

激光与光电子学进展

激光告警技术研究进展

杨少华¹, 侯霞^{1,2*}¹中国科学技术大学光学与光学工程系, 安徽 合肥 230026;²中国科学院上海光学精密机械研究所航天激光工程部, 上海 201800

摘要 激光告警技术是光电对抗的重要组成部分,能够识别具有威胁性的激光信号并发出告警,有效提高了飞行器、舰船、卫星等重要平台的生存能力,在相关领域发挥着重要作用。按探测原理的不同,激光告警技术可以分为相干识别型、光谱识别型、光栅衍射型和成像型4类。梳理了国内外激光告警技术及装备的研究进展,对不同激光告警技术性能进行对比,并对激光告警技术的发展趋势进行总结。

关键词 激光告警; 相干识别型告警; 光谱识别型告警; 光栅衍射型告警; 成像型告警

中图分类号 TN977

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230591

Research Progress in Laser Warning Technologies

Yang Shaohua¹, Hou Xia^{1,2*}¹Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China,
Hefei 230026, Anhui, China;²Aerospace Laser Engineering Department, Shanghai Institute of Optics and
Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Laser warning technologies are important components of optoelectronic countermeasures that detect and warn regarding hazardous laser signals, effectively improving the survival capabilities of crucial platforms such as aircrafts, ships, and satellites. These technologies also hold considerable importance in related fields. Based on their detection principles, these technologies can be categorized into four types: coherent recognition, spectral recognition, grating diffraction, and imaging technologies. This study summarizes the current development status of laser warning technologies and equipment domestically and globally and includes a comparative analysis of the performance and development trends of various laser warning technologies.

Key words laser warning; coherent identification warning; spectral identification warning; grating diffraction warning; imaging warning

1 引言

随着激光探测、激光制导等激光技术的发展以及在相关领域的广泛应用,如何迅速准确地识别敌方探测和攻击的激光信号、获取情报、提高平台生存能力是取得光电对抗优势的关键。激光告警技术作为一种特殊的侦察方法,是光电对抗的重要组成部分,能够识别战场上不同设备(如测距仪、目标指示器、激光束读取系统)发出的激光辐射并且引导防护对抗系统采取有效的应对措施。

美国在20世纪60年代便提出了激光告警技术,并取得了一系列技术突破,在激光告警技术领域一直处

于领先地位。我国也在不断加强重要设施平台的威胁激光感知能力,发展激光告警技术。目前,激光告警技术按探测原理的不同可以分为相干识别型、光谱识别型、光栅衍射型和成像型4类,本文对这4类激光告警技术及设备进行了梳理,对比分析了不同激光告警技术的性能和发展趋势。

2 激光告警技术研究现状

2.1 相干识别型

相干识别型激光告警技术是利用激光高度的时间相干性原理进行探测的,并且便于滤除非激光信号,对背景光的抑制能力强,具有探测视场大、角分辨率高、

收稿日期: 2023-02-06; 修回日期: 2023-04-15; 录用日期: 2023-04-27; 网络首发日期: 2023-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(22X0152601)

通信作者: hou_xia@siom.ac.cn

能够检测激光波长等优点。相干识别型激光告警技术主要分为法布里-珀罗(F-P)型和迈克耳孙型。F-P型激光告警技术采用一个或多个阶式F-P标准具,由步进电机带动,绕平行于其表面的轴转动,通过周期间隔与频率最低点确定激光波长和方位^[1]。迈克耳孙型激光告警技术通过检测干涉条纹确定激光入射方向和波长,无须机械扫描。

基于F-P型的激光告警是早期激光告警的主要技术路线。美国Perkin-Elmer公司于20世纪60年代研制了基于F-P干涉仪的激光告警装置^[2]。在此基础上,Dalmo Victor公司和Perkin-Elmer公司共同研制了多传感告警机(MIWR),其探测光谱范围为0.45~1 μm,之后经过不断改进,研制出了用于直升机防护的AN/AVR-2型激光告警器。AN/AVR-2型激光告警器采用扫描式F-P干涉仪获取来袭激光的波长和方位角信息,已装备于AH-1F武装直升机、AH-64武装直升机、OH-58D武装侦察机、MH/HH-60救援直升机等。

