

双目高精度微型激光告警技术研究

张瑞^{1,2}, 杨帅^{1,3}, 吉文翔^{1,2}, 刘昊^{1,2}, 薛鹏^{1,3}, 王耀利^{1,3},
李晓^{1,3}, 王志斌^{1,4}, 梁鹤⁵

- 中北大学 山西省智能微波光电技术创新中心, 山西 太原 030051;
- 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;
- 中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051;
- 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051;
- 北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘要: 针对现有来袭激光告警系统体积大、精度低, 无法满足单兵及小型装备便携安装需求, 提出一种大视场角度粗测与二维光栅衍射角度精测的双目告警方法, 结合光栅和光学系统的微型化设计及集成, 实现了大视场下来袭激光方位角、俯仰角和波长的高精度探测。并对双目来袭激光角度、波长探测及光学系统参数进行理论分析和仿真, 设计控制电路, 研制双目高精度微型激光告警样机, 进行实验可行性验证。实验结果表明, 该系统的方位角视场为 120° , 俯仰角视场为 77° , 角度定位精度优于 0.05° , 中心波长探测精度优于 10 nm 。该方法将对来袭激光的大视场、高精度、微型化告警技术奠定基础。

关键词: 微型激光告警; 双目探测; 二维光栅; 角度定位精度

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025031

引用格式: 张瑞, 杨帅, 吉文翔, 等. 双目高精度微型激光告警技术研究[J]. 测试技术学报, 2025, 39(3): 255-260.

ZHANG Rui, YANG Shuai, JI Wenxiang, et al. Research on high-accuracy micro laser warning technology based on binocular vision[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(3): 255-260.

Research on High-Accuracy Micro Laser Warning Technology Based on Binocular Vision

ZHANG Rui^{1,2}, YANG Shuai^{1,3}, JI Wenxiang^{1,2}, LIU Hao^{1,2}, XUE Peng^{1,3},
WANG Yaoli^{1,3}, LI Xiao^{1,3}, WANG Zhibin^{1,4}, LIANG He⁵

- Technology Innovation Center of Shanxi Provincial for Intelligent Microwave Photoelectric, North University of China, Taiyuan 030051, China;
- School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
- School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
- School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;
- Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: In response to the large size and poor accuracy of the existing laser warning systems, which fail

收稿日期: 2024-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62105302); 航空科学基金资助项目(2023Z019U0001); 实验室开放基金项目(LabSOMP-2023-02)

作者简介: 张瑞(1987-), 男, 教授, 博士, 主要从事光电探测研究。E-mail: zhangrui@nuc.edu.cn.

to meet the portability requirements for individual soldiers and small equipment installations, this paper proposes a binocular vision warning method that combines large-field-of-view approximate measurement with two-dimensional grating diffraction for accurate measurement by integrating the miniaturization design of the grating and optical system. This approach enables high-accuracy detection of the azimuth angle, pitch angle, and wavelength of incoming lasers over a large field of view. Theoretical analysis and simulation were conducted of binocular incoming laser angles and wavelengths, as well as the parameters of the optical system. The control circuits were designed. A high-accuracy micro binocular laser warning prototype was developed. And experimental feasibility was verified. Experimental results show that the system has an azimuth angle field of view of 120° , a pitch angle field of view of 77° , an angle positioning accuracy better than 0.05° , and a center wavelength detection accuracy better than 10 nm. This method lays the foundation for wide-field, high-accuracy, and micro warning technologies for incoming lasers.

Key words: micro laser warning; binocular vision; two-dimensional grating; angle positioning accuracy

0 引言

随着激光技术在陆、海、空、天等领域的发展,激光制导、激光侦查、激光测距、激光干扰、激光窃听、高功率激光武器等激光装备已应用在战争中^[1-3]。由于激光告警设备可监测激光威胁,进而可采取相应的防护、对抗等措施提高平台战场生存能力,因此受到各国的高度关注,高性能激光告警技术成为主要研究方向^[4-7]。但现有激光告警体积较大、角度定位精度低,无法满足单兵、无人机等小型装备便携安装要求。

