

高精度激光告警参数提取算法

张子暄 张瑞 张卓奇 牛家麒 郝瑞昌 王志斌 李孟委

High-precision parameter extraction algorithm of laser alarm

ZHANG Zixuan, ZHANG Rui, ZHANG Zhuoqi, NIU Jiaqi, HAO Ruichang, WANG Zhibin, LI Mengwei

引用本文:

张子暄, 张瑞, 张卓奇, 等. 高精度激光告警参数提取算法[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1258–1264. DOI: 10.5768/JAO202344.0610013

ZHANG Zixuan, ZHANG Rui, ZHANG Zhuoqi, et al. High-precision parameter extraction algorithm of laser alarm[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1258–1264. DOI: 10.5768/JAO202344.0610013

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610013>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

数字散斑亚像素小角位移测量的曲面拟合法

Curved surface fitting method of sub-pixel small angle measurement

应用光学. 2017, 38(2): 256–263 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0203002>

基于最小二乘法多项式拟合三角测量模型研究

Laser triangulation measurement model based on least square polynomial fitting method

应用光学. 2019, 40(5): 853–858 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0503003>

汽车焊缝密封胶条的光条中心提取算法研究

Light bar center extraction algorithm for automotive weld sealant strips

应用光学. 2019, 40(5): 823–828 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0502006>

陆用高精度激光惯导装备使用维护问题研究

Research on use and maintenance of land based high-precision laser inertial navigation equipment

应用光学. 2018, 39(3): 309–315 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0301002>

基于机载激光雷达点云的雪道坡度提取算法

Slope extraction algorithm of ski tracks based on airborne LIDAR point cloud

应用光学. 2021, 42(3): 481–487 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0302005>

基于针孔成像面参数提取的单板机镜头显微成像质量评价方法

Method of microscopic imaging quality evaluation for board lens based on image parameter extraction of pinhole imaging

应用光学. 2021, 42(5): 839–847 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0502003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 06-1258-07

高精度激光告警参数提取算法

张子暄^{1,2,3}, 张瑞^{1,2,3}, 张卓奇^{2,3}, 牛家麒^{2,3}, 郝瑞昌^{2,3}, 王志斌^{2,3}, 李孟委³

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051; 3. 中北大学 前沿交叉科学研究院, 山西 太原 030051)

摘要: 激光告警系统通过提取来袭激光的相关参数进行告警定位, 其角度定位精度直接与战场生存能力相关。为了有效提高激光告警系统的角度定位精度, 基于光栅衍射型激光告警原理, 提出一种高精度测量来袭激光参数的算法。对激光告警系统进行标定, 用高斯拟合法精确提取出衍射光斑标定图片的0级光斑中心, 将来袭激光角度与对应角度的光斑中心进行拟合, 根据拟合结果确定任意角度的光斑衍射图像对应的来袭激光角度参数。实验结果表明, 方位角测量误差优于 0.29° , 俯仰角测量误差优于 0.38° 。该算法有效提高了激光告警系统的测算精度。

关键词: 激光告警; 参数提取; 高斯拟合法; 曲面拟合

中图分类号: TN247

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0610013

High-precision parameter extraction algorithm of laser alarm

ZHANG Zixuan^{1,2,3}, ZHANG Rui^{1,2,3}, ZHANG Zhuoqi^{2,3}, NIU Jiaqi^{2,3}, HAO Ruichang^{2,3},
WANG Zhibin^{2,3}, LI Mengwei³

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Shanxi Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instrument, North University of China,
Taiyuan 030051, China; 3. Institute of Frontier and Cross Science, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The laser warning system performs warning positioning by extracting the relevant parameters of incoming laser, and its angle positioning accuracy is directly related to the battlefield survivability. In order to effectively improve the angle positioning accuracy of the laser warning system, an algorithm for high-precision measurement of incoming laser parameters was proposed based on the principle of grating diffraction laser warning. Firstly, the laser warning system was calibrated, and the 0-level spot center of the diffraction spot calibration image was accurately extracted by Gaussian fitting. The laser angle of the future attack was fitted with the spot center of the corresponding angle. According to the fitting results, the angle parameters of the incoming laser corresponding to the diffraction image of the spot at any angle were determined. The experimental results show that the azimuth measurement error is better than 0.29° , and the pitch measurement error is better than 0.38° . The algorithm effectively improves the measurement accuracy of the laser warning system.