相较于F-P型激光告警技术,迈克耳孙型激光告警技术一般采用凝视型,无须扫描,增强了系统稳定性。美国电子战中心系统研究实验室在1980年研制的LARA激光接收分析仪^[3]采用二维阵列探测器接收激光信号,能够拦截单次激光短脉冲。近年来,基于迈克耳孙干涉仪原理设计了多种新型激光告警系统。2017年Wang等^[4]提出了基于干涉成像的紫外预警光学系统,以应对太阳盲区(250~280 nm)的探测与预警需求。该系统具备双通道结构,通过紫外分束器实现两个光学系统的分离,紫外成像通道视场角为8°,可以同时获得目标的紫外光谱和图像信息,在50 km的探测范围内,空间分辨率达1.56 m。该系统结构复杂,使用了多片非球面反射镜,导致系统加工装调难度大。2021年Zandi等^[5]设计了一种基于相干检测的低成本激光探测系统,该系统能够在明亮背景光下探测微弱、连续的激光信号,如图1所示。该系统由干涉仪、压电反射镜、锥形反射镜和摄像头等部分组成,可以实现

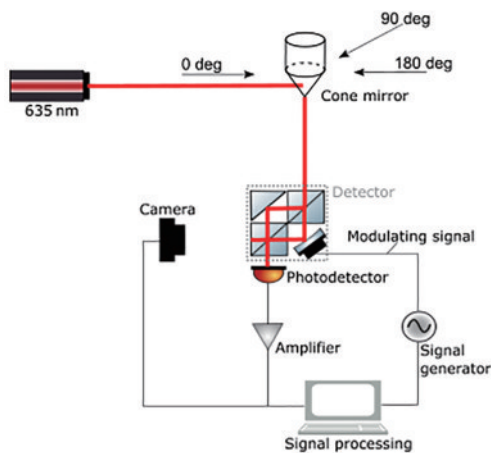


图1 圆锥透镜激光探测结构示意图^[5]

Fig. 1 Schematic of conical lens laser detection structure^[5]

360°水平视野探测,角度精度达到±5°,波长确定精度为±10 nm,在635 nm波长系统灵敏度可达1 μW/cm²,系统结构复杂,只能进行一维探测。

2.2 光谱识别型

光谱识别型激光告警设备主要由信号探测装置和信息处理装置组成,通常采用光电二极管作为探测元件,通过信号接收和信号处理来判断来袭激光的威胁等级。非成像型激光告警器发展迅速,技术较为成熟,已广泛地装备在装甲车、战斗机等重要设施上^[6]。

基于光电二极管的激光告警技术早期发展迅速,利用多通道拼接实现全方位探测,典型设备有2011年美国ATK系统公司与BAE系统公司联合研制的AN/AAR-59导弹告警系统^[7],如图2所示。该系统由5个传感器和1个信号处理器组成,主要为美国海军和海军陆战队提供威胁感知能力,能够提供更快、更远距离的导弹探测。系统工作中红外波段3~5 μm和短波段0.7~1.5 μm,总质量为18.2 kg,前端探测传感器尺寸为Φ127 mm×203.2 mm,系统体积大,不能准确感知方位信息。基于光电二极管的激光告警技术的每个通道负责特定的探测区域,只能感知威胁激光信号的大致方位信息,主要装备于机动性较强的平台上。

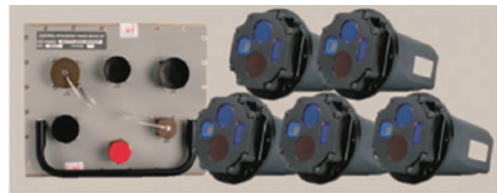


图2 AN/AAR-59导弹告警系统^[7]

Fig. 2 AN/AAR-59 missile warning system^[7]