目前的激光告警技术主要有单一方向告警和方向波长同时告警两大类^[8-13],其中方向波长同时告警类型主要有法布里-珀罗(F-P)型、迈克尔逊型和光栅衍射型。F-P相干型具有较高的角度分辨率,可测得波长,但需要机械扫描,工艺复杂,稳定性较差,且无法同时实现大视场下高的角度定位精度;迈克尔逊相干型激光告警可获取激光方位与波长信息,但结构复杂,对工艺和数据处理要求高,同样无法实现大视场下高的角度定位精度;光栅衍射型激光告警利用零级位置实现激光方向测量,通过零级和一级的间距获得激光波长信息,无需机械扫描,对光学器件的工艺要求和数据处理比迈克尔逊型的简单,同时兼顾激光角度和波长测量精度,但体积大且无法实现大视场下高的角度定位精度。目前已有的大视场激光告警系统角度定位精度都在 1° 左右。

针对现有小型装备对微型激光告警的需求,以及现有激光告警存在体积大、无法同时实现大视场高角度定位精度等问题,提出一种双目高精

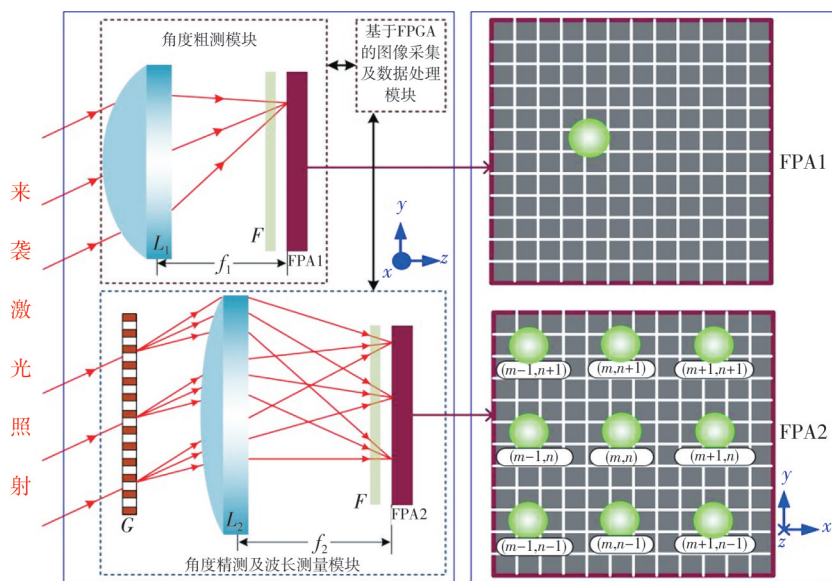
度微型激光告警技术,通过大视场角度粗测与二维光栅衍射角度精测,实现凝视型大视场高精度微型激光告警感知。

1 双目高精度微型激光告警原理

1.1 基本原理

基于二维光栅的双目高精度微型激光告警探测原理如图1所示,主要由来袭激光角度粗测模块、角度精测及波长测量模块和FPGA图像采集数据处理模块三大单元组成。

其中,来袭激光角度粗测模块包含大视场微型镜头、多带通窄带滤光片和焦平面探测器FPA1,通过来袭激光聚焦光斑在FPA1的位置粗测获得来袭激光方位角和俯仰角;角度精测及波长测量模块包含二维光栅、小视场微型镜头、多带通窄带滤光片和焦平面探测器FPA2,通过FPA2获得的来袭激光衍射级次 (m, n) 、 $(m+1, n)$ 和 $(m, n+1)$ 的光斑及其横纵坐标位置,结合角度粗测的方位角和俯仰角获得来袭激光波长、精确方位角和精确俯仰角信息,详细推导见1.2节;FPGA图像采集数据处理模块主要通过FPGA控制图像采集的帧频、积分时间,并通过FPGA实行图像数据的处理。多带通窄带滤光片主要根据实际探测波段需要选通滤光,减小太阳光、闪电、曳光弹及各种弹药爆炸等产生强背景光的影响,避免由于该干扰光导致系统光斑提取精度下降、被测光斑被背景覆盖等问题,进而降低漏警率和虚警率。具体推导如图1所示。



L_1 : 大视场角度粗测镜头; L_2 : 小视场角度精测镜头; G : 二维光栅; F : 多带通窄带滤光片; FPA1和FPA2: 焦平面探测

图 1 双目高精度激光告警光路图

Fig. 1 Schematic diagram of high-accuracy micro laser warning technology based on binocular vision

1.2 理论推导

被测来袭激光照射方向如图 2 所示, 来袭激光方向为 AO 方向, AO 在 xOz 平面和 yOz 平面投影分别为 BO 和 CO , 方位角和俯仰角分别为 $\alpha = \angle BOz$ 和 $\beta = \angle COz$ 。

