

doi:10.3788/gzxb20144303.0311002

光栅衍射型超广角激光告警系统光斑定位方法

王龙,王永仲,沈学举,何永强,张维安,董红军

(军械工程学院 电子与光学工程系, 石家庄 050003)

摘 要: 成像光斑中心精确定位是光栅衍射型超广角激光告警系统具有高定向准确度和高波长分辨能力的基础. 本文分析了光栅衍射型超广角激光告警系统成像光斑特点. 针对随激光入射角增大, 系统成像光斑畸变为强度近似高斯分布倾斜光斑的问题, 提出一种改进型高斯拟合法计算光斑中心, 通过仿真模拟和实验测试研究了新方法的定位性能. 模拟结果表明, 高斯噪音标准差为 0.01 情况下, 光斑长轴与 x 轴夹角由 0° 逐渐增大为 90° 过程中, 本文方法的定位误差平均值小于 0.005 像素, 误差标准差小于 0.02 像素. 实验测试表明, 实验图像经帧相减和高斯平滑滤波预处理后, 光斑长轴与坐标轴方向一致时, 本文方法与高斯拟合法的定位结果非常接近, 明显优于灰度重心法. 光斑倾斜时, 本文方法求得的激光入射方向角的误差均值和标准差明显小于灰度重心法和普通高斯拟法.

关键词: 激光告警; 亚像素光斑定位; 改进型高斯拟合; 成像光斑; 倾斜高斯分布; 定向误差

中图分类号: TN247; TN977

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)03-0311002-7

Algorithm for Laser Spot Center Locating in Super Wide-angle Laser Warning System Based on Grating Diffraction

WANG Long, WANG Yong-zhong, SHEN Xue-ju, HE Yong-qiang,
ZHANG Wei-an, DONG Hong-jun

(Department of Optics & Electron Engineering, Ordnance Engineering College,
Shijiazhuang, 050003, China)

Abstract: The directional accuracy and wavelength resolution is highly dependent on the laser spot center location accuracy for the super wide-angle laser warning system based on grating diffraction. The spot features of this system was analyzed. As the imaged spots became tilt and its intensity was similar to Gaussian distribution with the laser arrival angle increasing, a new improved Gaussian fitting algorithm was proposed to locate the spot center. Then the accuracy and stability were verified by simulation and experiment test. The simulation results show that when the angle between long axis of imaged spot and x axis increases from 0° to 80° with standard error of Gaussian noise 0.01, mean errors and standard error of this method are smaller than 0.005 pixel and 0.02 pixel, respectively. The experiment test shows that after pre-process of frame subtraction and Gaussian filtering, results of the proposed method are close to weighted centroid and Gaussian fitting if the long axis of imaged spot is parallel to x or y axis, and both mean error and standard error for laser incoming direction of this proposed method are smaller than the other two methods when the imaged spot is tilted.

Key words: Laser warning; Sub-pixel location; Improved Gaussian fitting; Imaged spot; Titled Gaussian distribution; Direction measure error

OCIS Codes: 110.0110; 120.4570; 100.2960; 100.2000

第一作者: 王龙(1985-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光告警技术. Email: wanglong4800533@163.com

导 师: 王永仲(1944-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光电对抗及防护. Email: whelmmail@sina.com

收稿日期: 2013-07-15; 录用日期: 2013-09-26

0 引言

随着激光技术的发展,激光制导武器、激光高能辐射武器、激光侦察、探测和跟踪设备得到越来越广泛的应用.作为光电对抗领域的重要组成部分^[1-4],激光告警直接影响到被保护目标的战场生存.光栅衍射型超广角激光告警器作为一种新型的告警设备,可以实现激光威胁源波长测量和精确定向^[5],可用于精确告警引导有源干扰或火力摧毁指向,其中告警系统的定向准确度和波长分辨能力是作战指挥员最关心的两个问题.

光栅衍射型超广角激光告警系统主要由鱼镜头、变换透镜、正弦光栅、成像透镜和面阵探测器构成.系统的定向准确度和波长分辨能力首先取决于探测器的分辨率,对于高准确度的要求,成像设备本身结构的限制使系统往往达不到指标要求.为进一步提高定向准确度和波长分辨能力,需要通过细分算法对激光光斑进行精确的中心定位.目前用于中心定位的细分算法主要有基于边缘和基于灰度两类,基于边缘的方法适合于图像形状明确的大目标^[6-9].入射激光经告警系统的成像光斑直径一般为3~4个像元大小,灰度近似符合高斯分布,对其宜采用基于灰度的方法进行细分定位处理.基于灰度的方法主要有灰度重心法、加权灰度重心法和高斯曲面拟合法.重心法计算简单,但其抗干扰能力最差,要达到较高的准确度必须有高信噪比的目标图像和合理的图像阈值选择;加权灰度重心法抗噪能力虽有所改善,但稳定性仍显不足^[10-12];高斯曲面拟合法准确度高、稳定性好而得到广泛的关注,但目前的研究仅局限于成像光斑长轴与坐标轴方向一致这种特殊情况^[13].