Key words: laser alarm; parameter extraction; Gaussian fitting; surface fitting

引言

随着光电应用技术的发展, 众多不同类型的激光武器被部署在战场上, 用于测距、目标指示、弹药制导等多个方面^[1-4]。这些激光武器具有命中

精度高、抗干扰能力强、战斗力强、射程远、破坏性极强的特点, 对我军的战略安全造成了严重威胁^[5]。在各种复杂的战场环境中, 包括美国、英国、法国、德国等在内的军事强国纷纷致力于开发

收稿日期: 2023-03-03; 修回日期: 2023-07-18

基金项目: 国家自然科学基金 (62105302); 山西省基础研究计划 (20210302124269)

作者简介: 张子暄 (2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电检测技术研究。E-mail: zhangzx1229@163.com

通信作者: 张瑞 (1987—), 男, 教授, 硕导, 主要从事光电技术研究。E-mail: zhangrui@nuc.edu.cn

各种手段和设施进行光电侦查与反侦察、干扰与反干扰、对抗与反对抗^[6]。时至今日, 光电防御设备通过光电探测来截获敌方发射的各种波长的激光^[7], 经过识别和分析获取敌方光电设备的位置、用途及技术参数^[8]。激光告警系统是一种能够追溯来袭激光的角度、波长等参数的光电防御设备^[9], 其性能指标对光电精确对抗系统的运行效能有着至关重要的作用, 其中对目标方位的识别精度直接影响到干扰系统的调转瞄准时间, 关系着主动防护系统最终的防护效能。激光告警系统主要分为成像探测型、光谱探测型、相干探测型和全息探测型等^[10-12]。现有的基于上述几种原理的激光告警设备多存在角分辨率低、可探测波长单一、视场角小等缺点^[13]。相较于上述几种原理的激光告警系统, 光栅衍射型激光告警无需复杂的机械扫描, 也不包含对工艺要求相对较高的光学器件或者复杂的数据处理过程, 同时能够保证较高的灵敏度和对来袭激光相关参数测算结果的高分辨率^[14]。

常见的光斑中心提取算法有灰度质心法、圆拟合法、霍夫变换法等^[15-16]。灰度质心法计算简单, 但受光斑形状影响大, 只能处理光斑形状比较规则且灰度对称分布较均匀的情况^[17]; 圆拟合法实时性较好, 但是受噪声影响较大^[18]; 霍夫变换法能够较好适应噪声, 但是计算量大, 实时性较差^[19]。

本文提出了一种针对激光告警的高精度参数提取算法, 首先标定激光告警系统不同来袭激光角度的光斑衍射图像, 基于高斯拟合法提取标定图像中 0 级、 ± 1 级衍射光斑中心, 拟合出来袭激光入射角与 0 级光斑中心的关系。将拟合后结果用于激光告警系统所涉及的视场角范围内任意角度的来袭激光相关参数的计算, 有效提高了激光告警系统对来袭激光参数测算的精度, 保证我军在各种光电对抗环境下的战场生存能力。

1 激光告警系统设计

1.1 光栅衍射型激光告警

光栅衍射型激光告警的基本原理如图 1 所示。来袭激光通过光栅衍射, 衍射后再经过大视场光学镜头聚焦到面阵探测器上, 得到衍射光斑, 针对衍射光斑进行数据处理并计算出来袭激光的相关参数。

