

基于双目CMOS图像传感的激光告警技术

牛家麒 张瑞 石金 张卓奇 张子暄 王志斌 李孟委

Laser warning technology based on binocular CMOS image sensor

NIU Jiaqi, ZHANG Rui, SHI Jin, ZHANG Zhuoqi, ZHANG Zixuan, WANG Zhibin, LI Mengwei

引用本文:

牛家麒, 张瑞, 石金, 等. 基于双目CMOS图像传感的激光告警技术[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1291–1297. DOI: 10.5768/JAO202445.0607002

NIU Jiaqi, ZHANG Rui, SHI Jin, et al. Laser warning technology based on binocular CMOS image sensor[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(6): 1291–1297. DOI: 10.5768/JAO202445.0607002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0607002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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>

空间平台主被动激光探测技术研究

Active and passive laser detection technology in space platform

应用光学. 2021, 42(3): 550–556 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0307004>

连续激光辐照背照式CMOS图像传感器实验研究

Experimental study on back-illuminated CMOS image sensor irradiated by CW laser

应用光学. 2024, 45(5): 1072–1078 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0507003>

亚波长光栅偏振片的纳秒脉冲激光损伤特性

Nanosecond pulse laser damage characteristics of sub-wavelength gratings polarizers

应用光学. 2019, 40(1): 138–142 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107002>

多波长激光探测微小摄像头机理研究

Mechanism of multi-wavelength laser detection of micro-camera

应用光学. 2022, 43(4): 809–818 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0407004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1291-07

基于双目 CMOS 图像传感的激光告警技术

牛家麒^{1,2,4}, 张 瑞^{2,3,4}, 石 金^{1,2,4}, 张卓奇^{1,2,4}, 张子暄^{2,3,4}, 王志斌^{1,2,4}, 李孟委^{1,2,4}

(1. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 前沿交叉科学研究院, 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. 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)

摘 要: 针对二维激光告警中测量来袭激光波长和角度分辨率低且视场角度范围低的问题, 提出了一种采用双目图像传感器实现激光告警的方案。该方案的系统主要由光栅、透镜组和 2 个 COMS 图像传感器组成。基于光栅衍射原理进行双目探测以提高测量角度分辨率, 通过来袭激光经过光栅衍射后相邻两级的衍射光斑在 CMOS_1 上的像素距离, 得到来袭激光的波长, 通过入射激光在 CMOS_2 图像传感器中的光斑中心位置, 得到来袭激光的二维方向角。通过实验验证了其测量可行性。实验结果表明, 改进后测得的波长分辨率优于 6 nm, 角度分辨率为 0.1°, 视场角为 ±50°, 角度测量精度为 0.1°。

关键词: 激光告警; 双目探测; 光栅衍射; 波长; 二维方向角

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0607002

Laser warning technology based on binocular CMOS image sensor

NIU Jiaqi^{1,2,4}, ZHANG Rui^{2,3,4}, SHI Jin^{1,2,4}, ZHANG Zhuoqi^{1,2,4}, ZHANG Zixuan^{2,3,4},
WANG Zhibin^{1,2,4}, LI Mengwei^{1,2,4}

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Academy for Advanced Interdisciplinary Research, North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 4. Engineering and Technology Research Center of Shanxi Provincial for Optical-Electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problems of low resolution of wavelength and angle, and low angle range of field of view of incoming laser measurement in two-dimensional laser alarm, a scheme of laser alarm using binocular image sensor was proposed. The optical system was mainly composed of grating, lens group and two COMS image sensors. Based on the grating diffraction principle, binocular detection was carried out to improve the angular resolution of measurement. The wavelength of the incoming laser was obtained by measuring the pixel distance of the diffraction spot of two adjacent levels on CMOS_1, and the two-dimensional direction angle of the incoming laser was obtained by measuring the center position of the spot of the incident laser in the CMOS_2 image sensor. The measurement feasibility was verified by experiments. The experimental results show that the improved wavelength resolution is better than 6 nm, the angle resolution is 0.1°, the angle of field is ±50°, and the accuracy of angle measurement is 0.1°.