鉴于入射激光束经光栅衍射型超广角激光告警系统的成像光斑近似服从二维高斯分布,且长轴与坐标轴存在倾斜角,提出了一种普遍适用于任意倾斜程度的高斯光斑的中心定位方法.仿真模拟和实测结果表明,该方法与现有的高斯拟合法稳定性和抗噪声干扰能力相当.光斑长轴与坐标轴夹角较小时二者定位准确度相当,光斑继续倾斜时,该方法的定位误差明显小于高斯拟合法.

1 系统成像特性分析

1.1 系统结构

告警系统的工作原理如图1所示^[5], F_1 为鱼镜头接收入射激光, F_1 后焦面 P 与变换透镜 F_2 的前焦面重合;正弦光栅 G 紧贴衍射透镜 F_3 前表面放置,面阵探测器 T 位于 F_3 的后焦面接收衍射光斑.若入射激光束与光轴夹角为 ω ,子午面与 x_1o_1z 平面夹角为 θ .假设采用焦距为 f_1 的正交投影成像的鱼镜头,若一维

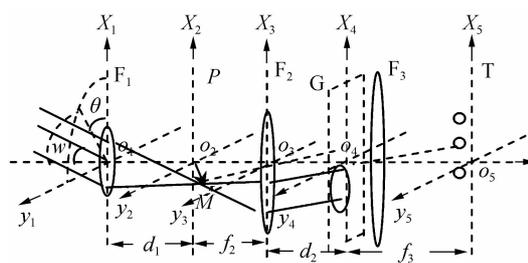


图1 系统工作原理

Fig. 1 Schematic diagram of the warning system
振幅型正弦透射光栅 G 的周期常量为 d , F 变换透镜 F_2 和衍射透镜 F_3 的焦距分别为 f_2 和 f_3 ,入射激光在探测器接收面 T 上成像为等间隔的三个衍射亮斑,光斑中心坐标满足^[5]

$$\begin{cases} x_0 = \frac{f_1 f_3 \sin(\omega) \cos(\theta)}{\sqrt{f_1^2 \sin^2(\omega) + f_2^2}} \\ x_{+1} = \frac{f_1 f_3 \sin(\omega) \cos(\theta)}{\sqrt{f_1^2 \sin^2(\omega) + f_2^2}} + \frac{\lambda f_3}{d} \\ x_{-1} = \frac{f_1 f_3 \sin(\omega) \cos(\theta)}{\sqrt{f_1^2 \sin^2(\omega) + f_2^2}} - \frac{\lambda f_3}{d} \\ y_0 = y_{+1} = y_{-1} = \frac{f_1 f_3 \sin(\omega) \sin(\theta)}{\sqrt{f_1^2 \sin^2(\omega) + f_2^2}} \end{cases} \quad (1)$$

根据成像光斑中心坐标可求得激光波长为

$$\lambda = d(x_0 - x_{-1})/f_3 \text{ 或 } \lambda = d(x_{+1} - x_0)/f_3 \quad (2)$$

激光入射方向可以表示为

$$\begin{cases} \theta = \arctan\left(\frac{y_0}{x_0}\right) \\ \omega = \arcsin\left[\frac{f_2}{f_1} \sqrt{\frac{(x_0^2 + y_0^2)}{(f_3^2 - x_0^2 - y_0^2)}}\right] \end{cases} \quad (3)$$

式(2)和(3)表明,告警系统的威胁源定向准确度取决于0级成像光斑中心的精确定位,而其波长分辨能力由0级和1级或-1级两光斑中心定位准确度共同决定.鉴于军用装备中激光仪器主要集中为彼此相差很大的某几个特殊波长,告警系统波长分辨能力无需太高,故 ± 1 级光斑选用方法简单、运算量小的加权灰度重心法进行中心定位.威胁源定向准确度越高,对己方人员和装备迅速采取反制措施越有利,本文主要根据告警系统0级成像光斑特点,为其设计合理的光斑中心定位算法.

1.2 成像光斑特点

告警系统采用的CMOS传感器响应灵敏度高,像元密度大,单像元尺寸小,为0级光斑中心精确定位提供了有利条件.为保证告警系统具有大视场,系统的衍射透镜焦距只有几十毫米,镜头工作于聚焦状态时,入射激光的成像光斑较小,容易造成漏警且对光斑中心的细分定位不利.基于光栅衍射的超广角激光告警系统通常采取微离焦方式,使0级成像光斑直径为3~5个像元.

