

基于投影分割的激光告警光斑中心快速提取算法

武振涛 张瑞 李文越 畅彦祥 王亚祺 杨帅 薛鹏 王志斌

Rapid extraction algorithm of laser alarm spot center based on projection segmentation

WU Zhentao, ZHANG Rui, LI Wenyue, CHANG Yanxiang, WANG Yaqi, YANG Shuai, XUE Peng, WANG Zhibin

引用本文:

武振涛, 张瑞, 李文越, 等. 基于投影分割的激光告警光斑中心快速提取算法[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1170–1178. DOI: 10.5768/JAO202445.0602001

WU Zhentao, ZHANG Rui, LI Wenyue, et al. Rapid extraction algorithm of laser alarm spot center based on projection segmentation[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(6): 1170–1178. DOI: 10.5768/JAO202445.0602001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0602001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高精度激光告警参数提取算法

High-precision parameter extraction algorithm of laser alarm

应用光学. 2023, 44(6): 1258–1264 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610013>

高精度二维宽波段激光告警参数计算算法

Calculation algorithm of high-precision two-dimensional broadband laser warning parameters

应用光学. 2022, 43(1): 111–118 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0107001>

基于局部图像分割与多特征滤波的自适应桥梁露筋检测算法

Self-adaptive bridge bare rebar detection algorithm based on local image segmentation and multi-feature filtering

应用光学. 2020, 41(3): 508–515 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0302004>

基于图像分割和局部亮度调整的微光图像颜色传递算法

Low-light image color transfer algorithm based on image segmentation and local brightness adjustment

应用光学. 2020, 41(2): 309–317 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0202004>

基于法线引导的激光中心线提取方法

Laser center-line extraction method based on normal guidance

应用光学. 2023, 44(1): 211–218 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0107003>

基于激光和CCD组合的小孔转轮重复定位精度测量方法

Measurement method of repeated positioning accuracy of pinhole runnerbased on combination of laser and CCD

应用光学. 2021, 42(5): 919–925 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0507002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1170-09

基于投影分割的激光告警光斑中心快速提取算法

武振涛^{1,2}, 张瑞^{2,3}, 李文越⁴, 畅彦祥⁴, 王亚祺^{2,5}, 杨帅^{2,5}, 薛鹏^{2,5}, 王志斌^{1,2}

(1. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 山西省智能微波光电技术创新中心, 山西 太原 030051;
3. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051; 4. 陆装驻北京地区军代局某军代室, 山西 太原 030051;
5. 中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 针对现有激光告警系统中因数据处理不及时导致漏警、响应速度慢的问题, 提出了一种基于投影分割的光斑中心快速提取算法, 根据衍射图像中各级光斑横向均匀分布的特点, 提出先向坐标轴投影, 再分别计算光斑中心坐标, 实现快速提取的方法。将该算法部署到FPGA硬件系统, 使告警系统能够在一帧图像传输周期内完成光斑中心坐标提取任务, 提高了图像处理效率, 进而实现高效告警。经实验证明, 该算法光斑中心坐标提取最大误差为1个像素, 告警系统响应时间为17.453 ms。该方法通过优化图像处理算法, 缩短了告警设备响应时间, 实现了对来袭激光快速、准确的告警。

关键词: 激光告警; 投影分割; 图像处理; FPGA

中图分类号: TN247

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0602001

Rapid extraction algorithm of laser alarm spot center based on projection segmentation

WU Zhen-tao^{1,2}, ZHANG Rui^{2,3}, LI Wen-yue⁴, CHANG Yan-xiang⁴, WANG Ya-qi^{2,5},
YANG Shuai^{2,5}, XUE Peng^{2,5}, WANG Zhi-bin^{1,2}

(1. North University of China, School of Instrument and Electronics, Taiyuan Shanxi 030051, China; 2. Technology Innovation Center of Shanxi Provincial for Intelligent Microwave Photoelectric, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China; 3. North University of China, School of information and communication engineering, Taiyuan Shanxi 030051, China; 4. Military Representative Office of military equipment department in Beijing, Taiyuan Shanxi 030051, China; 5. North University of China, School of electrical and control engineering, Taiyuan Shanxi 030051, China)

Abstract: In order to solve the problems of missed alarm and slow response speed in the existing laser alarm system due to untimely data processing, a rapid extraction algorithm of spot center based on projection segmentation was proposed. According to the characteristics of the horizontal uniform distribution of spots at all levels in the diffraction images, a method of rapid extraction was proposed by projecting to the coordinate axis and calculating the center coordinates of light spot respectively. The proposed algorithm was deployed to the FPGA hardware system, so as to enable the alarm system to complete the task of extracting the center coordinates of the spot within a frame image transmission cycle, which improved the image processing efficiency and realized the efficient alarming. Experiments show that the maximum error of spot center coordinate extraction is 1 pixel, and the response time of the alarm system is 17.453 ms. By optimizing the image processing algorithm, the response time of the alarm equipment is shortened, and the rapid and accurate

收稿日期: 2024-03-27; 修回日期: 2024-05-08

基金项目: 国家自然科学基金 (62105302); 国家实验室开放基金 (LabSOMP-2023-02)

作者简介: 武振涛 (1998—), 男, 硕士, 主要从事光电探测、光电信息检测研究。E-mail: ztwu2020@163.com

通信作者: 王志斌 (1969—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事偏振测量、光谱测量、光电检测研究。E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn

alarm of the incoming laser is realized.