收稿日期: 2023-10-24; 修回日期: 2023-12-04

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: 牛家麒 (1996—), 男, 硕士, 主要从事光电探测与光电信息检测技术研究。E-mail: niujiaqi_nuc@163.com

通信作者: 张瑞 (1987—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事激光告警、光谱偏振探测、光电目标识别等技术研究。

E-mail: zhangrui@nuc.edu.cn

Key words: laser warning; binocular detection; grating diffraction; wavelength; two dimensional direction angle

引言

作为光电对抗领域的重要组成部分,发展激光告警技术将直接关系到被保护目标的战场生存状况^[1]。随着各种激光武器和装备越来越多地应用于现代战场,其破坏能力已经严重威胁到各种军用和民用设施^[2],因此,实时探测和识别来袭激光的波长、方位等特征信息至关重要^[3]。研究激光告警技术的目的是,在较大视场范围内,准确地确定来袭激光的波长和方位等信息^[4]。

目前激光告警主要分为 2 大类:光谱识别型和相干识别型。光谱识别型激光告警可分为非成像型和成像型 2 种。非成像型激光告警结构简单、探测灵敏度高,但角度分辨率低,仅能探测到某些特定波长的激光,无法分辨波长大小,虚警率较高^[5]。例如,英国 1220 激光测试仪器水平视场角为 360°,俯仰-15°~40°,角度分辨率为 22.5°;德国 HLWE 机载激光测试仪器水平视场角为 360°,俯仰-20°~60°,角度分辨率为 5°;俄罗斯 SPEKTR-F 舰载激光测试系统,水平视场角为 360°,俯仰-15°~75°,角度分辨率为 5°。国内闫万昌研制的激光测试仪器单个探测器视场角达 135°,角分辨率为 45°;卢万欣研制的激光告警机具有方位角 360°、俯仰角 180°的视场角,水平方向的角分辨率为 3°,竖直为 45°^[6-8]。

成像光谱识别型激光测试仪器多采用广角远心鱼眼透镜和 CCD 或 PSD 器件等结构。它具有较高的角度分辨率,但只能探测特定波长的激光,无法分辨波长大小。例如,美国的 HALWR 高精度激光测试仪器视场角水平 30°、俯仰 20°,角度分辨率小于 1°;加拿大的 HARLID 高角度分辨率激光探测器视场角水平或者俯仰 90°,角度分辨率为 ±1°。国内 WANG L 等人基于鱼眼透镜和正弦振幅光栅的广角激光检测系统的优化设计,实现了 80°的视场角,最大波长误差为 40 nm,最大到达角误差约为 2°^[9]。

相干识别型激光告警利用激光的相干性进行判别,根据干涉形成的方式,可分为法布里-珀罗(F-P)型、迈克尔逊型和光栅衍射型等种类。法布里-珀罗相干型激光测试仪器的制作工艺难度大,稳定性比较差;迈克尔逊相干型激光测试仪器光学系统结构复杂、工艺要求高、数据处理复杂;光

栅衍射型激光测试仪器无需机械扫描,对光学器件的工艺要求比迈克尔逊型的低,干涉图样的数据处理也较简单。它具有较高的灵敏度、角度和波长分辨率,以及较大的视场角和较宽的波长探测范围^[10]。例如,美国 Optra 公司研制的 Laser Event Recorder 激光测试仪器,探测器波长范围为 0.4 μm ~ 1.1 μm,波长分辨率为 10 nm,视场角大于 40°^[11]。在国内,中北大学从 2004 年开始对光栅衍射型激光告警系统进行研究,截止到目前,中北大学最新研制的二维激光告警系统方位角为 95°,俯仰角为 75°,角度分辨率达到 0.5°^[12]。