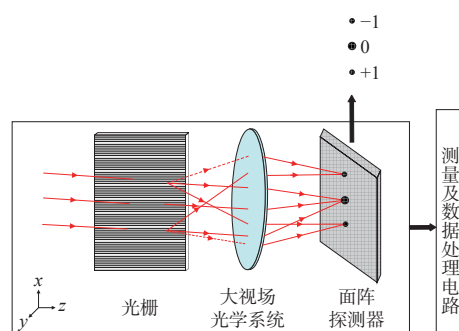


图 1 光栅衍射型激光告警原理图

Fig. 1 Schematic diagram of grating diffraction laser alarm

来袭激光的具体参数需要根据得到的衍射光斑中心进行计算, 如图 2 所示。设来袭激光波长为 λ , 对光栅的入射方位角为 α , 俯仰角为 γ ; 衍射到面阵探测器上在 x 方向得到了 0 级光斑位置 x^0 , -1 级光斑位置 x^{-1} , $+1$ 级光斑位置 x^{+1} ; 在 y 方向得到了光斑位置 y 。其中, 已知光栅常数为 d , 透镜焦距为 f , 则可推出 0 级衍射角等于入射角 α 。

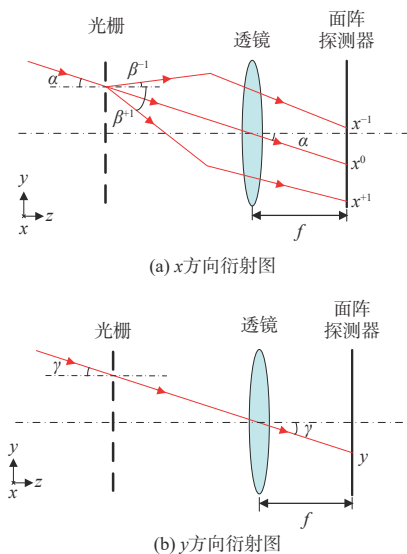


图 2 衍射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of diffraction

故 ± 1 级衍射角 β^{+1} 、 β^{-1} 分别满足:

$$\sin \beta^{+1} = \sin \alpha + \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

$$\sin \beta^{-1} = \sin \alpha - \frac{\lambda}{d} \quad (2)$$

面阵探测器置于焦距为 f 的透镜组焦面处, 采集衍射后的图像用于后续数据处理, 其 0 级、 $+1$ 级、 -1 级衍射光斑的位置分别为

$$\begin{cases} x^0 = f \tan \alpha \\ x^{+1} = f \tan \beta^{+1} \\ x^{-1} = f \tan \beta^{-1} \\ y = f \tan \gamma \end{cases} \quad (3)$$

由式 (1)~式 (3) 可得到来袭激光的方位角 α 、俯仰角 γ 以及波长 λ 为

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(\frac{x^0}{f}\right) \\ \gamma = \arctan\left(\frac{y}{f}\right) \\ \lambda = d\left\{\sin\left[\arctan\left(\frac{x^0}{f}\right)\right] + \sin\left[\arctan\left(\frac{x^{\pm 1}}{f}\right)\right]\right\} \end{cases} \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 来袭激光的方位角、俯仰角以及波长的计算均基于衍射光斑中 0 级和 ± 1 级的光斑中心, 故选择一种精度较高的光斑中心提取方法能有效提高激光告警系统的测算精度。

1.2 激光告警中的光学系统及数据采集

本激光告警系统中的光学系统包括光栅和大视场光学镜头, 均为本团队设计, 如图 3 所示。其中, 大视场光学镜头实现了水平方向 95° 、垂直方向 72° 的大视场探测。系统采用 $32\text{ mm}\times 32\text{ mm}$ 的黑白光栅, 光栅常数为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ (占空比为 0.6), 在镜头的视场角范围内, 保证 ± 1 衍射阶光斑的归一化强度超过 50%, 而衍射 0 阶和 ± 1 阶光强度差异明显。

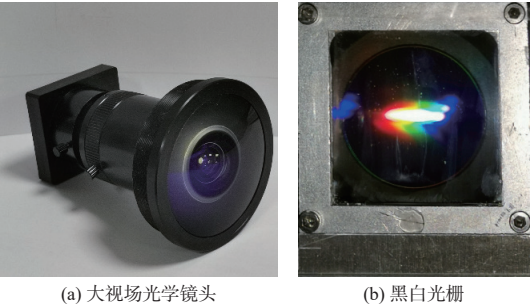


图 3 激光告警中的光学系统
Fig. 3 Optical system in laser alarm

本激光告警系统中的数据采集探测器采用山西国惠光电生产的 GHOPTO 短波红外 InGaAs 焦平面阵列探测器, 响应波段为 $0.4\text{ }\mu\text{m}\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$, 图 4 所示为该探测器实物及其部分参数。