告警系统成像光斑的特点主要取决于鱼眼镜头的成像特性.其通过“非相似”成像思想,引入大量“桶形”畸变实现对物空间的压缩,属于大像差镜头^[11].在近轴区域,光斑为圆形;随激光入射角增大,像差增大,成像光斑并非圆对称.对于正交投影成像方式的鱼眼镜头,其成像公式为^[11,14]

$$h = f_1 \sin(\omega) \quad (4)$$

式中 h 为像高, f_1 为镜头焦距, ω 为激光入射角.镜头径向放大率 β_r 和切向放大率 β_t 关系为

$$\beta_t = (\omega / \sin\omega) \beta_r \quad (5)$$

式(5)表明,球形物面上的圆形面元投影为像面上的椭圆,视场角越大,椭圆越扁平,入射角为 80° 时,切向放大率 β_t 是径向放大率 β_r 的 1.42 倍.

图 2 为 1 319 nm 连续激光辐照光栅衍射型超广角激光告警系统的成像光斑.可以看出,系统将入射激光成像为等间隔的三个亮斑,0 级光斑最亮,其余两光斑稍暗,0 级光斑中心坐标与激光入射方向相对应,随激光入射角度增大,光斑位置偏向视场边缘.

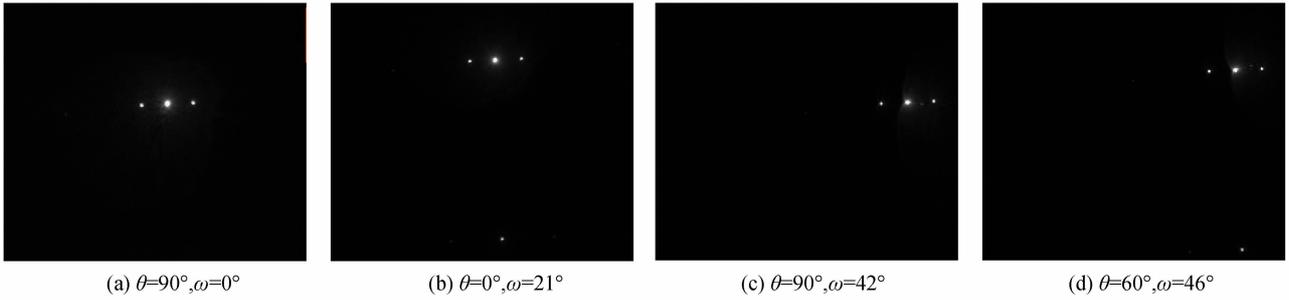


图 2 系统对不同方向入射激光的成像光斑

Fig. 2 Imaged spots of the system for incident laser with different direction

为分析 0 级成像光斑的形状和强度分布规律,提取出各自中央亮斑区域 20×20 像素范围的亮度及灰度分布如图 3 和图 4.可以看出,在近轴区域,成像光斑较大基本为圆形,如图 3(a) 所示.随激光入射角增大,光斑形状由圆形逐步畸变为椭圆形,激光入射角越大,椭圆越扁平,如图 3(b)~(d);成像光斑是圆形还是椭圆形取决于入射光束与光轴夹角 ω ,而椭圆光斑长轴

与坐标轴之间的夹角则由入射光束子午面与 $x_1 o_1 z$ 平面夹角 θ 决定.当 θ 为 0° 或 90° 时,椭圆光斑长轴与坐标轴平行,如图 3(b) 和 (c); 否则成像光斑倾斜,长轴与坐标轴之间存在夹角,如图 3(d).图 4 表明,入射激光功率较高,致使成像光斑中心位置周围出现数据饱和,光斑强度近似成平顶高斯分布.

