(b)所示,可知本文研究主要针对的是点目标,其中 e^{-1} 表示电子数。

3 随机噪声等效角模型的建立

3.1 传统噪声等效角模型

噪声等效角(NEA)模型是将目标位置探测的随机误差等效为目标角度信息的度量。工业界中已有的 NEA 模型^[20]为

$$N_E = \frac{1}{F_S \sqrt{R_{SN}}}, \quad (4)$$

式中:\$N_E\$为噪声等效角;\$R_{SN}\$为信标光斑在焦平面上成像的功率信噪比;\$F_S\$为探测器的斜率系数,与光斑的空间强度分布和空间尺寸有关。若光斑直径为 \$\theta_{beam}\$,对于艾里光斑,\$F_S = 4.14/\theta_{beam}\$;对于高斯光斑,\$F_S = 1.27/\theta_{beam}\$。

3.2 基于质心定位的 NEA 模型

因为面阵探测器得到的信标光斑图像是 \$D(x_i, y_j)\$ 在像元位置的采样值,所以各像元之间互不相关或相关系数很小,各像元的随机误差可近似是相互独立的^[17]。因此,面阵探测器上信标光斑位置探测的随机误差可认为是由各像元探测的随机误差叠加而成的,进而可以按照函数随机误差计算方法^[21]建立另一种形式的 NEA 模型。以 \$x\$ 坐标方向上的 NEA 为例,令

$$N_E^2 = f[D(x_1, y_1), D(x_2, y_2), \dots, D(x_{N_1}, y_{N_2})], \quad (5)$$

式中: $f(\cdot)$ 为噪声等效角和探测器像元响应值之间的函数关系。基于质心定位算法^[17]原理, N_E^2 可

$$N_E^2 = \text{var}(x_c) = \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \text{var} \left[\frac{x_i D(x_i, y_j)}{D(x_i, y_j)} \right] = \left[\frac{\partial f}{\partial D(x_1, y_1)} \right]^2 \delta_{D(x_1, y_1)}^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial D(x_2, y_2)} \right]^2 \delta_{D(x_2, y_2)}^2 + \dots + \left[\frac{\partial f}{\partial D(x_{N_1}, y_{N_2})} \right]^2 \delta_{D(x_{N_1}, y_{N_2})}^2 = \left\{ \frac{\partial \left\{ \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \left[\frac{x_i D(x_i, y_j)}{D(x_i, y_j)} \right] \right\}}{\partial D(x_1, y_1)} \right\}^2 \delta_{D(x_1, y_1)}^2 + \left\{ \frac{\partial \left\{ \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \left[\frac{x_i D(x_i, y_j)}{D(x_i, y_j)} \right] \right\}}{\partial D(x_2, y_2)} \right\}^2 \delta_{D(x_2, y_2)}^2 + \dots + \left\{ \frac{\partial \left\{ \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \left[\frac{x_i D(x_i, y_j)}{D(x_i, y_j)} \right] \right\}}{\partial D(x_{N_1}, y_{N_2})} \right\}^2 \delta_{D(x_{N_1}, y_{N_2})}^2, \quad (6)$$

式中: $\text{var}(\cdot)$ 是光斑质心计算的随机误差; $\delta_{D(x_i, y_j)}^2$ 是坐标为 (x_i, y_j) 的像元的随机误差。根据噪声信号的分布特征, $\delta_{D(x_i, y_j)}^2$ 可表示为

$$\delta_{D(x_i, y_j)}^2 = \text{var}[R_1(x_i, y_j)] + \text{var}[R_F(x_i, y_j)] + R_T(x_i, y_j)\Delta t, \quad (7)$$