Key words: laser alarm; projection segmentation; image processing; FPGA

引言

随着激光技术的不断发展,其在军事上被广泛应用于制导、损毁、干扰、致盲等新型激光武器^[1-4],激光武器的发展将对现有的战争模式带来颠覆性的影响。告警是实施有效光电对抗的前提,激光告警技术^[5-7]能有效地识别来袭激光的方位和波长,从而及时做出预警,降低被敌方发现和击中的概率,保障我方人员设备安全。按工作原理划分,激光告警器有光谱识别型、相干识别型和散射识别型^[8-9]。相较于干涉型和散射型告警设备需要复杂的机械结构和精密的光学器件,光谱识别型激光告警设备技术难度小、成本低,成为开发种类最多的激光告警器。

光栅衍射型激光告警器是一种成像类光谱识别型激光告警系统^[10],主要由衍射光栅、光学镜头、阵列探测器和图像处理电路组成。相较于光电二极管、四象限光探测器等非成像类探测方式^[11-12],成像类告警系统^[13-15]具有更大的视场和角度分辨率,同时引入一维光栅使其能准确测量波长参数。然而,由于图像数据量大^[16-17],一般图像处理算法缺乏针对性^[18-19],使传统告警系统存在数据丢失、实时性差等问题。

针对以上问题,本文提出了一种基于投影分割的光斑中心快速提取算法。告警系统在高速采集图像的同时,向水平和竖直坐标轴投影,再分别计算光斑位置的横纵坐标,实现光斑中心快速提取。该方法解决了传统图像检测中数据存储、重复扫描在时间和硬件资源上的成本消耗,有效提高了图像处理效率,缩短了激光告警设备的反应时间,实现对来袭激光的及时告警,保证我军在各

种光电对抗环境下的战场生存能力。

1 光栅衍射型激光告警系统原理

光栅衍射型激光告警原理如图1所示,入射激光经过一维光栅衍射、光学透镜汇聚后,在面阵探测器上形成多级衍射光斑,其中,面阵探测器置于光学镜头焦平面处。由于衍射效率不同,各级衍射光斑面积大小不同,0级衍射光斑最大, ± 1 级次之。基于衍射型激光告警技术原理,在光学参数已知的告警系统中,衍射图像中0级光斑在 x 和 y 方向的中心偏移量分别可以表征入射激光的方位角和俯仰角,相邻的衍射光斑间距可以计算入射激光波长。因此,激光告警中图像处理的核心要求是准确获取0级和 ± 1 级光斑中心坐标。

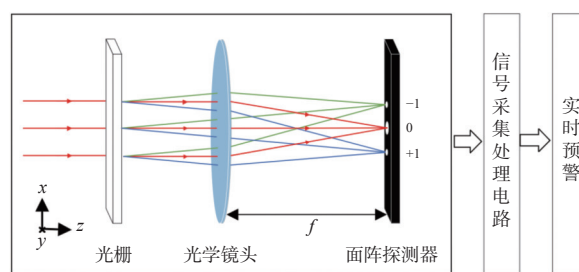


图1 光栅衍射型激光告警原理

Fig. 1 Diagram of grating diffractive laser warning principle

激光告警系统框图如图2所示,主要包括光学系统、FPGA数据处理和终端设备。光学系统完成光的衍射并在面阵探测器上汇聚形成衍射光斑。FPGA数据处理模块驱动面阵探测器将光学信号转化为电信号,控制AD采样将模拟量转化为数字量,通过对数字图像进行处理,将处理结果传输至终端。终端为电脑设备,实时显示处理结果。

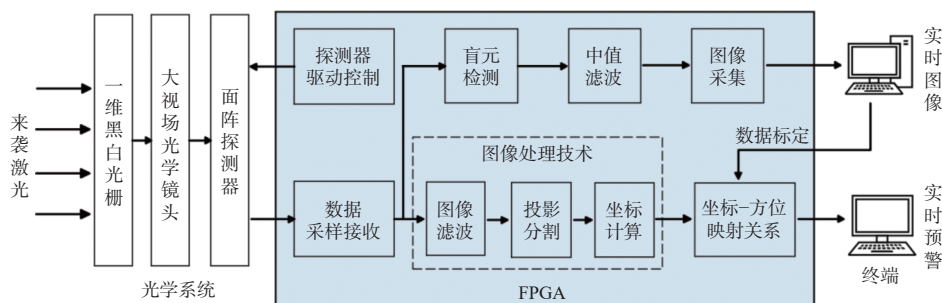


图2 激光告警系统框图

Fig. 2 Block diagram of laser alarm system

FPGA 数字图像处理分为两部分,在实验中,衍射图像经过简单中值滤波后传输至电脑端,采集到不同角度入射激光的衍射图像,通过数据分析软件拟合得到坐标与方位的映射关系;在应用时,衍射图像经图像滤波、分割计算快速提取衍射中心坐标,并通过坐标方位映射关系获取入射激光方位信息,传输至电脑端,实现预警。