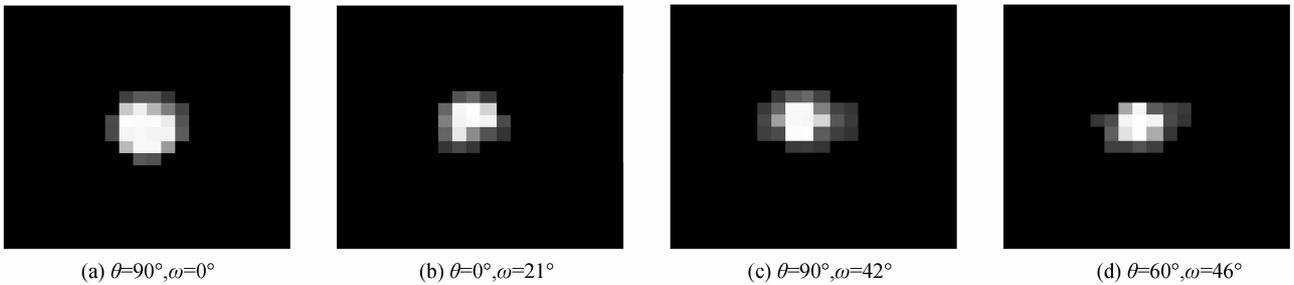


图 3 激光不同入射方向时的 0 级成像光斑

Fig. 3 Imaged spots of order 0 for incident laser with different direction

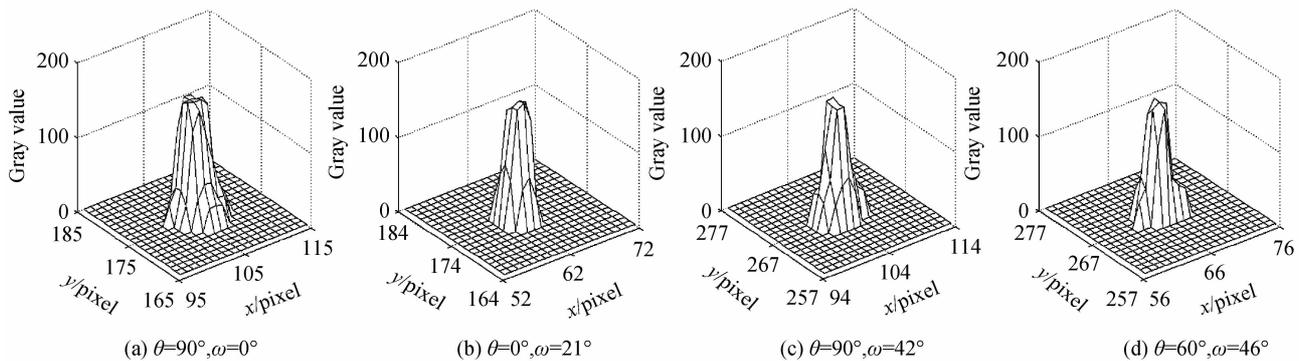


图 4 激光不同入射方向时的 0 级光斑强度分布

Fig. 4 Intensity distribution of imaged spots of order 0 for incident laser with different direction

2 光斑中心定位方法

2.1 帧相减技术

告警系统采集的图像包含目标和背景两部分,同时可能存在噪音和探测器盲元造成的干扰点,从原始图像很难直接提取出入射激光的成像光斑.考虑到激光告警系统的成像背景比较稳定,而探测器帧频较高,相邻帧图像的背景不变,将图像序列中包含目标和不包含目标的相邻帧图像之间做差可有效抑制背景和探测器盲元干扰,突出入射激光的成像光斑,如图 5.

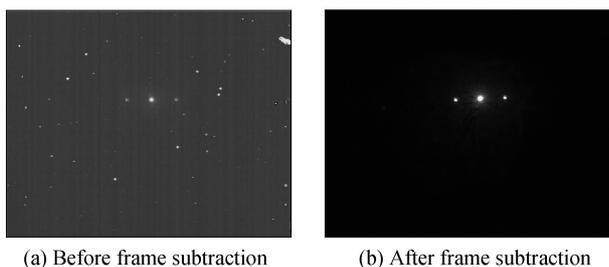


图 5 帧相减前后光斑图

Fig. 5 Imaged spots of frame subtraction

2.2 图像分割和滤波

告警系统所采集的图像经帧相减处理后,背景被有效抑制,图像中只包含三个成像光斑和噪音,图像分割的目的是将 0 级和 ±1 级光斑分别提取出来,以便各自中心坐标的计算.考虑到三成像光斑的灰度值都显著大于噪音,且 0 级光斑灰度值也比 ±1 级光斑灰度值大.首先对图像逐点扫描寻找灰度值最大的像素,并以此为中心,提取出 20×20 像素范围的灰度值,记为 S_0 ,相应的坐标记为 x_0 和 y_0 ,之后将图像中该范围像元的灰度值赋为 0;重新对图像扫描,提取灰度最大像素周围 20×20 像素范围的灰度值,记为 S_1 ,相应的坐标记为 x_1 和 y_1 .以上为 0 级和 1 或 -1 级光斑的提取方法.对于 S_1 、 x_1 和 y_1 ,直接用灰度重心法求解光斑的中心坐标,对于 S_0 首先使用高斯平滑滤波器对 0 级光斑进行预处理.高斯平滑滤波器具有旋转对称性,在各个方向上的平滑程度相同,保证了对图像进行平滑滤波不会偏向任一方向^[13].

2.3 改进的高斯拟合法中心定位

入射激光经告警系统的成像光斑为光学系统的点扩展函数,光斑能量分布可用二维高斯函数近似表示^[11,13].前面的分析表明,成像光斑长轴与坐标轴夹角随激光入射角 θ 的改变而不同.