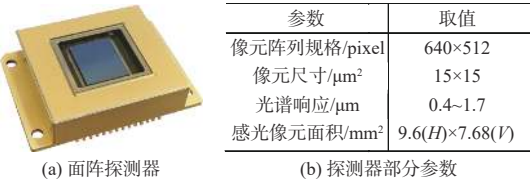


图 4 系统采用的面阵探测器及其部分参数
Fig. 4 Area-array detector used by system and some of its parameters

2 高斯拟合法原理

系统在面阵探测器上采集到的衍射光斑呈现圆形, 但由于衍射的特性, 不同级数或入射角光斑在大小、亮度上都可能存在差距, 影响光斑中心的定位精度, 从而影响对来袭激光相关参数的计算精度和误差。

图 5 (a) 为实验中所采集的光斑图片, 图 5(b) 为其三维灰度分布图。可以明显看出背景的灰度值较低, 除了衍射光斑的部分灰度值饱和的区域之外, 衍射光斑的其他灰度值基本符合高斯分布。但图像中存在一些可能影响后续光斑中心提取的噪点, 通过滤波消除后, 得到的光斑三维灰度分布如图 5(c) 所示。

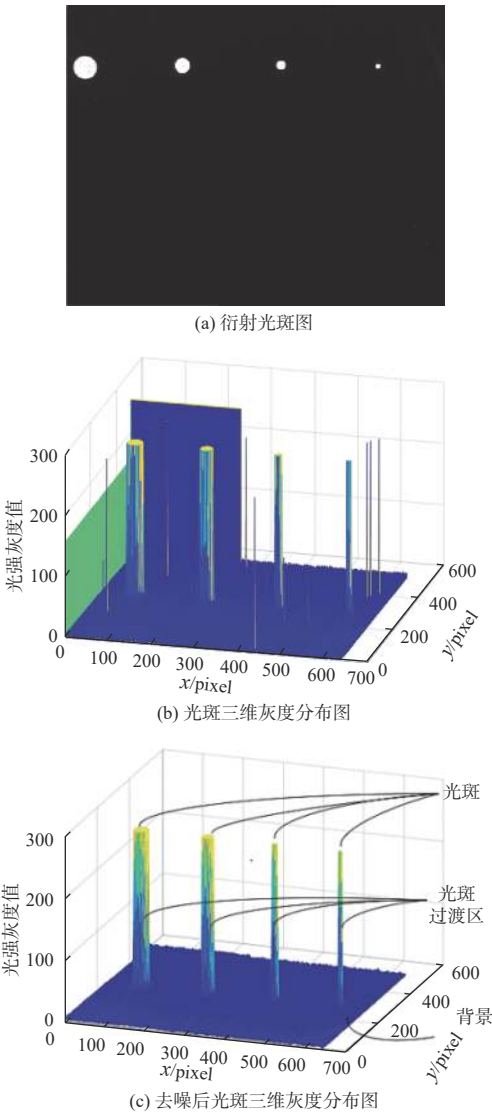


图 5 衍射光斑及其三维灰度分布图
Fig. 5 Diffraction spot and its three-dimensional gray distribution diagram

对上述衍射光斑图像进行连通域分析, 提取出每一个光斑的连通域, 再分别进行光斑中心的求取。理论上, 激光光斑的灰度分布应符合二维正态分布曲面, 即符合高斯分布。故在垂直于来袭激光的截面上, 光斑灰度分布符合式(5):

$$I(x, y) = H \cdot e^{-\left\{ \frac{(x-x_0)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_2^2} \right\}} \quad (5)$$

式中: $I(x, y)$ 为截面 (x, y) 处的光强; H 为截面光强幅值; (x_0, y_0) 为光斑中心; σ_1 、 σ_2 分别为 2 个方向上的标准差。将式(5)两边取对数可简化为

$$z = ax^2 + by^2 + cx + dy + k \quad (6)$$

式中各参数分别为

$$\begin{cases} a = -\frac{1}{\sigma_1^2} \\ b = -\frac{1}{\sigma_2^2} \\ c = \frac{2x_0}{\sigma_1^2} \\ d = \frac{2y_0}{\sigma_2^2} \\ k = \ln H - \frac{x_0^2}{\sigma_1^2} - \frac{y_0^2}{\sigma_2^2} \\ z = \ln I(x, y) \end{cases} \quad (7)$$