近年来,光谱识别型激光告警技术为精确地感知激光来袭方向,发展出了基于柱透镜、位置敏感探测器(PSD)、四象限探测器等告警技术,有效地提高了空间角分辨率。2014年李冰等^[8]设计了基于双片硒化锌的柱透镜激光告警系统,该系统的探测视场为10°×10°,工作波长范围为1.0~4.0 μm,角分辨率为0.2°,并且提出了柱透镜的新型像差优化方法。2015年Shemais等^[9]提出一种模糊逻辑数据融合的算法检测入射激光角度,有效地提高了空间角分辨率。2017年北京空间机电研究所郑伟等^[1]提出了一种基于PSD的激光威胁方位探测方法,该方法在±1°范围内对脉冲宽度大于50 ns的激光信号获得了优于1 mrad的方位角分辨率,但是由于光学系统较大的慧差和PSD的非线性误差,视场角受限。2018年王宝玉等^[10]针对高重复频率激光信号,对告警器多个周期激光信号、噪声信号与时间轴所形成面积进行叠加形成信号能量特征,并且进行了自适应阈值处理,利用分类器获取激光来袭方向。2019年南京理工大学蔡贵霞^[11]设计并搭建了一套采用鱼眼透镜的四象限激光定位测量系统,通过硬件设

计、算法修正等方法,系统在 $\pm 6^\circ$ 探测视场角内的最大定位误差由 16% 降低为 4%。2021 年吴春红^[12]以星载激光告警为应用背景,设计了一套四象限激光探测定位系统,该系统视场范围为 $\pm 40^\circ$,测角精度为 1° ,光学系统像差限制了测角精度。

2.3 光栅衍射型

光栅衍射型激光告警技术主要由大视场光学系统、光栅器件及面阵探测器构成,通过衍射光斑位置和间距可以获取来袭激光方位角和波长等信息,探测波段主要在可见光和近红外波段^[13]。

最早将光栅器件应用于激光告警技术中的是 2004 年美国 Optra 公司 Schwarze 等^[14]开发的一种低成本、自供电、紧凑型的激光信号记录报警传感器,该传感器能够测量并记录来袭激光的波长、辐照度、脉冲宽度、脉冲重复频率、持续时间和景物图像信息。该传感器由衍射光栅、透镜、CCD 阵列、光电二极管、集成全球定位传感器和信号处理器组成,探测器波长范围为 $0.4\sim 1.1\ \mu\text{m}$,波长分辨率为 $10\ \text{nm}$,视场角大于 40° ,系统功能多样全面,有助于快速准确地判断来袭激光威胁等级。

之后,通过不断地优化光学系统和光栅器件,有效地提高了系统空间角分辨率和波长分辨率,扩大了探测视场。2022 年 Zhang 等^[15]介绍了一种大视场激光告警系统,设计了衍射光栅和多波段窄带滤波器,ZEMAX 系统模拟结果表明,该系统能够检测水平方位角为 120° 、俯仰角为 96° 、波长范围为 $500\sim 1700\ \text{nm}$ 的激光辐射,全视场角度误差低于 0.5° ,激光波长分辨精度优于 $7\ \text{nm}$,具有较高的空间角分辨率和波长分辨精度。2022 年 Shi 等^[16]研究了一种二维激光告警综合检测系统,如图 3 所示,通过光栅获取入射激光的入射角和波长,使用光电二极管和光电检测电路 TDC-GPX2 测量激光脉冲宽度。该系统的探测水平角为 95° ,俯仰角为 75° ,测角分辨率为 0.5° ,光谱探测范围为 $400\sim 1700\ \text{nm}$,最小测量脉宽为 $5\ \text{ns}$,实现了对来袭激光多种信息的感知。

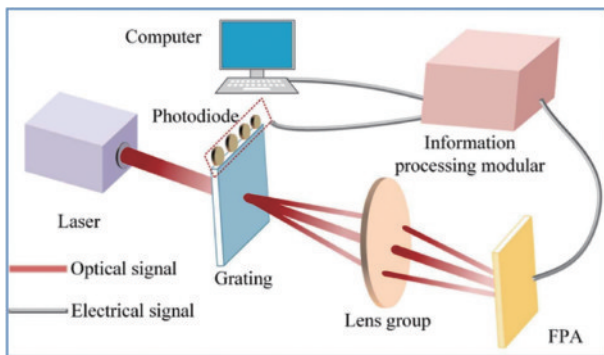


图 3 二维激光告警系统^[16]