假设光斑长轴与 x 轴夹角为 θ ,光斑中心 O_2 坐标为 (x_0, y_0) ,光斑上任一点 P 坐标为 (x, y) ,由几何知识可得

$$\begin{aligned} PB &= (PC - AC) \cos \theta = (y - y_0) \cos \theta - (x - x_0) \sin \theta \cdot \\ O_2 B &= AC / \sin \theta - O_2 D / \sin \theta + (PC - AC) \sin \theta = \\ & (y - y_0) \sin \theta + (x - x_0) \cos \theta \end{aligned} \quad (6)$$

P 点光强可以表示为

$$f(x, y) = A \exp \left\{ - \left[(y - y_0) \sin \theta + (x - x_0) \cos \theta \right]^2 / (2\sigma_1^2) \right\} \exp \left\{ - \left[(y - y_0) \cos \theta - (x - x_0) \sin \theta \right]^2 / (2\sigma_2^2) \right\} \quad (7)$$

式中 A 表示幅值, δ_1 和 δ_2 分别为光斑长轴和短轴方向上的标准差.对方程两边取对数整理得

$$\begin{aligned} ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f - \ln f(x, y) &= 0 \\ \left\{ \begin{aligned} a &= - \left(\frac{\sin^2 \theta}{2\sigma_1^2} + \frac{\cos^2 \theta}{2\sigma_2^2} \right) \\ b &= - \left(\frac{\cos^2 \theta}{2\sigma_1^2} + \frac{\sin^2 \theta}{2\sigma_2^2} \right) \\ c &= \sin \theta \cos \theta \left(\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_2^2} \right) \\ d &= -2ax_0 - cy_0 \\ e &= -cx_0 - 2by_0 \\ f &= - \left(\frac{x_0^2 \sin^2 \theta}{2\sigma_1^2} - \frac{x_0 y_0 \sin \theta \cos \theta}{\sigma_1^2} + \frac{y_0^2 \cos^2 \theta}{2\sigma_1^2} + \right. \\ & \left. \frac{y_0^2 \sin^2 \theta}{2\sigma_2^2} + \frac{x_0 y_0 \sin \theta \cos \theta}{\sigma_2^2} + \frac{x_0^2 \cos^2 \theta}{2\sigma_2^2} - \ln A \right) \end{aligned} \right. \quad (8) \end{aligned}$$

其残差平方和函数为

$$Q = \sum_{i=1}^N [ax_i^2 + by_i^2 + c x_i y_i + dx_i + ey_i + f - \ln f(x_i, y_i)]^2 \quad (9)$$

为使 Q 取值最小,根据最小二乘原理应有^[15]

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = \frac{\partial Q}{\partial b} = \frac{\partial Q}{\partial c} = \frac{\partial Q}{\partial d} = \frac{\partial Q}{\partial e} = \frac{\partial Q}{\partial f} = 0 \quad (10)$$

由此得方程组

$$X \times A = F$$

$$X = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^3 & \sum_{i=1}^N y_i^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N y_i & N \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^2 \ln f(x_i, y_i) \\ \sum_{i=1}^N y_i^2 \ln f(x_i, y_i) \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i \ln f(x_i, y_i) \\ \sum_{i=1}^N x_i \ln f(x_i, y_i) \\ \sum_{i=1}^N y_i \ln f(x_i, y_i) \\ \sum_{i=1}^N \ln f(x_i, y_i) \end{pmatrix} \quad (11)$$

通过求解该方程组可以求得参量 $a \sim f$,进而求出

光斑中心坐标为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{(2bd - ce)}{(c^2 - 4ab)} \\ y_0 = \frac{(cd - 2ae)}{(4ab - c^2)} \end{cases} \quad (12)$$