式中: $R_1(x_i, y_j)$ 是坐标为 (x_i, y_j) 的像元的散粒噪声; $R_F(x_i, y_j)$ 是坐标为 (x_i, y_j) 的像元的读出噪声; $R_T(x_i, y_j)$ 是坐标为 (x_i, y_j) 的像元的暗电流噪声; Δt 为曝光时间。根据散粒噪声的信号依赖性, 坐标为 (x_i, y_j) 的像元的散粒噪声所带来的随机误差近似为像元响应值大小^[18], 因此坐标为 (x_i, y_j) 的像元的随机误差可进一步表示为

$$\delta_{D(x_i, y_j)}^2 = D(x_i, y_j) + \text{var}[R_F(x_i, y_j)] + R_T(x_i, y_j)\Delta t. \quad (8)$$

此外, 对于面阵探测器接收到的信标光斑图像, 无论是艾里分布还是高斯分布, 其像元响应值均满足以下条件: 当中心位置像元的响应值最大时, 与中心位置距离相同的像元的响应值相同; 与中心像元所在的行或列距离相同的两行或两列像元的响应值相同。基于像元响应值分布的对称性, 可对所建立的 NEA 模型作进一步化简。假设横、纵坐标轴方向上的光斑直径 d 均为 $2N+1$ 个像元, 每个像元的坐标等于其坐标的下标, 即 $x_i = i, y_j = j$, 并令

$$T = \sum_{j=1}^{2N+1} \sum_{i=1}^{2N+1} x_i D(x_i, y_j), \quad (9)$$

$$S = \sum_{j=1}^{2N+1} \sum_{i=1}^{2N+1} D(x_i, y_j), \quad (10)$$

则有

$$T = (N+1) \times S, \quad (11)$$

$$N_E^2 = \frac{S^2 - 2 \times S \times T + T^2}{S^4} \sum_{j=1}^{2N+1} \delta_{D(x_1, y_j)}^2 + \frac{(2S)^2 - 2 \times (2S) \times T + T^2}{S^4} \sum_{j=1}^{2N+1} \delta_{D(x_2, y_j)}^2 + \dots + \left[\sum_{j=1}^{2N+1} \delta_{D(x_{2N+1}, y_j)}^2 \right] \times \left[\frac{(2N+1)^2 S^2}{S^4} - \frac{2 \times (2N+1) S \times T}{S^4} + \frac{T^2}{S^4} \right] = \sum_{i=1}^{2N+1} \left\{ \left[\frac{i^2}{S^2} - \frac{2 \times (N+1) \times i}{S^2} + \frac{(N+1)^2}{S^2} \right] \times \sum_{j=1}^{2N+1} \delta_{D(x_i, y_j)}^2 \right\}. \quad (12)$$

由此可见, 所推导的 NEA 计算模型仅与信标光斑半径 N 、目标信号强度 S 以及噪声 $\delta_{D(x_i, y_j)}^2$ 有关, 当信标光斑点扩散函数模型发生变化时, 不需要实时调整某个或某些参数。

在特殊条件下, 当曝光时间极短, 暗电流导致的随机误差可以忽略不计, 每个像元的高斯白噪声都为均值且目标光斑能量分布为均匀性分布时, 所建立的 NEA 模型又可精简为

$$N_E^2 = \frac{N(N+1)}{3S} +$$

$$\frac{N(N+1)}{3S^2} (2N+1)^2 \text{var}[R_F(x_i, y_j)] = \frac{N(N+1)}{3} \times \left\{ \frac{S + (2N+1)^2 \times \text{var}[R_F(x_i, y_j)]}{S^2} \right\}. \quad (13)$$

此种情况下容易得出, N 和 $\text{var}[R_F(x_i, y_j)]$ 越大 NEA 越大, S 越大 NEA 越小。但此种情况多

适用于利用地球热图像作为探测目标以实现深空光通信终端的捕获、定位、跟踪功能的方案中^[22-24]。图 3 为可见地球图像与热图像。

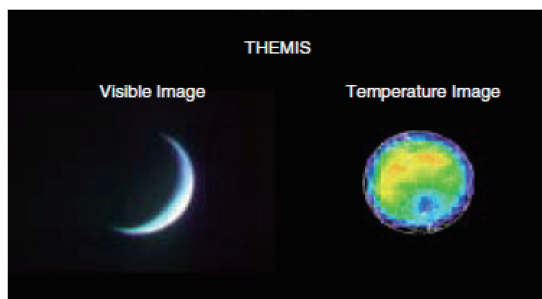


图 3 可见地球图像与热图像^[23]