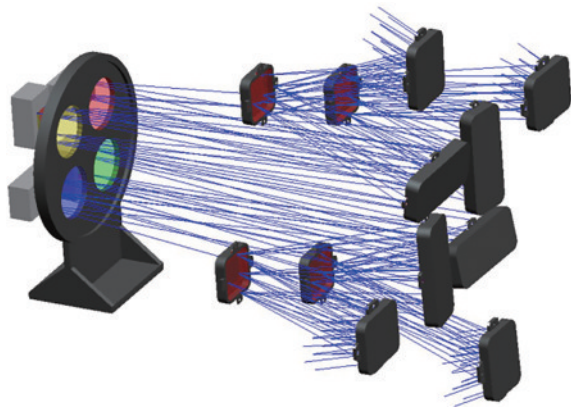
Fig. 3 2D laser warning system^[16]

2.4 成像型

成像型激光告警器通常由大视场的光学系统和电荷耦合器件(CCD)或其他面阵探测器组成,无须机械扫描,具有空间角分辨率高、灵敏度高、动态范围大等特点^[17]。

早期典型的成像型激光告警设备为 IMO 公司与美国 AIL 公司在 90 年代联合研制的 HALWR 型告警系统^[17]和美国陆军和仙童公司共同研制的拉赫韦斯(LAHAWS)激光告警系统^[18],两者都采用 CCD 探测器,具有较高的空间角分辨率。HALWR 系统采用采样频率为 $10\ \text{kHz}$ 的 CCD 探测器,系统水平探测视场角为 30° ,俯仰角为 20° ,探测波长范围为 $0.4\sim 1.1\ \mu\text{m}$,灵敏度为 $0.28\ \text{mW}/\text{cm}^2$,探测帧速为 $1\ \text{W}/\text{s}$ 至 $125\ \text{W}/\text{s}$ 之间,可以探测脉宽为 $10\sim 20\ \text{ns}$ 的脉冲激光,水平方向探测分辨率可达 $1\ \text{mrad}$,但高刷新频率的 CCD 制备工艺较难。LAHAWS 系统采用像素单元数为 100×100 的 CCD 探测器,利用 2 个 PIN 光电二极管消除背景干扰,该系统告警视场水平方向 360° ,垂直方向 $0^\circ\sim 90^\circ$,工作波长为 $1.06\ \mu\text{m}$,定向精度为 3° 。许启富等^[19]在 90 年代研制的机载激光探测报警器采用 CCD 作为接收器件,角度探测分辨率为 1.5° ,单个探测器视场角为 125° 。

近年来,成像型告警技术主要通过优化光学设计和使用性能更好的面阵探测器实现大视场和高空间角分辨率的激光探测。2018 年 Nejad 等^[20]设计了一种具有 6 片透镜的激光告警系统,探测波长范围为 $0.6\sim 1.1\ \mu\text{m}$,视场角为 20° ,系统光传输效率高达 82% ,具有高达 $160\ \text{dB}$ 的信噪比。Nejad 等^[21]在 2020 年又改进了光学系统,研制了一款基于鱼镜头的成像型激光检测系统。该系统由 8 片透镜组成,工作波段在可见光和近红外波段,视场角大于 180° ,焦距为 $2.4\ \text{mm}$,F 数小于 3,相对照度大于 92% ,调制传递函数在频率 $16.66\ \text{lp}/\text{mm}$ 处大于 0.8 。2020 年 Wojtanowski 等^[22]提出了一种基于自由曲面反射镜的光学入射角(AOI)传感器,该传感器的探测视场角可达 120° ,在全视场下的角度分辨率达到恒定的 $0.1\ \text{mm}/(^\circ)$,但是只能探测一维方位角信息。2022 年 Orth 等^[23]提出了一种结合鱼镜头和神经形态相机的激光告警系统,该系统具有 0.05° 的高空间角分辨率,探测视场角达到 180° 。神经形态激光告警器具有结合基于光电二极管的激光告警器和基于相机的激光告警器优点的潜力,如低功耗、高分辨率、高灵敏度激光威胁检测等,但是神经形态相机捕捉快速动态的能力具有强频率依赖性的响应特性。2023 年 Yang 等^[24]针对地球静止轨道的天基导弹告警,设计了 4 个离轴全反射型相机,单个视场为 9° ,口径为 $50\ \text{mm}$,4 个相机拼接后系统探测视场大于 18° ,如图 4 所示。具有不同光谱的滤波器放置在每台相机的前方,通过电机旋转扫描获取不同波段信息,仿真系