取残差:

$$\varepsilon_i = ax_i'^2 + by_i'^2 + cx_i' + dy_i' + k - z_i' \quad (8)$$

式中: (x_i', y_i') 为光斑图像中适用于高斯拟合分布的点坐标; z_i' 为该点对应灰度值的对数。根据最小二乘法, 上面的参数符合式(9):

$$\begin{bmatrix} x_1'^2 & y_1'^2 & x_1' & y_1' & 1 \\ x_2'^2 & y_2'^2 & x_2' & y_2' & 1 \\ x_3'^2 & y_3'^2 & x_3' & y_3' & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n'^2 & y_n'^2 & x_n' & y_n' & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1' \\ z_2' \\ z_3' \\ \vdots \\ z_n' \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据图 5(c) 中衍射光斑经过去噪的三维灰度分布图, 能明显看出, 本系统中利用面阵探测器采集的光斑受光强或者曝光时间的影响, 灰度值存在饱和, 即图像中平顶部分。故而根据光斑灰度分布, 可以将光斑分为 3 个部分: 背景区域、光斑过渡区域和光斑区域。其中, 只有光斑过渡区域的灰度分布才满足二维高斯曲面分布, 即属于式(8)中提及的 (x_i', y_i') 。在进行高斯曲面拟合时, 需将光斑区域的点和背景区域的点剔除, 否则将带入拟合误差, 影响拟合精度。根据高斯分布特性以及光斑过渡区域还原出理论上的光斑灰度分布

曲面, 进而根据高斯分布的特性计算得到光斑中心 (x_0, y_0) :

$$\begin{cases} x_0 = -\frac{c}{2a} \\ y_0 = -\frac{d}{2b} \end{cases} \quad (10)$$

3 拟合结果与误差分析

根据上述原理搭建的激光告警系统如图 6 所示。将激光告警系统固定在高精度二维转台上, 激光器前置扩束镜模拟来袭激光, 通过转动转台改变来袭激光角度, 控制激光器改变来袭激光波长, 同时利用上位机采集不同入射角度、波长的来袭激光对应的衍射图像, 并根据采集到的衍射图像进行后续的拟合以及来袭激光的参数计算。

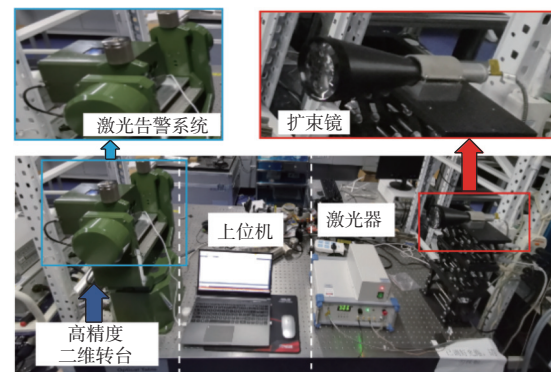


图 6 实验装置

Fig. 6 Experimental installation

上述实验平台可以探测波长在 400 nm~1 700 nm 的激光。本文选用激光武器中常用的 532 nm、1 064 nm、1 313 nm 波长作为来袭激光。图 7 为不同波长来袭激光下采集到的图像。

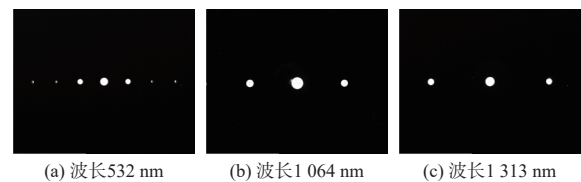


图 7 不同波长衍射光斑图

Fig. 7 Diffraction spot pattern of different wavelengths

本系统方位角视场为 90°, 俯仰角视场为 72°。根据上述的光栅衍射型激光告警原理, 计算激光告警参数需要 0 级光斑中心以及 0 级光斑中心到 1 级光斑中心在 x 方向上的距离。设来袭激光方位角为 α , 俯仰角为 γ , 波长为 λ , 则激光告警系统采集到的光斑衍射图像如表 1 所示。