表 1 为激光告警系统光学相关参数。本系统中采用山西国惠光电公司生产的 GHOPTO 短波红外焦平面阵列探测器。

表 1 激光告警系统相关参数

Table 1 Parameters related to laser alarm system

器件	参数	取值
黑白光栅	缝宽/ μm	2.5
	光栅常数/ μm	5.5
	尺寸大小/ mm^2	32×32
光学镜头	焦距/mm	14
	竖直视场/ $^\circ$	±36
	水平视场/ $^\circ$	±45
探测器	像元大小/ μm^2	15×15
	像元阵列/像素	640×512
	响应波段/ μm	0.9~1.7

本文通过搭建激光告警实验测试系统,采用投影分割算法优化激光告警图像处理方法,完成 FPGA 数据处理程序设计,可以实时高效地完成光斑中心坐标的提取。

2 基于投影分割的光斑中心快速提取算法

针对衍射图像中光斑横向均匀分布的特点,提出了基于投影分割的光斑中心快速提取算法。首先,通过图像滤波,去除因探测器盲元和背景干扰而产生的噪点;其次,通过坐标轴投影的方式分割光斑像素;最后,取投影量分别计算横纵坐标。

在图像滤波设计中,由于光斑灰度值与背景值差异明显,通过阈值比较对图像进行二值化。使用开运算对图像进行滤波处理,保证了光斑亮点区域的连通,优化边缘像素。开运算的核心是卷积运算,二维离散卷积公式可表示为

$$h(x,y)=f(x,y)*g(x,y)=\sum_{n_1=-\infty}^{\infty}\sum_{n_2=-\infty}^{\infty}f(n_1,n_2)\times g(x-n_1,y-n_2) \quad (1)$$

式中: $f(x,y)$ 为图像; $g(x,y)$ 为卷积核; n_1 、 n_2 表示计数;符号 $*$ 表示卷积操作。

在投影分割设计中,分别计算衍射图像在两个坐标轴上的投影量。对于亮点为 1、暗点为 0 的二值图像,使用数组存储灰度累加值,则数组索引值为坐标,数组值为亮点像素个数。以 x 轴为例,投影量可记为

$$X(i)=\sum_{y=-\infty}^{\infty}\sum_{z=-\infty}^{\infty}f(i,y) \quad (2)$$

式中: $f(x,y)$ 为图像; X 表示数组; i 表示索引值。

在光斑中心坐标提取算法设计中,向坐标轴投影可以快速获取目标参数,同时能够分割多个检测目标。图 3 为光斑投影示意图,在 x 轴投影量上提取到光斑的左右边界,在 y 轴投影量上提取到上下边界。根据圆的对称性,采用光斑边界取均值的方式获得中心 (x_0,y_0) 。考虑光斑可能出现的椭圆畸变,分别用 d_x 和 d_y 表示两个方向的直径。

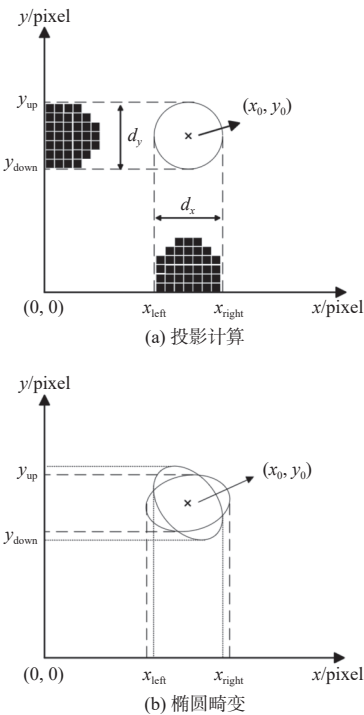


图 3 光斑投影示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spot projection

系统在面阵探测器上采集到 1 064 nm 波段激光衍射图像及滤波结果如图 4 所示,衍射光斑呈现圆形,基于单缝干涉及多缝衍射原理,光斑在水平方向发生多级衍射,0 级光斑最亮、±1 级光斑次之,各级光斑横向均匀分布在一条水平直线上。

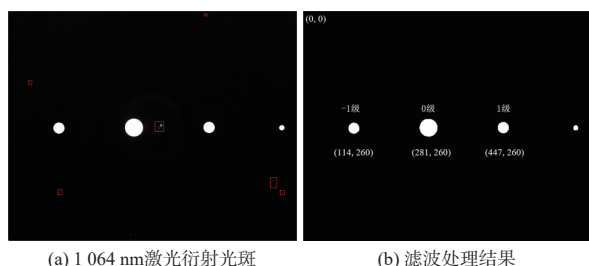


图4 衍射图像及滤波结果

Fig. 4 Diffraction images and filtering results

根据上述理论分析和光斑分布特点,将衍射图像分别在 x 轴、 y 轴上投影。其中,在 x 轴上的投影可以完成不同级光斑的分割和部分参数提取。对上述图像的投影运算结果如图5所示,横坐标表示光斑位置坐标,纵坐标(value)为光斑亮点像素个数(piece)。分析 x 轴投影结果,由横坐标可提取到各级光斑的 x 坐标,纵坐标获得各级光斑 y 方向直径 d_y 。