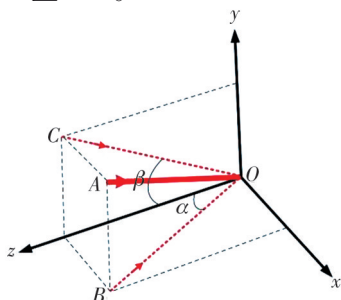


图 2 来袭激光方向示意图

Fig. 2 Incoming laser direction

来袭激光角度粗测原理如图 1 上半图所示, 其中 f_1 为大视场角度粗测镜头等效焦距, 来袭激光在 FPA1 的光斑坐标为 (x_0, y_0) , 根据光学理论可得粗测来袭激光方位角 α_0 和俯仰角 β_0 为

$$\begin{cases} \alpha_0 = \arctan\left(\frac{x_0}{f_1}\right), \\ \beta_0 = \arctan\left(\frac{y_0}{f_1}\right). \end{cases} \quad (1)$$

角度精测原理如图 1 下半图所示, 其中 d 为二维光栅常数, f_2 为小视场角度精测镜头焦距, λ 为来袭激光波长, m 为激光经二维光栅和镜头在面阵探测器上 x 方向衍射级次 ($m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$), n 为激光经二维光栅和镜头在面阵探测

器上 y 方向衍射级次 ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$), θ_{xm} 为在 FPA2 的 x 方向第 m 级衍射角, θ_{yn} 为在 FPA2 的 y 方向第 n 级衍射角, $x_{(m,n)}$ 和 $y_{(m,n)}$ 分别为 FPA2 上激光第 (m, n) 级衍射光斑的 x 坐标值和 y 坐标值。根据光栅衍射理论及光学成像理论可获得被测激光方位角 α 、俯仰角 β 、波长 λ 满足

$$\begin{cases} \tan \theta_{xm} = \frac{x_{(m,*)}}{f_2}, \\ \tan \theta_{yn} = \frac{y_{(*,n)}}{f_2}, \\ d(\sin \theta_{xm} + \sin \alpha) = m\lambda, \\ d(\sin \theta_{yn} + \sin \beta) = n\lambda. \end{cases} \quad (2)$$

根据式 (2), 结合 f_2 、 $x_{(m,n)}$ 和 $y_{(m,n)}$ 可得 θ_{xm} 、 θ_{yn} 、 λ 为

$$\begin{cases} \theta_{xm} = \arctan\left(\frac{x_{(m,*)}}{f_2}\right), \\ \theta_{yn} = \arctan\left(\frac{y_{(*,n)}}{f_2}\right), \\ \lambda = \pm d(\sin \theta_{x(m\pm 1)} + \sin \theta_{xm}) \text{ 或} \\ \lambda = \pm d(\sin \theta_{y(n\pm 1)} + \sin \theta_{yn}). \end{cases} \quad (3)$$

角度粗测获得的来袭激光方位角 α_0 、俯仰角 β_0 为精测提供方位角 α 、俯仰角 β 的大体方向, 因此, 将式 (3) 中 θ_{xm} 、 θ_{yn} 、 λ 和粗测方位角 α_0 、俯仰角 β_0 代入光栅方程获得精测衍射级次 m 和 n 为

$$\begin{cases} m = \text{round}\left[\frac{d}{\lambda}(\sin \theta_{xm} + \sin \alpha_0)\right], \\ n = \text{round}\left[\frac{d}{\lambda}(\sin \theta_{yn} + \sin \beta_0)\right], \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\text{round}(x)$ 为 x 四舍五入取整函数。将式(4)、 θ_{xm} 、 θ_{ym} 、 λ 、 d 代入式(2), 最终获得来袭激光的精确方向(方位角 α 、俯仰角 β)和波长 λ 分别为

$$\begin{cases} \alpha = \arcsin\left(\frac{m\lambda}{d} - \sin\theta_{xm}\right), \\ \beta = \arcsin\left(\frac{n\lambda}{d} - \sin\theta_{ym}\right), \\ \lambda = \pm d(\sin\theta_{x(m\pm 1)} + \sin\theta_{xm}) \text{ 或} \\ \lambda = \pm d(\sin\theta_{y(n\pm 1)} + \sin\theta_{ym}). \end{cases} \quad (5)$$