综上所述,针对目前激光告警系统分辨率低的问题,本文基于光栅衍射原理,采用双目 CMOS 图像传感器实现了高精度的二维激光告警。

1 基本原理

由光栅衍射理论^[13-14]可知,衍射图像中亮光斑位置的方向由式(1)决定。

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

式中: d 为光栅常数; θ 为衍射角。如图 1(a) 所示,当平行光以入射角 ψ 斜入射到透射光栅上,光线 R_1 比相邻的光线 R_2 超前 $d \sin \psi$,在离开光栅时, R_2 比 R_1 超前 $d \sin \theta$,所以这 2 束光的光程差为

$$\Delta = d \sin \psi - d \sin \theta \quad (2)$$

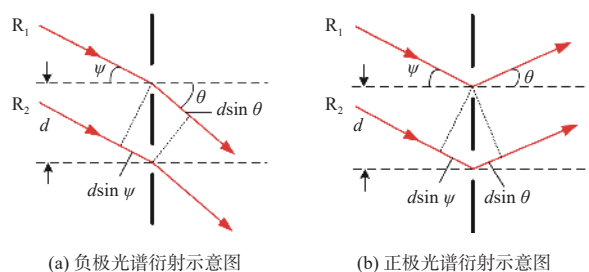


图 1 透射光栅衍射示意图

Fig. 1 Diffraction diagram of transmission grating

同理对于图 1(b),因为光线 R_1 总比 R_2 超前,所以光程差为

$$\Delta = d \sin \psi + d \sin \theta \quad (3)$$

将式(2)和式(3)合并,得到产生极大值的条件为

$$d(\sin \psi \pm \sin \theta) = m \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (4)$$

基于光栅衍射原理, 来袭激光经光栅衍射后由镜头组汇聚并成像于 CMOS 面阵探测器上, 形成的光斑如图 2 所示。图 2 为激光探测几何投影关系, 图 2(a) 为来袭激光波长和方向测量示意图; 图 2(b) 为在 x 方向方位角探测示意图; 图 2(c) 为在 y 方向俯仰角探测示意图。

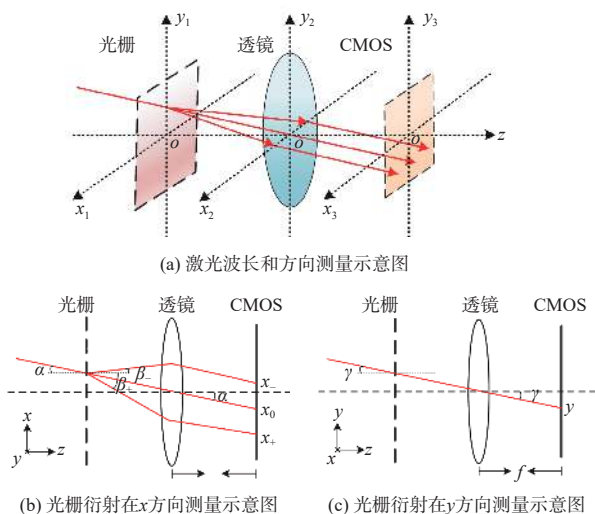


图 2 激光探测几何投影关系图

Fig. 2 Geometric projection diagram of laser detection

在 x 方向, 如图 2(b) 所示, 零级衍射光谱位置为 x_0 , 正一级衍射光谱位置为 x_+ , 负一级衍射光谱位置为 x_- , 零级衍射角为 α , 正一级衍射角为 β_+ , 负一级衍射角为 β_- , 由光栅衍射方程^[15-16]可知:

$$\begin{cases} \sin\beta_+ = \sin\alpha + \frac{\lambda}{d} \\ \sin\beta_- = \sin\alpha - \frac{\lambda}{d} \end{cases} \quad (5)$$