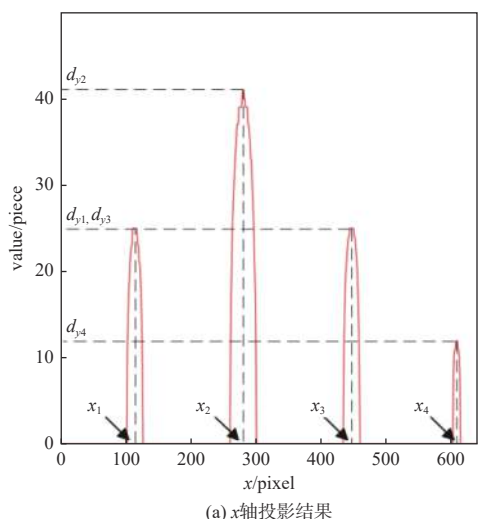
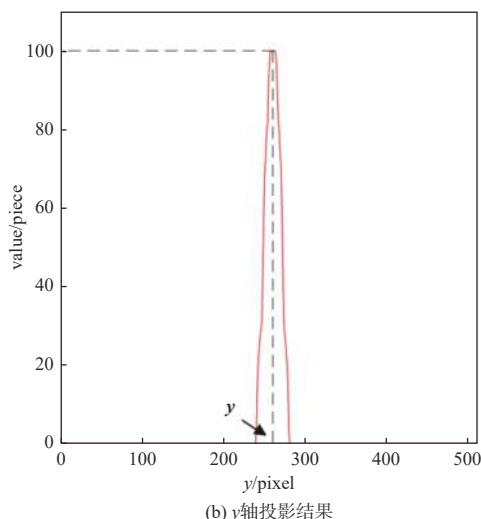
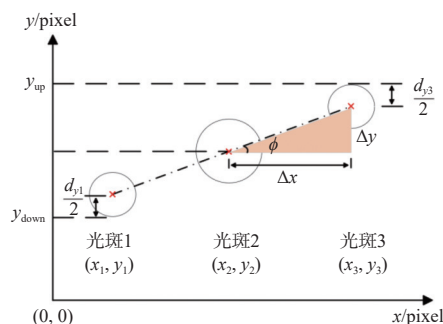
(a) x 轴投影结果(b) y 轴投影结果

图5 坐标轴投影结果

Fig. 5 Coordinate axis projection results

理论上,衍射光斑横向均匀分布于一条水平直线上。因此,在 y 轴上光斑投影发生重叠,各级光斑有相同的纵坐标。但实际情况下衍射光栅的摆放并非竖直,光斑排列存在微小的倾角 ϕ ,故需对 y 坐标提取矫正,以3个光斑为例,矫正计算方法如图6所示。

图6 y 坐标矫正示意图Fig. 6 Schematic diagram of y -coordinate correction

由 x 投影可计算得到各级光斑水平坐标,各级光斑竖直方向的直径为 d_y ,边缘两个光斑纵坐标的计算公式为

$$\begin{cases} y_1 = y_{\text{down}} + \frac{d_{y1}}{2} \\ y_3 = y_{\text{up}} - \frac{d_{y3}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

因此,倾斜角度可表示为

$$\phi = \arctan\left(\frac{y_3 - y_1}{x_3 - x_1}\right) \quad (4)$$

由几何关系可计算得到中间部分光斑的 y_2 坐标

$$\begin{cases} x = x_3 - x_2 \\ y = \tan \phi \times x \\ y_2 = y_3 - y \end{cases} \quad (5)$$

在各项光学参数已知的实验系统中,可通过计算光栅倾斜角度,计算 y 方向各级光斑之间的距离,进而确定各级光斑的具体坐标。该方法通过投影分割图像区域,利用投影量分别计算横纵坐标。将二维图像多目标检测简化为一维数组计算,实现了快速提取光斑中心的目的,易于部署到硬件FPGA中实现。

3 FPGA 程序设计及仿真验证

在图像处理技术中,传输一帧图像所需要的时间称作帧周期。传统图像算法需要多次重复扫描图像,完成图像存储、光斑定位、坐标计算等步骤,因此,激光告警系统实际处理一帧图像需要消耗 n 个帧周期($n \geq 3$)。在FPGA做数据处理时间内,

丢失部分图像数据,可能造成严重漏警,极大影响我方战场生存能力。本文提出的快速检测算法通过坐标轴投影实现数据降维,分离纵横坐标计算进程,有利于FPGA并行计算,简化了光斑中心坐标提取流程,可实现在1个图像传输周期内完成坐标提取,缩短了告警系统的响应时间。

本次FPGA图像处理硬件设计如图7所示,首

先对输入图像二值化,其次通过腐蚀和膨胀模块(U0、U1)完成滤波处理,最后由计算模块(U2)完成投影分割并计算光斑坐标中心。在时序上各模块并行执行,对FPGA程序各模块进行延时分析,通过控制图像传输周期,增加延时时间以保证各部分输出正常。使探测器在高频率工作下,实时处理每帧图像,解决了图像丢帧和系统响应慢的问题。