2 微型激光告警系统集成及实验分析

2.1 微型激光告警系统参数设计及分析

焦平面探测器FPA1和FPA2采用面阵互补金属氧化物半导体(CMOS), 光谱响应范围为450~11 00 nm, 像元尺寸 $\Delta x = \Delta y = 6 \mu\text{m}$, 分辨率为 752×480 。设计微型激光告警视场角: 俯仰视场 120° 、方位视场 77° 。因此, 角度粗测中大视场镜头的视场设计为方位视场 120° , 俯仰视场 77° , 等效焦距 $f_1 = 1.30 \text{ mm}$, 角度精测中二维光栅的光栅常数 $d = 8 \mu\text{m}$ 。要实现来袭激光波长的测量, 需要在光谱范围内每个波长下激光角度精测模块在 x 方向(或 y 方向)至少有2个级的衍射光斑。结合现有市场已有镜头视场, 最终确定角度精测小视场微型镜头的方位视场为 26° , 俯仰视场为 17° , 等效焦距 $f_2 = 9.77 \text{ mm}$ 。根式(1)和式(3)可得角度粗测模块分辨率 $\Delta\alpha_0$ (或 $\Delta\beta_0$), 角度精测衍射角分辨率 $\Delta\theta_{xm}$ (或 $\Delta\theta_{yn}$)分别为

$$\begin{cases} \Delta\alpha_0 = \frac{f_1}{x_0^2 + f_1^2} \Delta x, & \Delta\beta_0 = \frac{f_1}{y_0^2 + f_1^2} \Delta y, \\ \Delta\theta_{xm} = \frac{f_2}{x_{(m,*)}^2 + f_2^2} \Delta x, & \Delta\theta_{yn} = \frac{f_2}{y_{(*,n)}^2 + f_2^2} \Delta y. \end{cases} \quad (6)$$

将详细参数代入式(6)可获得角度粗测中激光角分辨率 $\Delta\alpha_0$ (或 $\Delta\beta_0$)与光斑在FPA1不同像素对应关系如图3黑色曲线所示(以FPA1和FPA2中心为像素0点位置), 角度精测衍射角分辨率 $\Delta\theta_{xm}$ (或 $\Delta\theta_{yn}$)与衍射光斑(m, n)级光斑在FPA2不同像素对应关系如图3红色曲线所示。由图3可得该系统理论上来袭激光角度粗测角分辨率 $\Delta\alpha_0$ (或 $\Delta\beta_0$) $< 0.30^\circ$, 角度精测理论上衍射角分辨率 $\Delta\theta_{xm}$ (或 $\Delta\theta_{yn}$) $< 0.0355^\circ$, 因此, 该方法理论上角度精测角分辨率较粗测角分辨率提高近一个数量级。

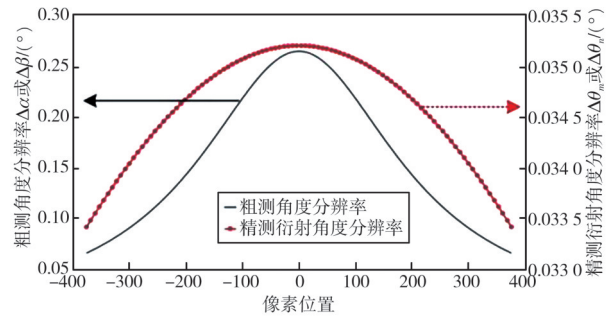


图3 角度粗测和精测角分辨率曲线

Fig. 3 Angular resolution curves of approximate measurement and accurate measurement

为降低成本, 二维光栅采用商业成熟的两块一维线性光栅正交放置来实现, 如图4(a)和图4(b)所示; 并针对焦平面探测器响应波段的2个常用军用波长(532 nm和1 064 nm)激光设计双带通窄带滤光片, 如图4(c)和图4(d)所示。将光学镜头、探测器、控制及数据处理电路集成后的实物如图5所示。