表 1 不同来袭激光的衍射光斑
Table 1 Different diffraction spots of incoming laser

波长/nm	入射角/(°)			
	$\alpha=0, \gamma=0$	$\alpha=0, \gamma=36$	$\alpha=45, \gamma=0$	$\alpha=45, \gamma=36$
532				
1 064				
1 313				

本文中涉及的激光告警系统拥有较大视场角,由此存在大视场镜头对光斑产生的畸变影响,这种畸变虽然可以通过校正减小,但校正后仍然对结果影响较大。故而本文采用拟合光斑衍射标定图像与角度对应关系的方式来减小误差,以提高对来袭激光角度参数的计算精度。基于 1 064 nm 的来袭激光下采集的数据,方位角 α 与 0 级光斑中心拟合关系和俯仰角 γ 与 0 级光斑中心拟合关系分别如图 8 所示。

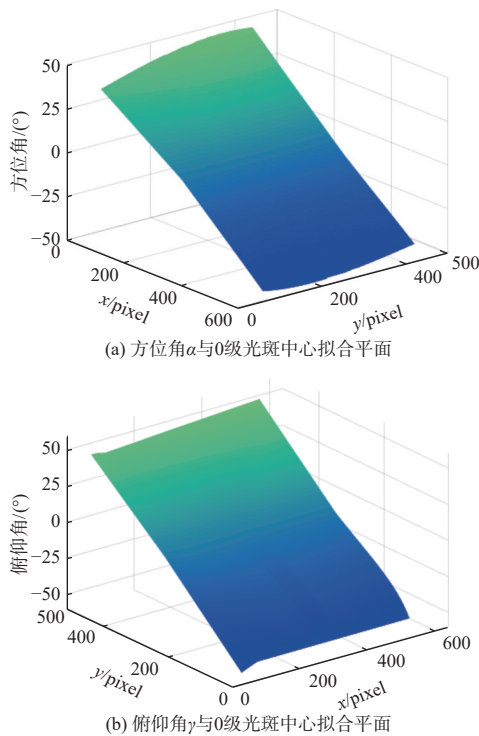


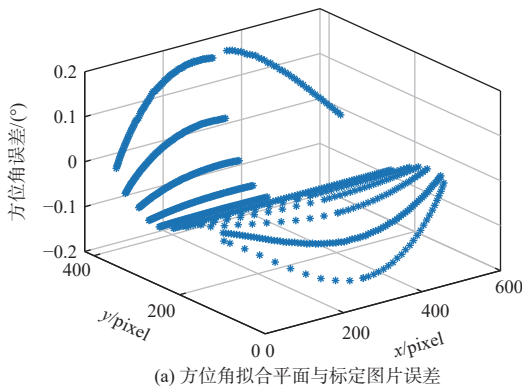
图 8 激光角度与 0 级光斑中心拟合平面
Fig. 8 Fitting plane diagram of laser angle and center of 0-level spot

上述拟合得到的方位角 α 与 0 级光斑中心坐标的关系和俯仰角 γ 与 0 级光斑中心坐标的具体数值关系分别如式(11)、式(12)所示:

$$\alpha = -1.083\,57 \times 10^{-7} x^3 - 2.4 \times 10^{-7} y^3 + 3.4 \times 10^{-7} x^2 y + 4.99 \times 10^{-7} xy^2 - 0.000\,49 xy - 0.081\,64 x + 0.090\,542 y + 32.016\,28 \quad (11)$$

$$\gamma = -2.181\,02 \times 10^{-7} x^3 + 1.53 \times 10^{-8} y^3 + 1.31 \times 10^{-6} x^2 y + 6.3 \times 10^{-7} xy^2 - 0.001\,47 xy + 0.048\,858 x + 0.189\,425 y - 6.526\,71 \frac{1}{y} - 3.991\,56 \frac{1}{x} + 0.972\,714 \frac{1}{xy} + 0.301\,492 \sqrt{xy} - 71.208\,7 \quad (12)$$