CMOS 位于透镜组焦平面处, 焦距为 f , 将衍射后的来袭激光信号转化为电信号, 经过光斑中心提取计算得出零级、正一级以及负一级的位置如下:

$$\begin{cases} x_0 = f \tan\alpha \\ x_+ = f \tan\beta_+ \\ x_- = f \tan\beta_- \end{cases} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可以推出入射波长 λ , 如式(7)所示:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{x_0}{f} \\ \lambda = d \left[\sin \left(\arctan \frac{x_0}{f} \right) + \sin \left(\arctan \frac{x_+}{f} \right) \right] \end{cases} \quad (7)$$

式中: d 为光栅常数; f 为透镜组焦距。

在 y 方向, 如图 2(c) 所示, 同理可得出俯仰角为

$$\gamma = \arctan \frac{y}{f} \quad (8)$$

2 系统设计与改进

本文采用 AR0135 光电探测器采集来袭激光光斑图像, 所采集到的图像分辨率为 1280×720 , 选用 600 线的光栅、标准镜头以及水平视场为 100° 的广角镜头。使用 Matlab 软件进行参数仿真, 通过设置焦距、光栅常数、像元尺寸等参数, 得到波长和角度的分辨率仿真图如图 3 所示。

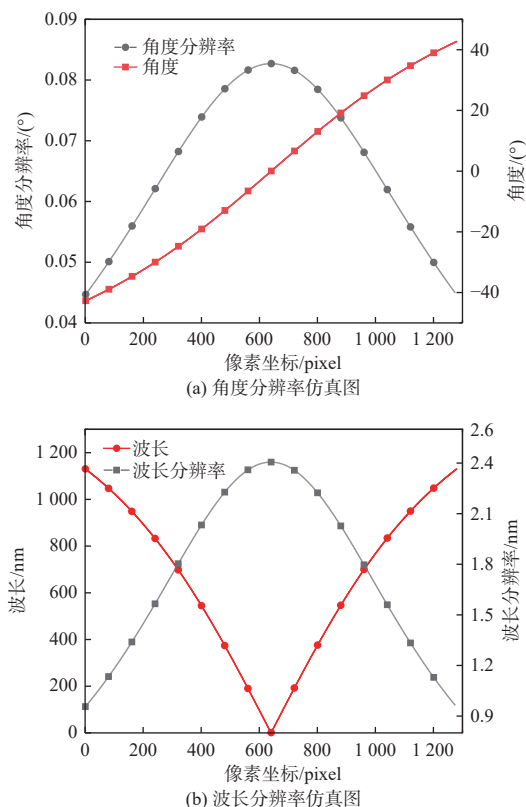


图 3 波长和角度分辨率的仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of wavelength and angle resolution

通过仿真分析可知, 0 级光斑中心坐标与入射角度的线性度比较好, 角度分辨率优于 0.09° , 波长分辨率优于 2.5 nm 。采用的 CMOS 探测器分辨率为 $1280 \times 720 = 921600$, 因此如果光斑位置可精确获得, 结合 100° 视场, 角度分辨率约为 $100^\circ / 1280 \approx 0.08^\circ$, 考虑到光斑有一定大小, 结合图像处理的误差, 角度分辨率可达到 0.1° 。

本文通过实测采集了不同角度下的激光衍射光斑图像, 并经过二值化处理后如图 4 所示。提取光斑中心坐标^[17-18]并计算在不同入射角度下, 0 级与 1 级的光斑位置关系, 如图 5 所示。

本文通过改变水平入射方向来分析入射角度与光斑中心坐标的关系, 图 5 为入射角度分别与

0 级、 ± 1 级的坐标位置关系, 当 0 级光斑中心坐标为在水平方向第 640 个像素时, 入射角为 0° 。由图 5 可知, 改变入射角, 0 级和 1 级的光斑中心也随入射角度而变化, 且变化趋势近似为线性关系。因此, 根据 0 级光斑中心的位置可以计算出入射角度, 根据 0 级与 1 级之间的中心坐标像素差可计算出波长。采用同一波长的激光器在不同角度入射, 0 级与 1 级的间距变化趋势如图 6 所示, 随着入射角度的增加, 衍射光斑的 -1 级与 0 级以及 0 级与 +1 级之间像素差值的个数逐渐增多。