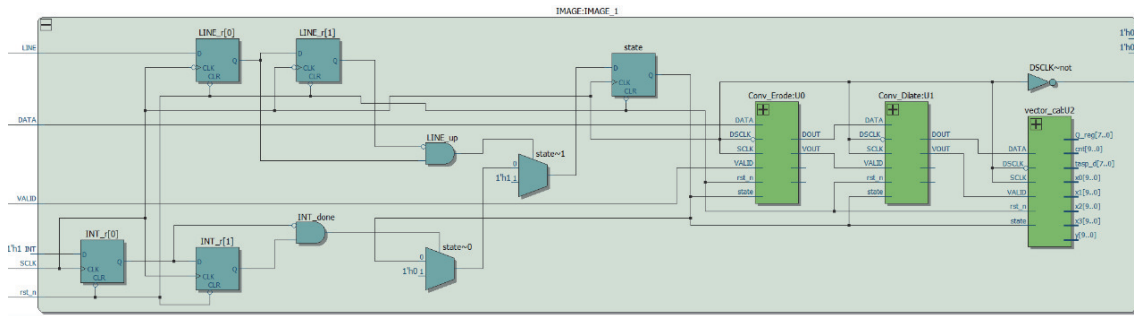


图7 FPGA图像处理硬件设计

Fig. 7 Hardware design of FPGA image processing

本次实验中,配置面阵探测器为行传输模式,对640×512像素的图像数据按行传输,每次传输640个像素,共计512次,完成一帧图像传输。图像传输周期计算公式为

$$\begin{cases} T_{\text{frame}} = T_{\text{read}} + T_{\text{hold}} \\ T_{\text{read}} = T_{\text{mc}} \times H \times V + T_{\text{rd}} \times (V - 1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: T_{frame} 表示帧周期; T_{read} 表示读出时间; T_{hold} 表示延时时间; T_{mc} 表示时钟周期; $H \times V$ 表示像素尺寸;行输出间隔为 T_{rd} ($T_{\text{rd}} = 17T_{\text{mc}}$)。

在图像滤波设计中,使用FIFO(first in first out)和寄存器组成的3×3窗口如图8所示,通过在图像上滑动实现卷积的目的。使用两个卷积模块分别实现腐蚀和膨胀运算,每个模块运行过程中需要缓存1行数据,在第2行数据进入卷积模块时同步输出结果,故图像滤波处理的结果会延时两行时间输出。

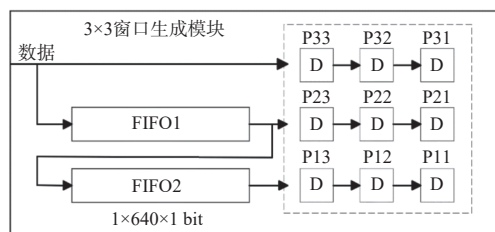


图8 生成3×3滑动窗口模块

Fig. 8 Generation of 3×3 sliding window module

针对滤波处理后的数据流,按水平和竖直两个维度计算灰度累加值。在投影量的构造上,y轴投

影量选择使用512×8 bit的RAM存储,每一行传输完成后将灰度累加值写入RAM中,共计512个地址;x轴投影量选择640×8 bit的FIFO存储,根据FIFO先入先出的规则,在主时钟下每行数据来时,取出上一行的灰度累加量,加上本行的灰度值,写入FIFO对应位置,每行有640个像素,因此FIFO需要640个地址空间,实现了两个维度投影量的计算。最后,通过遍历投影量并标记投影量中非零数据开始和结束的地址来分割光斑,确定光斑的左右边界,通过取均值得到光斑中心坐标。遍历一次投影量消耗640个系统时钟,结合滤波处理的输出延时,至少需要预留3个行周期来完成图像处理,总延时时间 $T_{\text{hold}} > 1954 T_{\text{mc}}$ 。

FPGA仿真结果如图9所示,由于本系统光栅位置已经过矫正,其倾角对坐标提取结果影响较小,因此仅采用边界取均值的方式提取光斑中心。针对图6中的衍射图像,程序提取到4个光斑的相同纵坐标y以及横坐标 x_0 、 x_1 、 x_2 、 x_3 ,并根据光斑大小 d_y 筛选最大的0级光斑和次级光斑,其中,0级光斑为(281, 260),-1级光斑为(114, 260)。本次设计中,光斑边界值提取到像素级,而光斑坐标取平均的方式可将坐标精度提取到0.5个像素,可通过设计标志位来判断是否有小数位。受限于芯片资源并充分考虑系统技术指标要求,舍去光斑坐标的小数部分。