来袭激光角度与光斑中心坐标拟合平面与采用的衍射光斑标定图片的方位角、俯仰角误差如图 9 所示。随机选 8 组不属于拟合上述平面所用到的角度的来袭激光,根据拟合平面计算得到来袭激光角度、实际来袭激光角度以及测量误差如表 2 所示,其中,来袭激光方位角为 α ,俯仰角为 γ ,衍射图像的 0 级光斑位置为 (x_0, y_0) 。根据拟合结果得到方位角测量值 α_1 ,俯仰角测量值 γ_1 ,测量误差分别为 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\gamma$ 。



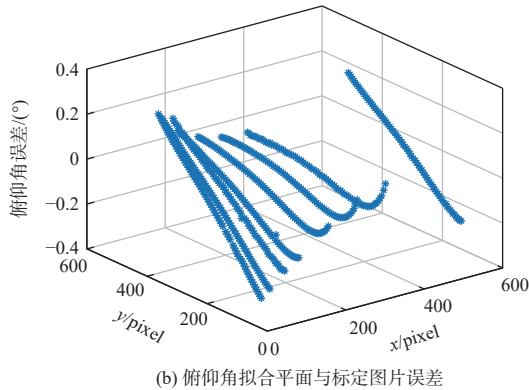


图9 拟合平面与标定图片误差

Fig. 9 Error of fitting plane and calibration image

表2 数据测量结果及误差

Table 2 Data measurement results and errors

次数	激光角度/(°)		$(x_0, y_0)/\text{pixel}$	测量值/(°)		误差/(°)	
	α	γ		α_1	γ_1	$\Delta\alpha$	$\Delta\gamma$
1	38.50	2.50	(76.03, 274.29)	38.56	2.52	0.06	0.02
2	25.00	-4.00	(185.94, 232.12)	25.11	-3.84	0.11	0.16
3	-45.00	14.00	(590.87, 314.68)	-44.71	13.72	0.29	-0.28
4	-30.00	6.00	(514.10, 286.59)	-29.75	5.69	0.25	-0.31
5	22.00	-25.00	(206.10, 98.01)	21.74	-24.63	-0.26	0.37
6	-6.00	-28.00	(357.57, 71.75)	-5.87	-28.38	0.13	-0.38
7	-15.00	12.00	(423.12, 330.89)	-14.81	11.74	0.19	-0.26
8	17.00	-8.00	(185.52, 206.33)	16.96	-7.89	-0.04	0.11

4 结论

本文基于光栅衍射型激光告警原理, 针对现有激光告警系统视场小、光谱范围小, 光栅衍射图像光斑中心提取精度只能到像素级, 计算角度参数精度较低等问题, 搭建了大视场宽光谱的激光告警系统, 并提出了一种基于高斯拟合法提取光斑中心的算法, 通过大量衍射光斑标定图片求取的0级光斑和 ± 1 级光斑中心坐标, 将求取到的光斑坐标与来袭激光角度进行拟合。根据拟合结果, 可以测算来袭激光的方位角、俯仰角。并且通过实验验证, 光斑中心提取分辨率可精确到小数点后两位, 对比真实的来袭激光图像和拟合平面发现, 方位角拟合误差优于 0.29° , 俯仰角拟合误差优于 0.38° , 使得激光告警系统对来袭激光的测算精度得到提升。该算法能够保证激光告警系统对来袭激光进行高精度探测, 为我军在光电对抗领域提供了保障, 提高了我军的战场生存能力。

参考文献:

- [1] 邓全, 王宝玉, 马敏, 等. 空间平台主被动激光探测技术研究[J]. 应用光学, 2021, 42(3): 550-556.
DENG Quan, WANG Baoyu, MA Min, et al. Active and passive laser detection technology in space platform[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(3): 550-556.
- [2] 任宁, 姜丽新. 光电告警技术与国外典型装备发展分析[J]. 光电技术应用, 2020, 35(3): 12-16.
REN Ning, JIANG Lixin. Development analysis of electro-optical warning technology and foreign typical equipments[J]. Electro-Optic Technology Application, 2020, 35(3): 12-16.
- [3] 刘泽金, 杨未强, 韩凯, 等. 激光武器设计准则探讨[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 7-11.
LIU Zejin, YANG Weiqiang, HAN Kai, et al. Research on the design criteria of laser weapons[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 7-11.
- [4] 杜君涛, 王钟毓, 赵彦. 国外大型机载激光武器气动布局研究[J]. 航空制造技术, 2022, 62(1): 113-117.
DU Juntao, WANG Zhongyu, ZHAO Yan. Study on aerodynamics layout of foreign large airborne laser weapon[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 62(1): 113-117.
- [5] SHI J, ZHANG R, NIU J Q, et al. Research on two-dimensional laser warning integrated detection technology[J]. Optik, 2022, 270: 170034.
- [6] 于凤全, 宫跃, 张刚. 机载激光制导武器发展综述[J]. 指挥控制与仿真, 2022, 44(4): 26-30.
YU Fengquan, GONG Yue, ZHANG Gang. Overview of the development of airborne laser-guided weapons[J]. Command Control & Simulation, 2022, 44(4): 26-30.
- [7] MOHAMMAD N S, ARAB H, RONAGH S N. Analysis of new laser warning technologies to propose a new optical subsystem[J]. Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2018, 14(3): 213-221.
- [8] 张方, 任华军. 激光侦察告警技术现状与发展趋势[J]. 现代信息科技, 2019, 3(10): 44-46.
ZHANG Fang, REN Huajun. Status and development trend of laser surveillance and warning technology[J]. Modern Information Technology, 2019, 3(10): 44-46.
- [9] 任华军, 张健, 焦凯强. 高分辨力激光告警与光电精确对抗探讨[J]. 坦克装甲车辆, 2019(15): 60-61.
REN Huajun, ZHANG Jian, JIAO Kaiqiang. Discussion on high resolution laser warning and photoelectric accurate

- ate countermeasure[J]. *Tank Armored Vehicles*, 2019 (15): 60-61.
- [10] WOJTANOWSKI J, JAKUBASZEK M, ZYGMUNT M. Freeform mirror design for novel laser warning receivers and laser angle of incidence sensors[J]. *Sensors*, 2020, 20(9): 2569.
- [11] 杨雪梅, 张瑞, 石金, 等. 基于黑白光栅的宽波段大视场激光告警[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(19): 2295-2304. YANG Xuemei, ZHANG Rui, SHI Jin, et al. Laser warning with broadband and large field of view based on black-white grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(19): 2295-2304.
- [12] EL-SHERIF F A, AYOUB H S, EL-SHARKAWY H Y, et al. The design and implementation of photoacoustic based laser warning receiver for harsh environments[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 98: 385-396.
- [13] GAO R H, LIU H S, ZHAO Y, et al. High-precision laser spot center positioning method for weak light conditions[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(6): 1763-1768.
- [14] 张瑞, 王志斌, 温廷敦, 等. 基于二维激光告警的闪耀光栅设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(10): 133-137. ZHANG Rui, WANG Zhibin, WEN Tingdun, et al. Blazed grating design based on two-dimensional laser warning[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 133-137.
- [15] YAO L Q, ZHANG X J, ZHANG X L, et al. Measurements of concentration distribution of hydrogen jet using deflection of center of the laser spot[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(83): 35515-35526.
- [16] REN C F, XIE J F, ZHI X D, et al. Laser spot center location method for Chinese spaceborne GF-7 footprint camera[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20(8): 2319.
- [17] 李道萍, 杨波. 高精度光斑中心定位算法[J]. *光学仪器*, 2018, 40(4): 20-25. LI Daoping, YANG Bo. High-precision center location algorithm of light spot[J]. *Optical Instruments*, 2018, 40(4): 20-25.
- [18] 王刚, 朱明清, 石磊. 基于FPGA激光光斑中心定位的设计[J]. *自动化技术与应用*, 2022, 41(3): 113-117. WANG Gang, ZHU Mingqing, SHI Lei. Design of laser spot center positioning based on FPGA[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2022, 41(3): 113-117.
- [19] ZHAO H L, WANG S Z, SHEN W, et al. Laser spot centering algorithm of double-area shrinking iteration based on baseline method[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(21): 11302.