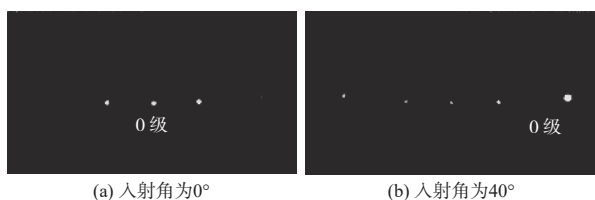


图 4 不同入射角度下光栅衍射图像

Fig. 4 Grating diffraction images under different incident angles

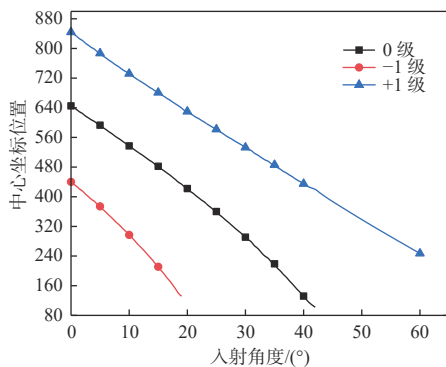


图 5 不同入射角度下 0 级与 1 级的光斑中心位置关系

Fig. 5 Relationship between spot center positions of level 0 and level 1 at different incident angles

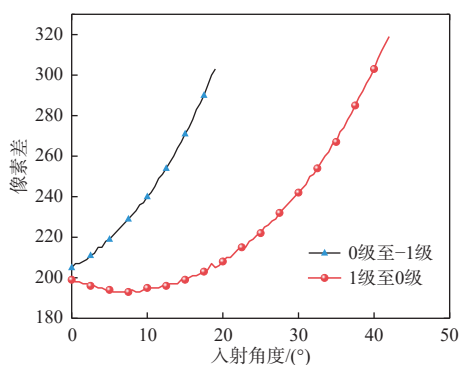


图 6 0 级与 ± 1 级中心坐标差

Fig. 6 Center coordinate differences between level 0 and ± 1

根据图 7 的趋势分析可知, 采用 0 级与 ± 1 级

之间的最小间隔来计算波长, 像素之差的最大值为 240, 最小值为 193。系统中广角镜头存在畸变。由于畸变现象, 随着入射角度增加, 0 级与 1 级之间的像素点个数也增加。因此, 通过 0 级与 1 级的像素间距以及 0 级光斑中心来判断来袭激光的波长、方位角和俯仰角, 会使系统分辨率降低。如果采用相邻两级之间像素差值最小的一个值 Δ 来计算波长, Δ 的最大值为 202, 最小值为 192, 明显优于用 0 级与 ± 1 级之间的最小间隔来计算波长的方法。因此, 通过该方法可以提高波长分辨率。