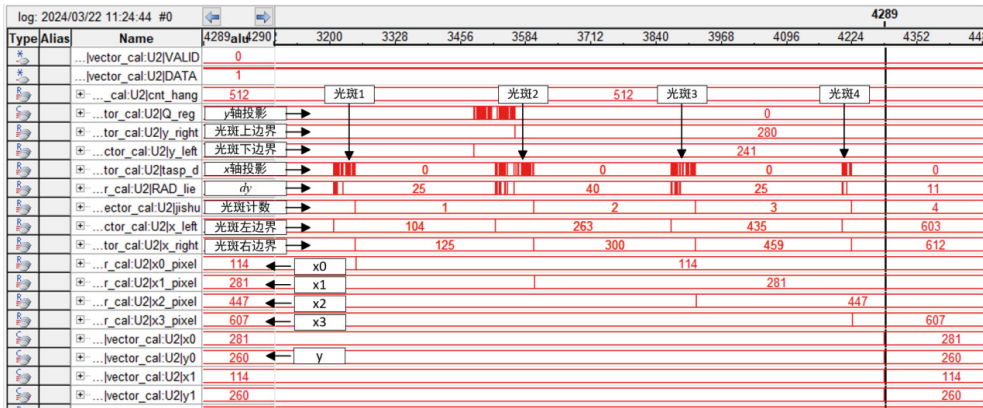


图9 程序仿真结果

Fig.9 Program simulation results

4 实验结果和数据分析

根据上述原理搭建激光告警测试系统如图 10 所示。在实验中,二维转台搭载激光告警系统设备,固定激光器使其与转台转轴中心、系统镜头中心在同一直线。激光器增加前置扩束镜模拟激光入射,通过转动转台来模拟不同角度激光入射情况。本此实验以激光武器中典型的红外 1 064 nm 波长的激光为例,通过采集不同角度入射激光的衍射图像,提取衍射图像光斑中心坐标,验证该光斑投影快速算法的准确性。

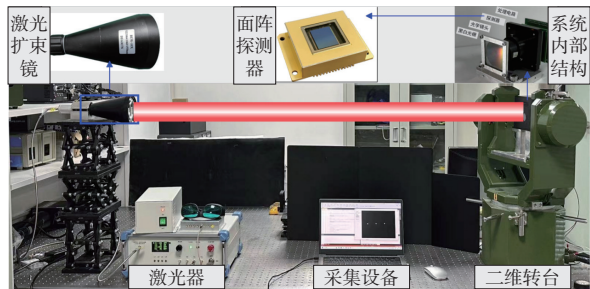


图10 激光告警实验测试装置

Fig. 10 Laser alarm experimental test device

其中,激光器可发射峰值功率 200 mW 的 1 064 nm 激光,并可通过旋钮可调节输出功率;二维转台精度方位可调角度范围 $\pm 90^\circ$,俯仰可调范围 $-70^\circ \sim +110^\circ$,角位置定位精度 $\leq \pm 2''$,角度可调分辨率 0.01° 。

假设 1 064 nm 波段激光以方位角 α 、俯仰角 β 进入激光告警系统,采集衍射光斑的变化情况如图 11 所示。当 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$ 时,0 级光斑处于图像中心。光斑在水平方向随着方位角的变化而移动,在竖直方向随着俯仰角的变化而移动。根据衍射型激光告警技术原理,0 级衍射光斑的横坐标、

纵坐标可分别表征入射激光方位角、俯仰角的情况。

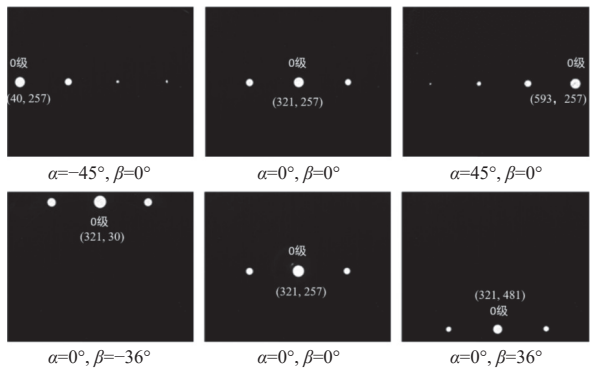


图11 入射角度与衍射图像变化关系

Fig. 11 Relationship between angle of incidence and diffraction image variation

设计 50 次重复性实验,固定 1 064 nm 波段激光器,搭载系统的二维转台分别以俯仰角 β 为 -36° 、 -15° 、 0° 、 15° 、 36° 时,从 -45° 到 45° 以 10° 的间隔转动方位角 α ,使用上述投影快速算法提取光斑中心坐标,0 级、+1 级和-1 级光斑提取结果如图 12 所示。由第 21~30 次实验结果可知,当俯仰角为 0° 时,转动方位角,0 级光斑从衍射图像最左侧移动到最右侧,在数据中体现为 x 值从小到大变化,而 y 坐标近似为一条直线, ± 1 级衍射光斑分布于 0 级光斑两侧。每 10 组数据对应不同的俯仰角,在数据上体现为不同 y 轴坐标范围,并由此可区分激光入射的方位、俯仰信息。实验结果展示了在系统视场范围内,随着激光入射角度的变化,衍射光斑位置的变化情况。并通过分析光斑坐标位置的提取情况,证明了该投影快速算法的有效性。

在 $|\alpha| > 20^\circ$ 时,+1 级或-1 级衍射光斑离开视野

范围,针对图 12 中检测到的 120 个衍射光斑,使用霍夫圆拟合法提取光斑坐标。由于二值图像中的光斑非严格意义上的圆,各种计算结果均有不同程度的近似。若以霍夫算法检测为标准,计算投影快速算法提取到的各级衍射光斑中心像素最大误差为 1 个像素,如图 13 所示。