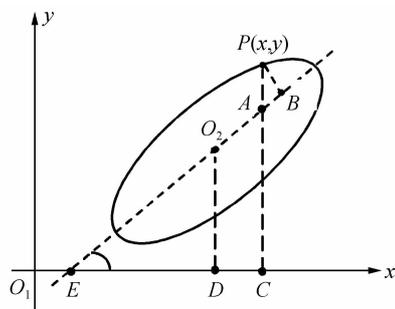


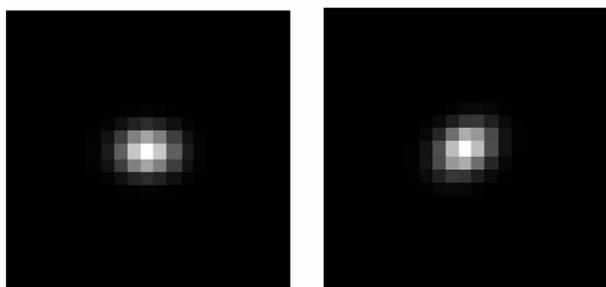
图6 高斯光斑模型

Fig. 6 Model illustration of Gaussian intensity spot

3 准确度与稳定性实验

3.1 仿真结果

在 MATLAB 软件中,生成一张分辨率为 320×256 像素的全黑图像,然后取 $\delta_1 = 2$ 和 $\delta_2 = 1.5$, θ 以 5° 为步长在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 内取值,根据式(7)在像素(0.3,0.7)位置生成模拟光斑,比较图7和图3(c)、(d)发现,模拟光斑与真实光斑非常接近.每个角度生成50幅光斑,并添加不同水平的高斯噪音,分别用本文提出的中心定位方法,以及原有的高斯拟合法和灰度重心法求光斑中心坐标,计算所得结果与真实中心坐标之间误差的均值、标准差,结果如图8.因为 x 、 y 向同性,故只列出 x 向结果.图中“—”表示无噪音,“—”表示添加标准差为0.02的高斯噪音,“×”、“□”和“○”依次表示灰度重心法、改进型高斯拟合法和高斯拟合法的计算结果.



(a) $\theta=90^\circ$

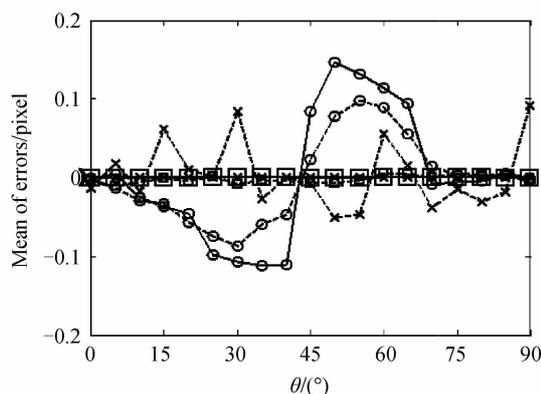
(b) $\theta=60^\circ$

图7 模拟光斑

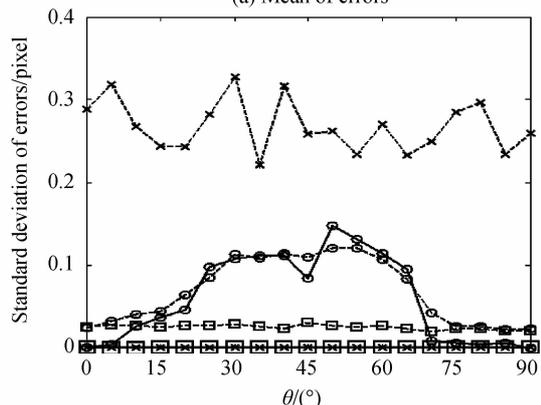
Fig. 7 Simulated spots

从图8可以看出,无噪音时,灰度重心法和改进型高斯拟合法的平均误差都很小,且不受光斑倾斜的影响;高斯拟合法的平均误差对光斑长轴与坐标轴夹角 θ 非敏感,仅适用于光斑倾斜角较小的特殊情况, θ 大于 15° 时存在明显的误差.加入噪音时,灰度重心法平均误差明显增大,而高斯拟合法和改进型高斯拟合法则

变化不明显.而标准差变化曲线则表明, θ 较小时,改进型高斯拟合法与高斯拟合法稳定性相当,但是当光斑倾斜时,改进型高斯拟合法有更好的稳定性.总体而言,改进型高斯拟合法的误差均值、标准差无论有无噪音、光斑与坐标轴夹角多大都基本保持平稳,说明其有很好的抗噪能力,普遍适用于强度成高斯分布光斑的中心定位.



(a) Mean of errors



(b) Standard deviation of errors

图8 模拟光斑中心定位结果曲线

Fig. 8 Center location results of simulated spots

3.2 实测结果分析

光栅衍射型超广角激光告警样机固定于测角机构上,1319 nm 连续固体激光器发出的激光经扩束准直后照向样机,通过调节测角机构的方位角和俯仰角模拟激光不同的入射方向.分别调节样机至某一方向(θ , ω)后保持入射激光与样机相对位置不变,然后连续拍摄,每次拍摄都采集有入射激光的目标图像和无激光的背景图片,然后做差处理,其结果作为一幅图像,如此反复对每一个激光入射方向采集50幅图像.分割出0级光斑,分别用加权灰度重心法、高斯拟合法和本文提出的改进型高斯拟合法计算每幅图像的光斑中心.分别用 $\theta=90^\circ$, $\omega=42^\circ$ 和 $\theta=60^\circ$, $\omega=46^\circ$ 代表成像光斑长轴与坐标轴平行和光斑倾斜两种情况,上述三种方法进行光斑中心定位,所得中心坐标整像素部分完全相同,分别为(89,0)和(83,39),亚像素坐标结果如图9.其中,“×”、“△”和“○”依次表示灰度重心法、高斯