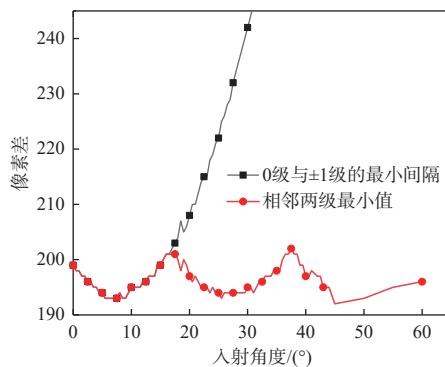


图 7 相邻两级之间的坐标差

Fig. 7 Coordinate differences between two adjacent levels

采用相邻两级衍射光斑的水平之间像素差值来判断波长, 相比采用 0 级和 1 级之间像素差值的方法, 提高了波长分辨率。由于最小和最大像素差值之间相差 10 个像素, 每个像素的波长分辨率为 2.5 nm, 因此最小波长分辨率为 25 nm。然而, 这种方法无法通过光斑的大小来判断 0 级光斑的位置, 进而无法以最大光斑中心位置来确定角度。虽然提高了波长分辨率, 但无法精确计算激光的方向角。为了解决这个问题, 本文在原有激光告警技术的基础上进行了改进, 采用广角镜头结合 CMOS_1 探测器探测来袭激光的方位角, 并调节二维转台使来袭激光的入射角在 $\pm 5^\circ$ 范围内, CMOS_2 则通过利用光栅衍射的原理, 在该角度范围内识别激光的波长以提高测量精度。这样, 我们既能探测到来袭激光的方向角, 也能显著提高激光波长的测量精度。

双目 CMOS 图像传感器激光告警系统的示意图如图 8 所示。平行光 A 是三维空间中的目标光源, 它在双目 CMOS 图像传感器中分别成像。CMOS_2 基于光栅衍射原理测量激光波长, 由光栅、光学透镜以及 CMOS_2 探测器组成。当激光

入射经过光栅衍射后, 透镜将衍射光汇聚并形成干涉条纹, 最后在 CMOS_2 探测器上成像。在 x 方向, 零级光谱位置为 x_0 , 正一级光谱位置为 x_{+1} , 负一级光谱位置为 x_{-1} , n 级光谱位置为 x_n 。按照改进方案, 计算出在图像像素中间位置相邻的两级衍射光斑的最小间距, 通过相邻两级光斑的位置与波长的关系, 计算出来袭激光的波长。CMOS_1 系统用来测量激光入射角, 主要由透镜和 CMOS_1 图像传感器组成。激光入射经透镜汇聚后形成光斑, 并成像于 CMOS_1 面阵探测器上, 对成像的光斑中心进行坐标提取, 并根据相应的公式进行计算即可得出入射激光的方位角。

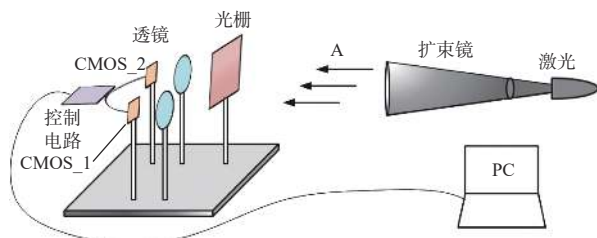


图 8 双目 CMOS 图像传感器激光告警示意图

Fig. 8 Laser alarm schematic diagram of binocular CMOS image sensor

3 实验及分析

为了验证改进后的激光告警系统的性能优势, 搭建了光学系统来采集并分析激光光斑图像, 实验装置如图 9 所示。改进后的系统采用双目 CMOS 传感器来采集来袭激光的光斑, 并将其成像于面阵探测器。设计中采用 AR0135 探测器并用广角镜头结合 CMOS_1 探测器测量来袭激光的方位角和俯仰角, 采用视场角度较小的标准镜头结合光栅和 CMOS_2 探测器来测量激光的波长, 光栅的尺寸为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$, 光栅常数 $d = (1/600)\text{ mm}$ 。



图 9 双目 CMOS 图像传感器激光告警实物图

Fig. 9 Laser alarm physical drawing of binocular CMOS image sensor

2 个探测器探测到的激光光斑图像如图 10 所示, 图 10(a)、(b) 和 (c) 分别为 CMOS_1 探测器在 0° 、 25° 、 50° 下的探测到的来袭激光光斑; 图 10(d)、(e) 和 (f) 分别为 CMOS_2 探测器在波长分别为 400 nm 、 650 nm 和 850 nm 的衍射光斑。