Fig. 3 Visible Earth image and thermal image^[23]

3.3 NEA 模型对比

综上所述,基于质心定位的 NEA 模型在通用性和随机误差求解精度方面优于传统 NEA 模型。因为在传统 NEA 模型中,求解目标探测随机误差时不仅需要信噪比(R_{SN})、光斑直径(θ_{beam})等参数,还需要根据不同的目标光斑点扩散函数模型实时调整 F_s 。当抖动或大气湍流等因素导致光斑图像模糊或形状不规则时,此种模型下还没有合适的方法计算 F_s 参数,如果仍然按照某种典型分布方式计算 F_s ,将会为 NEA 的求解带来误差。基于质心定位的 NEA 模型不需要根据信标光斑点扩散函数模型的变化实时调整某个或某些参数,其仅与光斑直

径 d 、信号总强度 S 以及噪声 $\delta_{D(x_i, y_j)}^2$ 有关,且这三个参数可以根据采集到的信标光斑图像获得。

4 仿真计算与分析

为了验证所建立的信标光斑质心定位 NEA 模型的合理性,本文对不同光斑点扩散函数模型、不同光照强度、不同噪声水平和不同光斑尺寸条件下的 NEA 进行仿真。同时为了覆盖实际面阵探测器接收到的信标光斑的大小和信号强度,仿真参数的设置如表 1 所示,其中光信号总强度 S 的取值间隔为 $5000 e^{-1}$,信标光弥散斑直径 d 的取值间隔为 1 pixel,高斯噪声强度的标准差 δ 的间隔取为 $5 e^{-1}$,强度的均值 μ 取为 0。三种目标信号点扩散函数模型的能量分布形式如图 4 所示。

表 1 求解 NEA 的仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting for NEA calculation

Simulation parameter	Content
Spot diameter	2-20 pixel
Signal intensity	5000-100000 e^{-1}
Full image size	128 pixel
Fill factor	1
Intensity of shot noise	\sqrt{S}
Intensity of Gaussian noise	$\mu=0, \delta=0-50 e^{-1}$
Point spread function of target signals	Uniform distribution, Gaussian distribution, and Airy distribution

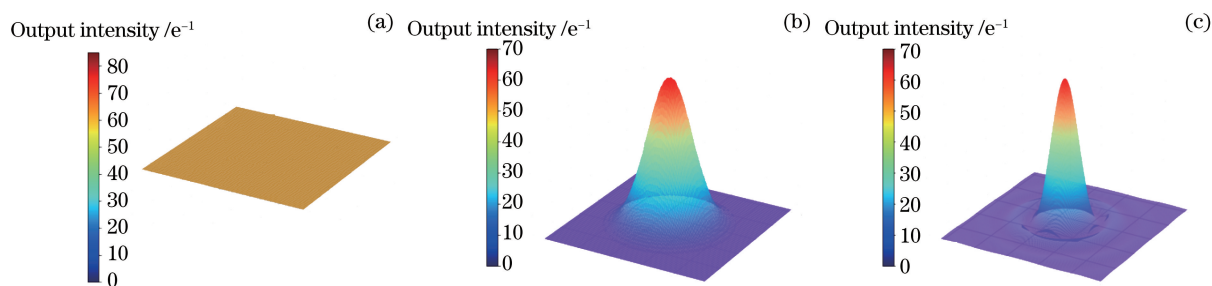


图 4 三种信号能量分布模型。(a)均匀分布;(b)高斯分布;(c)艾里分布

Fig. 4 Three signal energy distribution models. (a) Uniform distribution; (b) Gaussian distribution; (c) Airy distribution