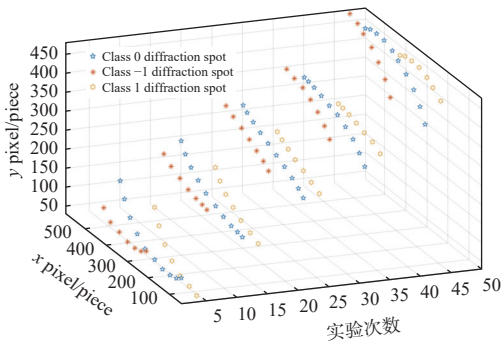


图 12 各级衍射光斑中心提取情况

Fig. 12 Extraction of diffraction spot centers at all levels

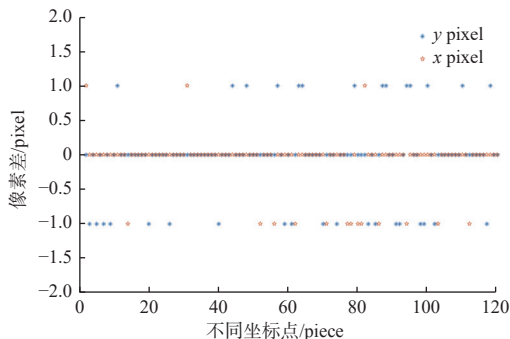


图 13 坐标中心提取准确性分析

Fig. 13 Accuracy analysis of coordinate center extraction

根据激光告警技术原理,0 级衍射光斑中心坐标与方位俯仰角可近似为线性关系。本次设计将光斑中心坐标精确到整数像素,则告警入射角分辨率由一个像素所能区分的最大角度来衡量,在图 11 对系统设计的视场角边界的衍射图像进行采集中,0 级光斑坐标中横坐标变化范围为 40~593,纵坐标变化范围为 30~481,因此,方位角分辨率为 $90^\circ/553 \approx 0.17^\circ$,俯仰角分辨率为 $72^\circ/451 \approx 0.16^\circ$ 。针对一个像素的中心坐标最大误差,激光告警系统方位角、俯仰角的测量绝对误差分别低于 0.17° 、 0.16° 。对比文献 [13] 提出的参数提取方法中方位角 0.29° 、俯仰角 0.38° 的最大测量误差,可以认为能够满足检测要求。

若定义激光告警系统读取并处理一帧图像的时间为系统响应时间。对 FPGA 程序设计的分析情况

如表 2 所示。在最大速度工作模式 ($T_{mc}=20\text{ MHz}$) 和全像素分辨率 (640×512 像素) 下,由式 (6) 可计算得到该系统的读出时间为 17.253 ms 。为保证各部分延时输出,取 $T_{hold} = 4\,000T_{mc}$,计算得到延时时间为 0.2 ms ,则本系统的响应时间为 17.453 ms 。传统质心法等圆检测算法需要重复扫描 3 次,完成存储、标记、计算的过程,在相同条件下,系统响应时间约为 51.759 ms 。相较于传统圆检测算法,本次程序设计节省了约 60% 的逻辑资源和存储资源消耗。由表 2 中周期消耗一项参数说明可知,该算法设计能在单次图像传输周期内完成对应参数的提取,解决了传统算法计算时间过长造成的中间图像数据丢失问题。

表 2 FPGA 程序设计分析

Table 2 FPGA programming analysis

指标参数	投影快速检测算法	传统圆检测算法
响应时间	帧周期构成 $T_{read} + T_{hold}$	T_{read}
	帧周期消耗 1	3
	响应时间/ms 17.453	51.759
硬件消耗	组合逻辑 1 630	12 661
	时序逻辑 2 456	2 979
	存储单元/bit 507 372	1 665 668

在要求缩短响应时间、实现实时高精度激光告警的大背景下,霍夫圆检测、高斯拟合等高精度方法,因其有复杂的小数参与,需要耗费大量逻辑资源,不利于部署到 FPGA 中实时运算。传统的灰度质心法、重心法等圆检测算法,根据圆的对称性,仅需考虑相邻像素并作简单计算即可得到圆心坐标,其精度不如拟合算法高,但可通过对数据流的多次扫描获得坐标参数。本文针对衍射图像各级光斑横向均匀分布且共线的特点,提出的投影分割算法,解决了传统圆检测算法需要多次扫描的问题,进一步提高了数据的实时性,实验结果表明该算法可在满足检测需求的情况下,进一步缩短了系统响应时间,优于传统圆检测算法。

5 结论

针对复杂战场情况下对来袭激光高效告警的需求,本文基于光栅型激光告警原理,结合衍射光斑横向均匀分布特点,设计了一种高效的 FPGA 图像处理算法。通过计算衍射图像的坐标轴投影量来优化光斑中心提取算法,能够准确快速地提取

到光斑中心,经过实验验证,光斑中心提取最大误差为1个像素,告警系统响应时间约为17.453 ms,且同比FPGA硬件资源消耗减少了60%,该算法能显著提高激光告警系统反应时间,实现对来袭激光迅速、高效告警,有效提高了我军的战场生存能力。

随着激光技术的不断发展,调制后的脉冲激光有低重复频率、宽窄脉的特点,因此具有很好的隐蔽性。本文介绍的衍射光斑投影算法具有快速处理数据的能力,能够配合高频探测器,为脉冲激光的告警提供一种解决思路。

参考文献:

- [1] 李伟,余志锋,邓晓智.美国激光武器发展建设研究[J]. *激光与红外*, 2023, 53(11): 1637-1643.
LI Wei, YU Zhifeng, DENG Xiaozhi. Research on the development and construction of laser weapons in the United States[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(11): 1637-1643.
- [2] 刘小强,杨修林,陆培国,等.激光武器控制系统研究[J]. *激光与红外*, 2022, 52(8): 1238-1245.
LIU Xiaoqiang, YANG Xiulin, LU Peiguo, et al. Research on laser weapon control system[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(8): 1238-1245.
- [3] 丁宇,姜锋,郑荣山,等.美国高能激光武器发展概况[J]. *光电技术应用*, 2021, 36(6): 1-9.
DING Yu, JIANG Feng, ZHENG Rongshan, et al. Development of high-energy laser weapons in the United States (invited)[J]. *Application of Optoelectronic Technology*, 2021, 36(6): 1-9.
- [4] 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): 13-17.
LIU Zejin, YANG Weiqiang, HAN Kai, et al. Discussion on design criteria for laser weapons[J]. *China Laser*, 2021, 48(12): 13-17.
- [5] 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. Analysis on the development of photoelectric alarm technology and foreign typical equipment[J]. *Optoelectronic Technology Application*, 2020, 35(3): 12-16.
- [6] 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 precision counter measures[J]. *Tank Armored Vehicle*, 2019(15): 60-61.
- [7] 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. Current situation and development trend of laser reconnaissance and warning technology[J]. *Modern Information Science and Technology*, 2019, 3(10): 44-46.
- [8] 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. Research on active and passive laser detection technology for space platform[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(3): 550-556.
- [9] 张瑞,杨雪梅,石金,等.宽光谱多参数激光告警探测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(8): 2581-2587.
ZHANG Rui, YANG Xuemei, SHI Jin, et al. Research on multi-parameter laser alarm detection with wide spectrum[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(8): 2581-2587.
- [10] 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 alarm with wide band and large field of view based on black and white grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(19): 2295-2304.
- [11] 李征,许昊宇,梁静远,等.四象限探测器光斑检测原理及其研究进展[J]. *应用光学*, 2023, 44(5): 927-942.
LI Zheng, XU Haoyu, LIANG Jingyuan, et al. Principle and research progress of spot detection in four-quadrant detector[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(5): 927-942.
- [12] 于一,李世伟.高空间分辨率的非成像型激光告警装置设计[J]. *激光杂志*, 2023, 44(4): 57-59.
YU Yi, LI Shiwei. Design of non-imaging laser alarm device with high spatial resolution[J]. *Journal of Lasers*, 2023, 44(4): 57-59.
- [13] 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.
ZHANG Zixuan, ZHANG Rui, ZHANG Zhuoqi, et al. High precision laser alarm parameter extraction algorithm[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(6): 1258-1264.
- [14] 吴琼,张瑞,石金,等.高精度二维宽波段激光告警参数

- 计算算法[J]. [应用光学](#), 2022, 43(1): 111-118.
- WU Qiong, ZHANG Rui, SHI Jin, et al. Algorithm for calculating alarm parameters of high-precision two-dimensional wide-band laser[J]. [Journal of Applied Optics](#), 2022, 43(1): 111-118.
- [15] 石金, 张瑞, 程亚昊, 等. 基于 FPGA 的激光告警中激光脉宽测量系统研究[J]. [激光杂志](#), 2022, 43(10): 51-55.
- SHI Jin, ZHANG Rui, CHENG Yahao, et al. Research on laser pulse width measurement system in laser alarm based on FPGA[J]. [Journal of Lasers](#), 2022, 43(10): 51-55.
- [16] 丁鑫, 李晓, 张瑞, 等. 宽波段双探测器高精度激光告警采集控制系统[J]. [激光杂志](#), 2023, 44(9): 37-42.
- DING Xin, LI Xiao, ZHANG Rui, et al. Wideband dual-detector high-precision laser alarm acquisition control system[J]. [Journal of Lasers](#), 2023, 44(9): 37-42.
- [17] 尚琰, 张瑞, 林聪, 等. 光栅衍射型宽波段大视场激光告警图像处理[J]. [激光杂志](#), 2021, 42(11): 92-96.
- SHANG Yan, ZHANG Rui, LIN Cong, et al. Grating diffraction type wide-band large-field laser alarm image processing[J]. [Journal of Lasers](#), 2021, 42(11): 92-96.
- [18] 徐培玲, 王玉. 大气激光通信载波光信号接收过程中光斑检测技术研究[J]. [电子器件](#), 2023, 46(5): 1230-1235.
- XU Peiling, WANG Yu. Research on spot detection technology in the process of receiving optical signals from atmospheric laser communication carriers[J]. [Electronic Devices](#), 2023, 46(5): 1230-1235.
- [19] 刘爱胤, 熊根良, 姚健康, 等. 基于霍夫圆检测的标志物多图像特征定位方法[J]. [计算机仿真](#), 2021, 38(3): 341-345.
- LIU Aiyin, XIONG Genliang, YAO Jiankang, et al. Multi-image feature localization method of marker based on Hough circle detection[J]. [Computer Simulation](#), 2021, 38(3): 341-345.