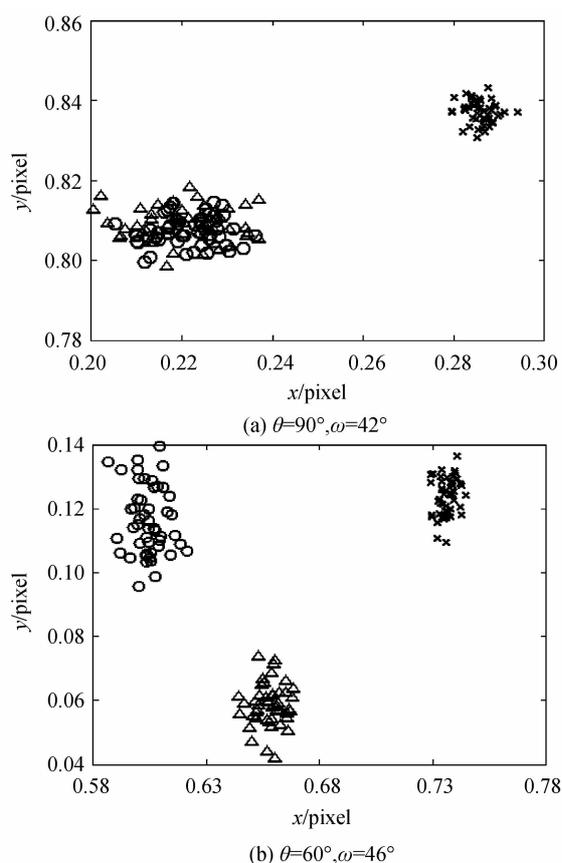


图9 亚像素坐标分布

Fig. 9 Distribution of sub-pixel coordinates

拟合法和改进型高斯拟合法的计算结果. 不同形状数据点的散布面积越小表明相应算法越稳定,同时,不同方法的数据点分布中心越接近,相应方法的结果一致性越好. 可以看出,当光斑长轴与坐标轴平行时,本文所提出的方法与高斯拟合法的激光中心定位结果非常接近,而与灰度重心法的计算结果有比较明显的差异,如图9(a)所示,因为虽然经预处理后图像噪声很小,但是受探测器像元填充率影响,成像光斑强度并非关于中心完全对称分布,对加权灰度重心法造成了干扰^[11-12]. 图9(b)表明,告警系统的成像光斑倾斜时,本文所提出的改进型高斯拟合法、灰度重心法以及高斯拟合法的激光中心定位结果彼此之间都存在明显的差异,这与模拟实验的结论一致.

表1是三种方法所求得的激光入射方向计算结果的统计值. 结果表明,虽然对告警系统采集的成像光斑进行了帧相减和高斯滤波的预处理,但三种方法的计算结果与激光的真实入射方向都有一定的误差,这是因为系统装配过程中元件位置与理论设计位置存在偏差给测量结果引入了系统误差,该类误差可以通过进一步的系统调试和校正加以消除. 排除系统误差的影响,可以看出,成像光斑长轴与坐标轴平行时,本文提出的激光中心定位方法与高斯拟合法无论稳定性还是计算结果都非常接近,明显优于灰度重心法. 而光斑倾斜时,本文方法计算结果的误差均值和标准差明显小于灰度重心法和普通高斯拟合法.

表1 激光入射方向测量结果统计

Table 1 Statistic result of laser incoming direction

		Mean error of θ	Mean error of ω	Standard error of θ	Standard error of ω
$\theta=90^\circ$ $\omega=42^\circ$	Weighted centroid	-0.537 1	4.012 9	0.542 6	4.053 7
	Gaussian fitting	-0.519 5	3.969 0	0.524 7	4.009 4
	This paper	-0.518 4	3.969 5	0.523 7	4.009 8
$\theta=60^\circ$ $\omega=46^\circ$	Weighted centroid	4.956 5	2.150 1	5.006 8	2.171 9
	Gaussian fitting	4.973 3	2.080 9	5.023 8	2.102 0
	This paper	4.926 4	2.064 8	4.976 4	2.085 7

4 结论

在对光栅衍射型超广角激光告警系统成像光斑特点分析的基础上,通过对二维高斯分布函数做深入分析,提出一种新的激光中心定位算法—改进型高斯拟合法. 该方法综合利用提取窗口内所有像素的灰度信息,通过解析表达式直接计算高斯分布光斑的亚像素中心位置. 仿真模拟和实验测试结果表明,和现有的高斯拟合法相比,改进型高斯拟合法具有基本相同的稳定性和定位准确度,但现有的高斯拟合法仅适用于成像光斑长轴与坐标轴平行的情况,一旦光斑倾斜,定位误差明显增大,而本文提出的改进型高斯拟合法可普遍适用于强度成高斯分布的任意倾斜程度的光斑,能够满足激光告警系统定向准确度的要求.