图 5(a)、(b)、(c)分别为单个随机影响因素下基于质心定位的 NEA,可以得出以下结论。

1) 不同模型下的 NEA 都由于高斯噪声的加入而增大,噪声越大 NEA 越大。同一噪声下,不同模型的 NEA 数值不同。艾里分布的 NEA 小于高斯分布和均匀分布,噪声越小不同信号分布下的 NEA 差值越大,最大差值为 29.8%。

2) S 值变化时,三种模型的 NEA 变化趋势一

致但数值不同,艾里分布的 NEA 数值小于其他两种分布。不同分布的 NEA 最大差异为 18.2%, S 越大差异越小。

3) d 值变化时,三种模型的 NEA 变化趋势仍然一致。当 d 值小于 5 pixel 时不同模型的 NEA 数值几乎相同;当 d 值大于 5 pixel 时,艾里分布的 NEA 数值小于其他两种分布,且 d 值越大不同信号分布下的 NEA 差值越大,最大差值为 25.7%。

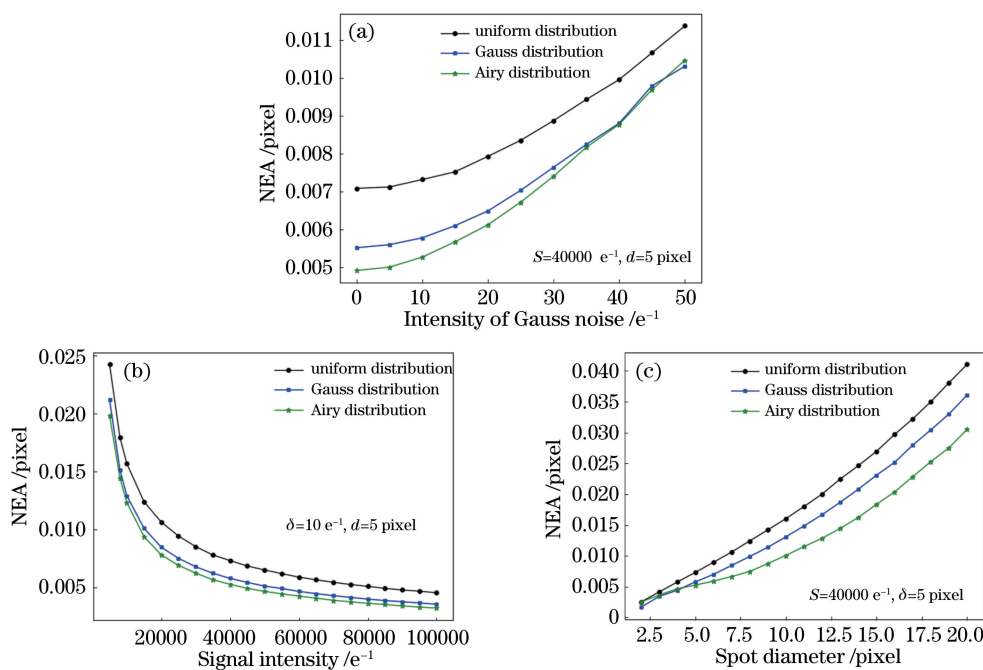


图 5 单个随机影响因素下的 NEA。(a) 噪声水平; (b) 信号强度; (c) 光斑大小

Fig. 5 NEA under single random influencing factor. (a) Noise level; (b) signal intensity; (c) spot diameter