图 4 系统方案配置示意图^[24]Fig. 4 Schematic of system scheme configuration^[24]

统灵敏度达 $5 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2$, 但是系统需要较高的信息处理能力。

3 激光告警技术对比

相干识别型激光告警技术是早期激光告警技术的主要发展路线, 利用激光的相干性能够有效地滤除背景光, 并且能够同时获取来袭激光波长和方位角信息, 但是存在结构复杂、成本高、角分辨率低、机械扫描可靠性差等问题。近年来, 有关相干识别型告警设备的研究较少, 未见有装备使用。

光谱识别型激光告警设备通过使用多个传感器拼接实现全方位告警, 具有结构简单、技术成熟、响应光

谱范围大、成本低、灵敏度高优势, 对脉冲激光探测具有独特优势, 已广泛地装备应用于装甲车、飞机、舰船等机动性强、反制措施完善的平台上, 但是只能感知来袭激光大致方位, 难以获取激光波长信息。近年来, 光谱识别型告警技术通过利用柱透镜、四象限探测器、PSD 等器件有效地提高了空间角分辨率, 使得平台能够采取更为精准的防护及对抗措施。

光栅型告警技术利用光栅器件可以同时获取来袭激光方位角和波长等信息, 探测波段主要在可见光和近红外波段, 通过不断地优化光学系统设计和光栅器件, 能够有效地提高光栅衍射型告警器的空间角分辨率、探测视场、波长分辨率等性能。

成像型激光告警技术随着面阵探测器的发展, 近年来也发展迅速, 是当前获得高空间角分辨率的主要技术路线。成像型激光告警器的空间角分辨率能够达到毫弧度量级, 灵敏度高, 但存在激光波长无法分辨、响应光谱范围窄、成本高等问题, 应用与发展受到一定限制。设计低像差的光学系统和研制宽光谱、大面阵、高帧速率的探测器是提高成像型激光告警器性能的关键。

表 1 列举了不同告警技术的性能指标。相干型告警技术在稳定性、角分辨率等方面仍存在较大的不足; 光谱识别型告警技术主要的改进在于空间角分辨率的提升; 光栅衍射型告警技术能够同时获取来袭激光的多种参数, 在视场、角分辨率、波长分辨率等方面均有较高的改善; 成像型告警技术最大的优势在于高空间角分辨率, 从而对威胁源进行精确的定位。

表 1 不同激光告警技术性能对比

Table 1 Performance comparison of different laser warning technologies

Technology type	Researcher(year)	Spectral range / μm	Angular resolution / ($^\circ$)	Wavelength resolution / nm	Detector	FOV	Sensitivity
Coherent recognition	Marie Zandi(2021) ^[5]	0.35-1.1	5	10	BPD	360 $^\circ$	1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
	AN/AAR-59(2015) ^[7]	0.5-1.7/3-5	72	-	-	360 $^\circ$ ×360 $^\circ$	-
	Li Bing(2014) ^[8]	1-4	0.2	-	IRFPA	10 $^\circ$ ×10 $^\circ$	-
Spectral recognition	Zheng Wei(2017) ^[1]	0.4-1.1	0.06	-	PSD	2 $^\circ$ ×2 $^\circ$	-
	Wojtancowski(2020) ^[22]	-	0.1	-	1D array	120 $^\circ$	-
	Wu Chunhong(2021) ^[12]	0.7-1.1	1	-	4-QD	80 $^\circ$ ×80 $^\circ$	0.25 mW/cm 2
Grating diffraction	Shi Jin(2022) ^[16]	0.4-1.7	0.5	6	CCD	90 $^\circ$ ×75 $^\circ$	-
	Zhang R(2022) ^[15]	0.4-1.7	0.5	7	CCD	120 $^\circ$	-
Imaging	HALWR(2020) ^[18]	0.4-1.1	0.05	-	CCD	30 $^\circ$ ×20 $^\circ$	0.28 mW/cm 2
	Orth A(2022) ^[23]	0.658	0.05	-	CCD	180 $^\circ$ ×180 $^\circ$	2.4 nW/cm 2