参考文献

- [1] ZHANG Jing-xu. Warning and orienting technology for threaten laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(4): 365-368.
张景旭. 激光威胁源告警定向技术研究[J]. *光学精密工程*, 2000, **8**(4): 365-368.
- [2] SHI Lan, WANG Hong. Research on the America's laser warning technologies and equipments[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(S): 335-339.
石岚, 王宏. 美军激光告警技术与装备发展分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(S): 335-339.
- [3] ZHU Jia-jian. Overview of laser warning technology [J]. *Physics*, 2009, **38**(11): 828-331.
朱家健. “解剖”激光告警[J]. *物理*, 2009, **38**(11): 828-331.
- [4] GAN Yuan-liu, LI Chao-rong. Dvelopment of laser alarm and laser interference technology [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2010, **30**(12): 15-19.
涂元柳, 李朝荣. 激光告警与激光干扰技术的发展[J]. *舰船电*

- 子工程, 2010, **30**(12):15-19.
- [5] WANG Long, WANG Yong-Zhong, SHEN Xue-ju, *et al.* Study of wide-angle staring laser threat detection system based on grating diffraction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(3): 0312005(5).
王龙,王永仲,沈学举,等.基于光栅衍射的广角凝视型激光告警技术研究[J].*光学学报*,2013, **33**(3):0312005(5).
- [6] WANG Xue-wei, ZHANG Chun-hua, ZHAO Zhao, *et al.* High accuracy centroid calculation of low SNR star image[J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(6): 342-347.
王学伟,张春华,赵昭,等.低信噪比星象质心定位算法分析[J].*红外技术*,2009,**31**(6):342-347.
- [7] TANG Guan-qun. Analysis and comparison of several calculation methods of beam spot center [J]. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2009, **24**(1): 61-64.
唐冠群,几种激光光斑中心定位算法的比较.[J].*北京机械工业学院学报*,2009,**24**(1):61-64.
- [8] ZHOU Zhong-liang, ZHOU Bing, HE Yong-qiang, *et al.* Laser spot location in imaging laser detecting systems [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(3): 248-251.
周中亮,周冰,何永强,等.成像型激光探测系统中光斑精确定位方法研究[J].*激光技术*, 2008,**32**(3):248-251.
- [9] QIN Yi, FU Xiao-ning, HUANG Feng. Multi-circle fitting algorithms for laser spot location [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2006, **26**(4): 519-523.
秦义,付小宁,黄峰.激光光斑定位的多圆拟合算法的研究[J].*西安科技大学学报*, 2006,**26**(4):519-523.
- [10] FENG Xin-xing, ZHANG Yan-li, YE Nan, *et al.* Fast algorithms on center location of two dimensional gaussian distribution spot [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0512002(8).
冯新星,张丽艳,叶南,等.二维高斯分布光斑中心快速提取算法研究[J].*光学学报*, 2012, **32**(5): 0512002(8).
- [11] DONG Hong-jun, ZHOU Zhong-liang, WANG Long. Subpixel location algorithm for laser spot in fish-eyes imaging laser warning system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(9): 0917002(7).
董红军,周中亮,王龙.鱼眼成像型激光告警系统光斑中心亚像元定位方法[J].*中国激光*, 2011,**38**(9):0917002(7).
- [12] WANG Hai-yong, FEI Zheng-hong, WANG Xin-long. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(7): 1672-1677.
王海涌,费峥红,王新龙.基于高斯分布的星象点精确模拟及质心计算[J].*光学精密工程*, 2009, **17**(7):1672-1677.
- [13] LIN Xiao-jie, YAO Jian-min, GUO Tai-liang, *et al.* Research of double laser spot center location method in glass thickness system [J]. *Optoelectronic technology*, 2012, **32**(2): 119-122.
林晓杰,姚剑敏,郭太良,等.玻璃测厚系统中激光双光斑中心定位方法[J].*光电子技术*,2012,**32**(2):119-122.
- [14] 王永仲. 鱼眼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006:30-40, 46, 55.
- [15] HUANG Fu-yu, LI Gang, HE Yong-qiang, *et al.* Algorithm for laser spot precise locating in omni-directional laser detecting system [J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(11): 1224-1228.
黄富瑜,李刚,何永强,等.全向激光探测系统中光斑精确定位方法研究[J].*激光与红外*, 2010,**40**(11):1224-1228.