根据上述分析,得到三种目标信号点扩散函数模型下的 NEA 随光斑直径 d 和光照信号强度 S 的变化趋势,如图 6 所示,进一步可以得到如下结论。

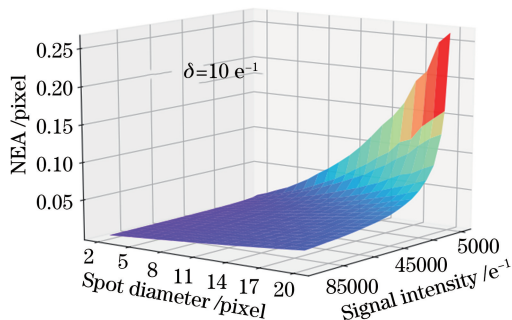


图 6 NEA 的分布趋势

Fig. 6 Distribution trend of NEA

1) 噪声条件不变时,不同点扩散函数模型下的 NEA 都随着 d 的增加而增加,随着 S 的增加而减少,因此减小 d 或增加 S 时 NEA 的数值会减小。

2) S 值较小时,NEA 随 d 值变化的幅度明显; S 值较大时,NEA 随 d 值变化的幅度不明显。因此,在受到光学衍射极限的限制,光斑尺寸不可改变的情况下,在 S 值较小范围内通过增大信号强度以降低 NEA 是可取的。

3) 不同模型下的 NEA 都由于噪声的加入而增大,故减少噪声也可以降低 NEA。

4) 不同目标信号分布的 NEA 数值不同,最大差异小于 30%。当需要满足高帧频高计算速率时,

可按照均匀分布模型下的噪声等效角求解公式计算出初始的 NEA,加上相应模型间的差异值即为实际所求解的 NEA 数值。

仿真结果与工业界 NEA 模型随信噪比和光斑尺寸变化的结果一致,符合探测器信噪比高或光斑直径小则信标光斑探测精度高的特性,间接证明了所建立的 NEA 模型的合理性。

5 结 论

综合影响信标光斑位置探测的多个随机因素,建立了衡量光斑质心定位随机误差大小的数学模型 NEA。仿真分析了不同因素对 NEA 的影响以及 NEA 随外界条件的变化趋势。结果表明,当光斑尺寸小于 5 pixel,信号强度大于 25000 e⁻¹,高斯噪声低于 10 e⁻¹ 时,三种模型的 NEA 均小于 0.01 pixel;信号强度越大,噪声越小,信标光斑半径越小,随机误差则越小,反之亦然,这符合面阵探测器信噪比高或光斑直径小则目标探测精度高的特性。

此外,所建立的 NEA 模型仅需信号总强度、光斑尺寸和高斯噪声三个参数,不需要根据光斑信号点扩散函数的改变实时调整参数,不仅为随机误差的抑制和消除提供了一种更加便捷的理论评定方法,而且对于模糊或形状不规则的光斑图像,仍可利用此种方法计算随机噪声等效角。所提随机噪声等