4 激光告警技术发展趋势

通过梳理不同激光告警技术及设备的发展, 激光告警技术呈现以下的发展趋势。

1) 激光告警器多功能化发展。由于激光武器工作波段、工作模式、工作环境的不同, 激光告警设备在探测到具有威胁性的激光信号后, 需要判别威胁等级、

威胁源方向、威胁源种类等, 从而获取最优的防护和对抗效果。因而激光告警设备需要同时获取来袭激光波长、功率密度、方位角、信号特征等多种信息, 提供更为全面准确的判断依据。光谱识别型激光告警设备在高灵敏度探测的同时, 利用通道编码、柱透镜、PSD 等获取方位信息; 光栅衍射型激光告警设备因能够在大范围内同时获取方位角和波长信息, 近年来也备受关注;

中国科学院技术物理研究所研制的星载成像型告警器中加入了 4 个不同波长的探测头,系统能够同时获取来袭激光波长和方位角信息。通过对来袭激光的多种特征信息感知,能够更为准确地判断威胁等级,引导防御对抗系统采取合适的措施,实现对平台的保护。

2) 高空间角分辨率告警发展。激光告警设备对威胁源进行准确定位后,可以引导激光对抗系统实施精确定向干扰,比如发射特定信号特征的干扰激光对采用激光制导的导弹进行干扰,使其丧失目标。激光告警设备发射高能激光,对敌方激光探测、激光通信等系统进行远距离干扰或致盲,能够大幅提高光电对抗效能,尤其对机动性差、资源有限、反制措施有限的卫星平台具有重要意义。

3) 激光告警设备小型化发展。为实现平台向全空间的防护,需要多个激光告警设备进行拼接,激光告警设备的小型化可以有效地降低系统的体积、质量和成本。硅光芯片在激光雷达、生物传感、光通信等领域越来越受到关注,2022 年杨少华等^[25]利用微振镜和硅光芯片技术设计了一款具有体积小、灵敏度高、能够同时获取波长和方位角信息等优点的激光告警设备,极大地减少了资源占用。硅光芯片技术的发展为激光告警设备的小型化提供了新的技术路线。

4) 多种告警信息融合发展。为应对不同环境的不同威胁,需要对多种类的光电告警装备进行信息融合,增强对威胁源的感知能力。星载激光测距雷达与高光谱相机结合可以有效地识别碎片、飞行器、导弹等物体,并精确地获取距离、速度等信息,实现更为全面的告警。2018 年 El-Sherif 等^[26]设计了一种激光告警与光声探测相结合的新型告警器,该告警器同时探测来袭激光信号和目标产生的光声信号,能够在恶劣环境下工作,显著地降低了虚警率。多种告警信息的融合有助于构建更为安全的防护感知体系。

5 总 结

为应对日趋严重的激光威胁,激光告警技术近年来发展迅速,在探测视场、空间角分辨率、灵敏度等方面有了较大的提高,不仅能够快速识别具有威胁性的激光信号,还能够获取来袭激光的多种参数,更为精确地引导防护系统和对抗系统采取措施。

随着激光探测设备的迅速发展,激光告警器需要探测和处理的激光信号信息量日益庞大,对激光告警器的功能和性能有了更高的要求,激光告警技术也朝着多功能化、智能化、小型化、低成本化等方向发展,并且需要与其他不同功能、不同种类、不同装备平台的光电告警探测系统进行信息融合、组建网络,从而获取更加全面、更为安全的防护感知体系。

参 考 文 献

[1] 郑伟,武学英,崔健永,等. 卫星激光威胁告警技术[J].

太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(5): 781-786.

Zheng W, Wu X Y, Cui J Y, et al. Laser threat warning technique for satellites[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(5): 781-786.

[2] Ji Q, Zong S G, Yang J B. Application and development trend of laser technology in military field[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11606: 1160607.