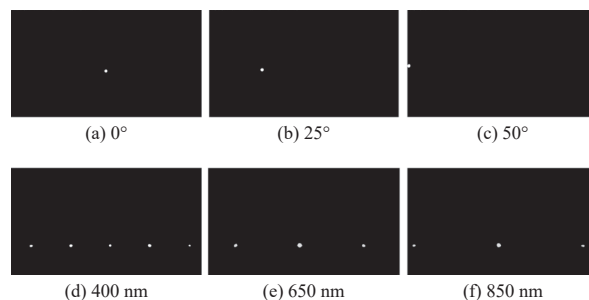
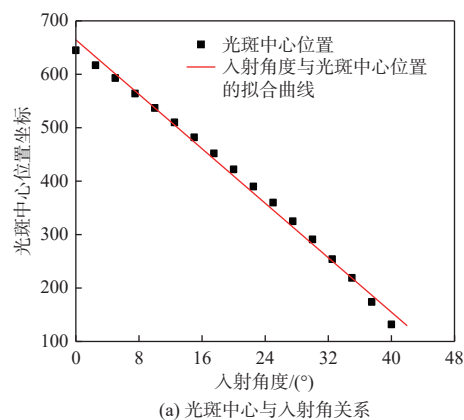


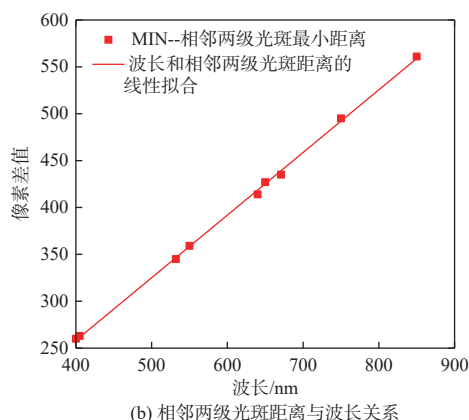
图 10 两个探测器探测到的激光光斑图像

Fig. 10 Laser spot images detected by two detectors

通过光斑中心提取, 图 11(a) 展示了光斑中心与入射角度的关系。随着入射角度的增加, 光斑中心坐标近似线性变化。该水平半视场达 50° , 由于镜头的对称性, 竖直方向也近似为线性关系。图 11(b) 所示为相邻两级光斑最小距离与波长的关系, 随着激光波长增加, 相邻两级光斑最小距离近似线性变化。选用波长为 650 nm 的激光器进行



(a) 光斑中心与入射角关系



(b) 相邻两级光斑距离与波长关系

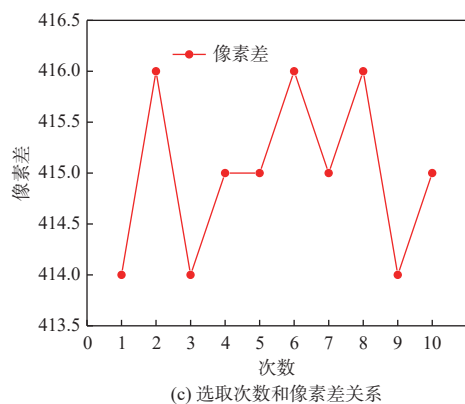


图 11 测试结果

Fig. 11 Test results

测试,在视场范围内,随机选取不同的入射角度,提取光斑中心,计算相邻两级光斑的间距,并选出最小间距,如图 11(c)所示。经过分析计算,在不同角度下最小间距相差 2 个像素点。这意味着,对于同一波长,在不同角度下,相邻两级的最小像素差为 2 个像素点。因此,可以得出本系统的波长分辨率优于 6 nm。

通过转动二维转台改变入射角度,从而改变了方位角和俯仰角。换用波段分别为 400 nm、650 nm、800 nm 的激光器进行多次测试,实验结果如表 1 所示。转台每转动 0.1°,激光告警系统也变化 0.1°,可以得出系统的角度测量精度为 0.1°。