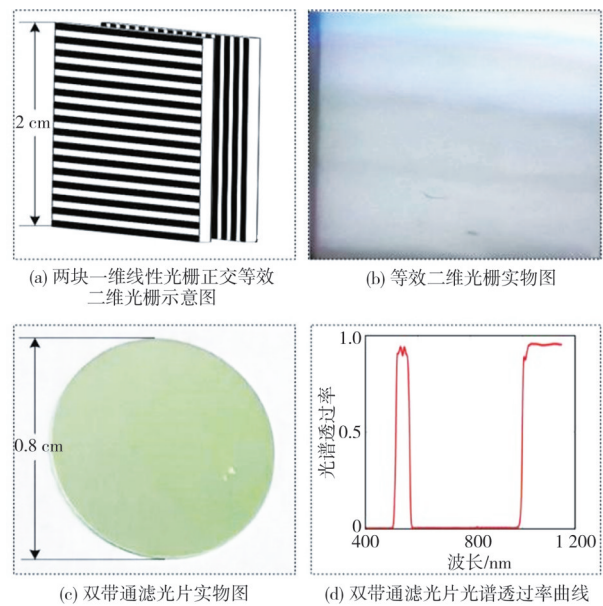


图4 等效二维光栅及双带通窄带滤光片

Fig. 4 Equivalent two-dimensional grating and dual-band-pass narrow-band filter

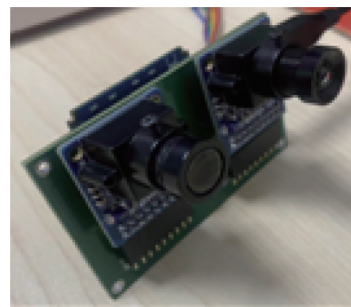


图5 基于FPGA的双目微型激光告警硬件电路实物

Fig. 5 Micro laser warning hardware circuit based on FPGA

2.2 实验及分析

将上述器件集成微型激光告警样机,并搭建实验进行验证,如图 6 所示。采用军用常用的 2 个波长(532 nm 和 1 064 nm)激光进行模拟测试实验,将微型激光告警样机模块放置在高精度二维旋转台(转台角度定位精度为 0.005°)模拟不同角度入射,扩束激光与二维旋转台的距离为 125 cm,扩束光斑直径

为 8 cm,2 个波长激光实验获得的粗测和精测光斑部分图像如图 7 所示。由于大视场下镜头存在严重畸变,及高精度的角度分辨率要求,因此,采用大量实验数据结合多次拟合的方式进行系统标定。最终样机测得的部分实验结果如表 1 所示,该系统对角线视场为 180°,方位角视场为 120°,俯仰角视场为 77°,角度测量精度优于 0.05°,中心波长测量精度优于 10 nm,模块体积为 8 cm×3 cm×6 cm。