效角模型可为更高精度 ATP 系统的发展提供一定参考。

参 考 文 献

- [1] Gregory M, Heine F F, Kämpfner H, et al. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(3): 031202.
- [2] Cao Y, Li B Q, Li H T, et al. High-accuracy star sensor centroid algorithm based on star image resampling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0712003.
曹阳, 李保权, 李海涛, 等. 基于星点像重采样的星敏感器高精度质心算法[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0712003.
- [3] 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.
- [4] Cao M H, Wu X, Wang H Q, et al. Performance of faster-than-Nyquist optical communication system under Gamma-Gamma atmospheric turbulence [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0906003.
曹明华, 武鑫, 王惠琴, 等. Gamma-Gamma 大气湍流下超奈奎斯特光通信系统性能[J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0906003.
- [5] Jiang L, Zhang L G, Zhang X X, et al. Compensation for star centroid systematic error of star trackers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0314001.
姜亮, 张立国, 张星祥, 等. 星敏感器星点定位系统误差补偿[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0314001.
- [6] Yang J, Zhang T, Song J Y, et al. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(4): 1002-1010.
杨君, 张涛, 宋靖雁, 等. 星点质心亚像元定位的高精度误差补偿法[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 1002-1010.
- [7] Dong J T, Yang X L, Dong J, et al. Research on response nonuniformity correction of area CMOS image sensor [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(4): 570-574, 578.
董建婷, 杨小乐, 董杰, 等. 面阵 CMOS 图像传感器响应非均匀性校正方法研究[J]. *半导体光电*, 2012, 33(4): 570-574, 578.
- [8] Hu C M, Bai Y, Tang P. Denoising algorithm for the pixel-response non-uniformity correction of a scientific CMOS under low light conditions [EB/OL]. (2016-07-10) [2020-06-11]. https://www.researchgate.net/profile/Ping_Tang5/publication/307530858_DENOISING_ALGORITHM_FOR_THE_PIXEL-RESPONSE_NON-UNIFORMITY_CORRECTION_OF_A_SCIENTIFIC_CMOS_UNDER_LOW_LIGHT_CONDITIONS/links/5859dfd108ae64cb3d494681.pdf.
- [9] Vilella E, Garcia J, Alonso O, et al. Dynamic range extension of a SPAD imager using non-uniformity correction techniques [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(9): 2988-2992.
- [10] Zhu L, Jiang X Y, Sui X B, et al. Research on scene-based IRFPA non-uniformity correction technology [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11441: 1144109.
- [11] Yang M, Xu W B, Tian Y Z, et al. Time-sharing infrared polarization imaging system for moving target detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1511001.
杨敏, 徐文斌, 田禹泽, 等. 面向运动目标检测的分时型红外偏振成像系统 [J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1511001.
- [12] Sun H, Xu S Y, Sun S H, et al. Research on evaluation method of optical imaging sensors' photon response non-uniformity noise [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 042302.
孙慧, 徐抒岩, 孙守红, 等. 光电成像传感器光子响应非均匀性噪声评价方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(4): 042302.
- [13] Xu W. Star fast extraction and high accuracy centroid estimation of star camera [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2013.
许威. 星点快速提取与高精度定位技术研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2013.
- [14] Wang Q, Liu Y F, Chen Y Q, et al. Precise locating approach of the beacon based on gray gradient segmentation interpolation in satellite optical communications[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(7): 1826-1832.
- [15] Bao J Y, Xing F, Sun T, et al. CMOS imager non-uniformity response correction-based high-accuracy spot target localization[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(16): 4560-4568.
- [16] Yin J, Li Y H, Liao S K, et al. Entanglement-based secure quantum cryptography over 1, 120 kilometres [J]. *Nature*, 2020, 582(7813): 501-505.
- [17] Chen S J, Zhang L, Wu J C, et al. Realization and optimization of fine tracking system of free space laser communication [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(1): 35-41.
陈少杰, 张亮, 吴金才, 等. 空间激光通信中精跟踪

- 系统的实现与优化[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(1): 35-41.
- [18] Liu N N. Research on hyper accuracy subdivision position technology of fine guidance sensor [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
刘南南. 高精度导星测量系统细分定位技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [19] Zhai Y L. Research on automatic identification of space motion targets under starry background [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
翟永立. 星空背景下空间运动目标自主识别技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [20] Jiang H L, Tong S F, Zhang L Z. The technologies and systems of space laser communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 243-244.
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: 243-244.
- [21] Fei Y T, Chen X H, Qin L, et al. Error theory and data processing [M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 61-63.
费业泰, 陈晓怀, 秦岚, 等. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 61-63.
- [22] Hamkins J, Simon M K. Deep-space communications and navigation series [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [23] S. Lee, G. G. Ortiz, W. T. Roberts, et al. Feasibility study on acquisition, tracking, and pointing using earth thermal images for deep-space ka-band and optical communications [EB/OL]. (2003-11-15)[2020-06-11]. https://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress_report/42-155/155E.pdf.
- [24] Alexander J W, Lee S, Chen C C. Pointing and tracking concepts for deep-space missions [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3615: 230-249.