[3] Mei J. Laser warning receiver[R]. Wright-Patterson AFB: National Air Intelligence Center, 1996.

[4] Wang W C, Hu H J, Jin D D, et al. Analysis and design of the ultraviolet warning optical system based on interference imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10461: 104611R.

[5] 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.

[6] Kumar S, Prakash S, Maini A K, et al. Design of a laser-warning system using an array of discrete photodiodes: part II[J]. Journal of Battlefield Technology, 2011, 14 (2): 13-17.

[7] 张元生. 机载光电告警系统技术发展分析[J]. 电光与控制, 2015, 22(6): 52-55.

Zhang Y S. Development of airborne electro-optical warning system[J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(6): 52-55.

[8] 李冰,赵跃进,张超,等. 非成像式激光告警系统的光学设计及优化[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1511-1516.

Li B, Zhao Y J, Zhang C, et al. Optical design and optimization for laser warning system with non-imaging mode[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1511-1516.

[9] Shemais A H, Elkhatib M M, Elhalwagy Y Z. Model design and hardware implementation of an intelligent laser warning system[J]. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2015, 10(5): 40-57.

[10] 王玉玉,王开元,师廷伟,等. 基于能量积分叠加图的激光告警角度识别技术研究[J]. 数字技术与应用, 2018, 36(1): 118-120.

Wang B Y, Wang K Y, Shi T W, et al. Study on the resolution of laser warning angle based on high repetition frequency laser signal energy integration[J]. Digital Technology and Application, 2018, 36(1): 118-120.

[11] 蔡贵霞. 四象限激光定位测量技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.

Cai G X. Research on four-quadrant laser positioning measurement technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.

[12] 吴春红. 基于四象限的激光探测定位技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.

Wu C H. Research on laser detection and positioning technology based on four quadrants[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.

[13] McAulay A D. Detecting modulated lasers in the battlefield and determining their direction[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7336: 585-592.

- [14] Schwarze C R, Vaillancourt R M, Carlson D L, et al. Laser event recorder[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5409: 120-127.
- [15] Zhang R, Yang X M, 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.
- [16] Shi J, Zhang R, Niu J Q, et al. Research on two-dimensional laser warning integrated detection technology [J]. Optik, 2022, 270: 170034.
- [17] Cantin A, Dubois J, Webb P, et al. Development of a miniaturized digital high angular resolution laser irradiation detector (harlid) and its integration in a laser warning receiver[M]//Lampropoulos G A, Lessard R A. Applications of photonic technology 2. Boston: Springer, 1997: 411-416.
- [18] Bai F, Hu Y Y, Zhao R G. Research on comprehensive defense technology of the emergency command vehicle [M]//Liang Q L, Liu X, Na Z Y, et al. Communications, signal processing, and systems. Lecture notes in electrical engineering. Singapore: Springer, 2020, 517: 1194-1201.
- [19] 许启富, 施德恒. 应用 CCD 的机载红外激光报警装置 [J]. 红外技术, 1996, 18(4): 7-8.
Xu Q F, Shi D H. The airborne CCD IR laser warning system[J]. Infrared Technology, 1996, 18(4): 7-8.
- [20] Nejad S M, Arab H, Sheshkelani N R. 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.
- [21] Nejad S M, Ronagh Sheshkelani N. Design and performance analysis of a fisheye-based optical head for an imaging laser detecting system[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science, 2020, 44(5): 1595-1604.
- [22] 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.
- [23] Orth A, Stewart T, Picard M, et al. Towards a laser warning system in the visible spectrum using a neuromorphic camera[C]//Proceedings of the International Conference on Neuromorphic Systems 2022, July 27-29, 2022, Knoxville, TN, USA. New York: ACM Press, 2022.
- [24] Yang L X, Sun G G, Zheng G X. Research on multi-band space-based ultraviolet early warning system[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12557: 12557.
- [25] 杨少华, 侯霞. 基于硅光芯片的激光告警器: CN115265809A[P]. 2022-11-01.
Yang S H, Hou X. Laser alarm based on silicon optical chip: CN115265809A[P]. 2022-11-01.
- [26] 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.