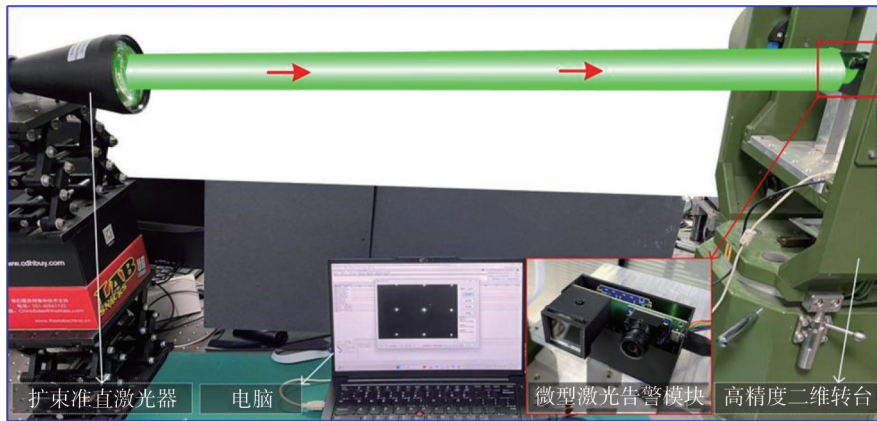


图 6 实验装置图

Fig. 6 Experimental device diagram

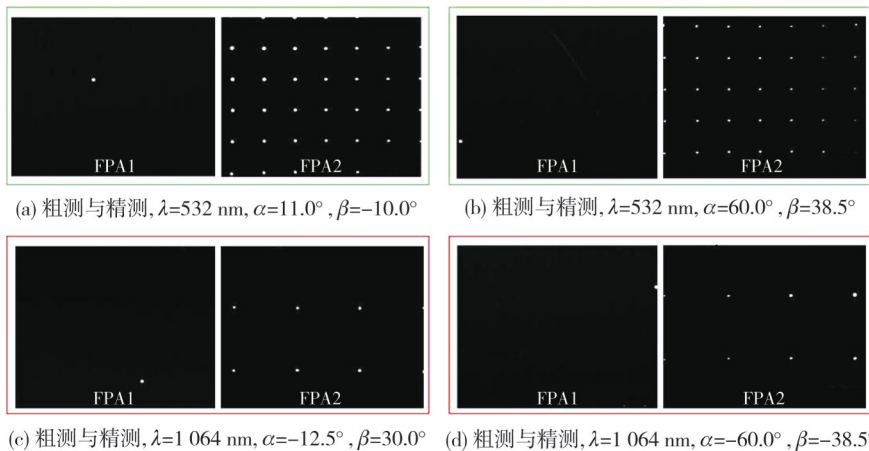


图 7 不同波长、不同角度粗测和精测焦平面探测器获得的激光光斑图

Fig. 7 The distribution of laser spot under different wavelengths and different angles

表 1 双目高精度微型激光告警样机测试结果及误差

Tab. 1 Experimental results and errors

激光器 中心波长 λ/nm	二维旋转台角度/(°)		双目高精度微型激光告警样机测试结果					
			测得中心波长/nm		测得角度/(°)			
	方位角 α	俯仰角 β	中心波长 λ'	误差 $ \delta(\lambda) $	方位角 α'	俯仰角 β'	误差 $ \delta(\alpha) $	误差 $ \delta(\beta) $
532	0.00	0.10	530	2	0.03	0.08	0.03	0.02
	-20.00	10.60	528	4	-20.01	10.58	0.01	0.02
	45.07	-20.05	535	3	45.05	-20.04	0.02	0.01
	-60.00	38.50	523	9	-59.98	38.46	0.02	0.04
1 064	-15.00	-5.05	1 068	4	-15.03	-5.02	0.03	0.03
	-15.00	-5.00	1 063	1	-14.99	-5.02	0.01	0.02
	33.22	30.05	1 070	6	33.21	30.09	0.01	0.04
	60.00	-38.50	1 072	8	59.98	-38.48	0.02	0.02

3 结 论

针对目前小型装备对高精度微型激光告警的需要,以及现有激光告警无法同时实现大视场宽波段下的多参数高精度感知,提出基于二维光栅的双目大视场高精度微型激光告警技术,对各参数测量进行理论推导和系统仿真,搭建测试系统验证其可行性。实验结果表明,该系统方位角视场为 120° ,俯仰角视场为 77° ,角度测量精度优于 0.05° ,中心波长测量精度优于 10 nm ,该技术将为微型高精度大视场激光奠定基础。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王飞, 周爱美, 王宇霄. 俄罗斯激光武器发展现状与发展战略探析[J]. 舰船电子对抗, 2023, 46(1): 47-50.
WANG Fei, ZHOU Aimei, WANG Yuxiao. Analysis of the current situation and development strategy of Russian laser weapons[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2023, 46(1): 47-50. (in Chinese)
- [3] 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. (in Chinese)
- [4] ZANDI M, SUGDEN K, BENTON D M. Low-cost laser detection system with a 360-deg horizontal field of view[J]. Optical Engineering, 2021, 60(2): 027106.
- [5] FIORANI L, LAI A, PUIU A, et al. Laser sensing and chemometric analysis for rapid detection of oregano fraud[J]. Sensors, 2023, 23(15): 6800.
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] YANG W, ZHANG X, MA H, et al. Laser beams-based localization methods for boom-type roadheader using underground camera non-uniform blur model[J]. IEEE Access, 2020, 8: 190327-190341.
- [8] EL-SHERIF A F, AYOUB H S, EL-SHARKAWY Y H, et al. The design and implementation of photo-acoustic based laser warning receiver for harsh environments[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 98: 385-396.
- [9] ZHANG R, YANG X, SHI J, et al. Integrated optical system design for large-field-of-view and broad-spectrum laser warning[J]. Applied Optics, 2022, 61(14): 4187-4194.
- [10] SHI J, ZHANG R, NIU J, et al. Research on two-dimensional laser warning integrated detection technology[J]. Optik, 2022, 270: 170034.
- [11] LEI Y, ZHANG L, XUE Y, et al. Suppressing grating lobes of large-aperture optical phased array with circular array design[J]. Applied Optics, 2023, 62(15): 4110-4114.
- [12] 郭玉静, 魏丽. 一种基于亮度阈值的激光光斑中心定位算法[J]. 测试技术学报, 2017, 31(3): 223-226.
GUO Yujing, WEI Li. An algorithm of center locating of laser spot based on intensity threshold[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2017, 31(3): 223-226. (in Chinese)
- [13] 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. (in Chinese)