表 1 角度测量精度结果

Table 1 Angle measurement accuracy results

激光器 中心波长 λ/nm	方位角/(°)			俯仰角/(°)		
	转台值	测量值	角度测量精度	转台值	测量值	角度测量精度
400	10.0	10.3	0.1	25.0	25.4	0.1
	10.1	10.4	0.1	25.1	25.5	0.1
	10.2	10.5	0.1	25.2	25.6	0.1
650	35.0	35.2	0.1	40.0	40.4	0.1
	35.1	35.3	0.1	40.1	40.5	0.1
	35.2	35.4	0.1	40.2	40.6	0.1
800	-20.0	-19.4	0.1	-30.0	-29.7	0.1
	-19.9	-19.3	0.1	-29.9	-29.6	0.1
	-19.8	-19.2	0.1	-29.8	-29.5	0.1

实验结果表明,采用双目 CMOS 图像传感器测量来袭激光并实现激光告警,可以提高系统分辨率。

4 结论

本文介绍了双目 CMOS 图像传感器激光告警

技术,用于识别激光方向角和波长。并对该系统的成像性能进行测试及分析。结果表明:使用广角镜头来测量来袭激光的方向角,在水平方向半视场角达 50°;使用标准普通镜头通过光栅衍射成像于面阵探测器上,形成多个等距光斑,通过计算这些光斑之间的距离,可以有效测量来袭激光的波长。该系统角度分辨率为 0.1°,角度测量精度为 0.1°,波长分辨率优于 6 nm。理论分析和实验结果表明,该激光测试方法可以提高测量精度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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. High precision two-dimensional broadband laser warning parameter calculation algorithm[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(1): 111-118.
- [3] 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]. Laser Journal, 2022, 43(10): 51-55.
- [4] 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.
- [5] 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 broadband spectrum multi-parameter laser warning detection technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(8): 2581-2587.
- [6] 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): 1020004.
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): 1020004.
- [7] 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.
- [8] SHI J, ZHANG R, NIU J Q, et al. Research on two-dimensional laser warning integrated detection technology[J]. *Optik*, 2022, 270: 170034.
- [9] WANG L, DONG H J, ZHANG W A, et al. Optimum design of wide angle laser detecting system based on fish eye lens and sinusoidal amplitude grating[J]. *Optics Communications*, 2014, 310: 173-178.
- [10] 杨雪梅. 大视场宽波段激光告警光学系统集成设计[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- YANG Xuemei. Integrated design of large field and wide band laser warning optical system [D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [11] EL-SHERIF A F, AYOUB H S, EL-SHARKAWY Y H, et al. The design and implementation of photoacoustic based laser warning receiver for harsh environments[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 98: 385-396.
- [12] 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. Wide-band dual-detector high-precision laser alarm acquisition control system[J]. *Laser Journal*, 2023, 44(9): 37-42.
- [13] 赵建君, 宋春荣, 陈红叶. 利用正弦光栅探测激光信息的理论研究[J]. *激光与红外*, 2010, 40(9): 989-992.
- ZHAO Jianjun, SONG Chunrong, CHEN Hongye. Theoretical study of detect laser information by sinusoidal grating[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(9): 989-992.
- [14] 廖延彪. 光学原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 151-152.
- LIAO Yanbiao. Optics: principles and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 151-152.
- [15] 石顺祥, 张海兴, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000: 155-156.
- SHI Shunxiang, ZHANG Haixing, LIU Jinsong. Physical optics and applied optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000: 155-152.
- [16] 李晓, 张瑞, 王志斌, 等. 二维激光告警光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6): 1806-1810.
- LI Xiao, ZHANG Rui, WANG Zhibin, et al. Design of two-dimensional laser warning optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1806-1810.
- [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. Image processing of grating diffraction wide-band and large-field laser warning[J]. *Laser Journal*, 2021, 42(11): 92-96.
- [18] 蒋佳雯, 康杰虎, 吴斌. 激光光斑中心高精度定位补偿算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(14): 362-367.
- JIANG Jiawen, KANG Jiehu, WU Bin. High precision positioning and compensation algorithm for laser spot center[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(14): 362-367.