

光栅衍射型超广角激光告警系统的灵敏度分析

王 龙,王永仲,沈学举,何永强,董红军,张维安
(军械工程学院,河北 石家庄 050003)

摘 要:研制了光栅衍射型超广角激光告警样机,推导了系统探测灵敏度的估算公式,用1064 nm脉冲激光在半视场角 $0^{\circ} \sim 78^{\circ}$ 范围内测试了样机的最小可探测能量密度。结果表明,半视场角 $0^{\circ} \sim 42^{\circ}$ 范围内,入射激光能量密度保持 1.8 nJ/cm^2 基本不变的情况下,告警系统1级成像光斑的灰度值约由20逐渐减小为7;48 $^{\circ} \sim 78^{\circ}$ 范围内,告警系统的最小可探测能量密度约由 2 nJ/cm^2 逐渐增大为 7 nJ/cm^2 ;分析表明,随激光入射角度增大,告警系统像差增大导致成像光斑面积变大是引起告警系统最小可探测能量密度变大的主要原因。

关键词:激光告警;鱼眼镜头;光栅衍射;探测灵敏度

中图分类号:TN247;TN977 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2014.03.016

Analysis of detective sensitivity for super wide-angle laser warning system based on grating diffraction

WANG Long, WANG Yong-zhong, SHEN Xue-ju, HE Yong-qiang, DONG Hong-jun, ZHANG Wei-an
(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: A model machine of super wide angle laser warning system based on grating diffraction was developed, and the sensitivity estimate-formula of the system was derived, then the minimum detectable energy density of the machine was tested by using 1064nm pulse laser in the half field angle range $0^{\circ} \sim 78^{\circ}$. Results show that the grey value of imaging light spot in this warning system decreases from 20 to 7 when the incident laser energy intensity remains 1.8 nJ/cm^2 in the angle scope of $0^{\circ} \sim 42^{\circ}$, and the minimum detectable energy density increases from 2 nJ/cm^2 to 7 nJ/cm^2 with the incident angle from 48° to 78° . With the incident angle increasing, the optical aberration of the system increases, it causes the imaging spot to be bigger. That is the main reason for the increasing of the minimum detectable energy density.

Key words: laser warning; fish-eye lens; grating diffraction; detective sensitivity

1 引 言

激光测距机、激光目标指示器、激光雷达、激光制导炸弹/导弹和强激光武器的广泛应用,对各种军事目标构成了越来越严重的威胁^[1-2]。为了探测来袭激光信号,提高己方人员和装备的光电对抗能力,激光告警装置受到越来越多的重视^[3-4]。当前的激光告警器按技术体制可分为光谱识别型^[5]、成像探测型^[6]、相干探测型^[7-8]以及不同机理相融合的复

合探测型^[9-10]几大类,其中光栅衍射型超广角激光告警系统体积小、质量轻、凝视视场大、定向精度和波长分辨能力高,有很好的发展前景^[10]。探测灵敏度是反映激光告警系统性能的一个重要指标,直接影响到告警系统的动态范围、作用距离等重要指标,

作者简介:王 龙(1985-),男,硕士生,现主要从事光电对抗和激光防护的研究。E-mail:wanglong4800533@163.com
收稿日期:2013-07-16

准确测量告警系统的探测灵敏度,是全面客观评价其性能的基础。

2 告警系统探测灵敏度的理论分析

2.1 系统的工作原理

系统的工作原理如图1所示^[10], F_1 为鱼镜头接收入射激光,其大视场保证了系统对大空域凝视探测; F_1 后焦面 P 与变换透镜 F_2 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。

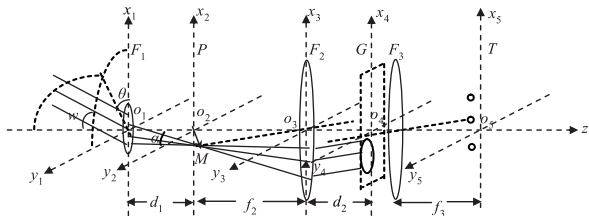


图1 光栅衍射型超广角激光告警系统的工作原理示意图

Fig. 1 Mechanism of super wide-angle laser warning system based on grating diffraction

假设入射激光束与光轴夹角为 ω , 子午面与 $x_1 o_1 z_1$ 平面夹角为 θ , 采用焦距为 f_1 的正交投影成像方式的鱼镜头,若一维振幅型正弦光栅的周期常数为 d , 变换透镜 F_2 和衍射透镜 F_3 的焦距分别为 f_2 和 f_3 , 可求得探测器接收面 T 上的光强分布为^[10]:

$$I(x_5, y_5) = \frac{r^2}{\lambda^2 f_3^2} \left\{ \frac{1}{4} \left[\frac{J_1(2\pi r \sqrt{u_0^2 + v_0^2})}{\sqrt{u_0^2 + v_0^2}} \right]^2 + \frac{1}{16} \left[\frac{J_1(2\pi r \sqrt{u_{+1}^2 + v_{+1}^2})}{\sqrt{u_{+1}^2 + v_{+1}^2}} \right]^2 + \frac{1}{16} \left[\frac{J_1(2\pi r \sqrt{u_{-1}^2 + v_{-1}^2})}{\sqrt{u_{-1}^2 + v_{-1}^2}} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} f_x = \frac{x_5}{\lambda f_3}, f_y = \frac{y_5}{\lambda f_3} \\ u_0 = f_x - f_1 \sin \omega \cos \theta / \left(\lambda \sqrt{f_1^2 \sin^2 \omega + f_2^2} \right) \\ u_{+1} = f_x - f_1 \sin \omega \cos \theta / \left(\lambda \sqrt{f_1^2 \sin^2 \omega + f_2^2} \right) - 1/d \\ u_{-1} = f_x - f_1 \sin \omega \cos \theta / \left(\lambda \sqrt{f_1^2 \sin^2 \omega + f_2^2} \right) + 1/d \\ v_0 = v_{+1} = v_{-1} = f_y - f_1 \sin \omega \sin \theta / \left(\lambda \sqrt{f_1^2 \sin^2 \omega + f_2^2} \right) \end{cases}$$

可以看出,入射激光经告警系统成像为等间隔的三个衍射亮斑, ± 1 级光斑强度为 0 级光斑强度的 1/4, 根据 0 级光斑坐标和相邻两光斑间隔可求解入射激光的方向和波长。

2.2 系统探测灵敏度的估算

光栅衍射型超广角激光告警系统的性能很大程度上取决于其接收物镜鱼镜头的性能参数。普通光学系统中像面照度可以表示为^[11]:

$$E' = K_a E_0 \cos^4(\omega') \quad (2)$$

式中, E' 为轴外斜光束的照度; E_0 为轴上光束的照度; ω' 为像方半视场角。

为保证像面照度的均匀性,鱼镜头利用高额桶形畸变使与物方半视场角 ω 对应的 ω' 大幅度变小;另一方面,鱼镜头充分利用像差渐晕使轴外物点成像光束截面积增大,即式(2)中 K_a 值尽可能增大,通常可以达到 1.2 左右。

由于脉冲激光的脉宽通常为 10 ns 左右,远小于探测器的单帧曝光时间,一个激光脉冲不可能同时成像在相邻的两帧图像上,因此告警系统采用帧相减技术,其探测灵敏度定义为激光照射到告警系统前的光能量密度。

通过优化设计,告警系统的孔径光阑即为鱼镜头的孔径光阑,假设其所对应的轴上入瞳直径为 D_0 , 则入瞳面积 S_0 为:

$$S_0 = \pi D_0^2 / 4 \quad (3)$$

告警系统由多个透镜和光栅组成,其能量传输效率由透镜系统的能量传输效率和光栅的衍射效率共同决定。取光栅 ± 1 级光斑的衍射效率作为光栅衍射效率记为 T_1 , 透镜系统的能量传输效率主要由各镜面的反射损失和透镜材料的吸收损失决定,会受到激光入射方向的影响^[12], 记为 $T_2(\omega)$ 。假设轴向入射的脉冲激光在告警系统前的能量密度为 w , 则告警系统所成像光斑的能量为:

$$Q_0 = w T_1 T_2(\omega) S_0 = \pi w T_1 T_2(\omega) D_0^2 / 4 \quad (4)$$

能量密度为 w 的脉冲激光,以不同角度 ω 入射时,轴外斜光束截面积与轴上点光束面积之比为 $K_a(\omega)$, 鱼镜头一旦选定,其像方出射角与物方入射角的关系 $\omega' = f(\omega)$ 已知,告警系统成像光斑的能量可以表示为:

$$\begin{aligned} Q(\omega) &= Q_0 K_a(\omega) \cos^4 \omega' \\ &= \pi w T_1 T_2(\omega) D_0^2 K_a(\omega) \cos^4 [f(\omega)] / 4 \quad (5) \end{aligned}$$

考虑到鱼镜头的大像差特性,入射角为 ω 的激光束经告警系统的成像光斑面积记为 $m(\omega)$ 个像元,若探测器单个像元能够探测激光的能量阈值为 Q_{th} , 则从不同角度入射的激光能被探测到的最小能量密度为:

$$w_{th} = 4m(\omega)Q_{th}/[\pi T_1 T_2(\omega)D_0^2 K_a(\omega) \cos^4 f(\omega)] \quad (6)$$

3 实验及分析

3.1 实验装置

实验装置如图 2 所示,按 2.1 节论述的相对位置关系组建光栅衍射型超广角激光告警样机 LWS,并将其固定于方向旋转机构上,方向旋转机构精度为 1 mil,约为 0.06°。固定激光入射方向,通过方向旋转机构带动告警样机做水平旋转,以此模拟告警系统工作时激光入射角度的改变过程。光源采用 Beamtech Optronics 公司生产的 SGR-10 型 Nd:YAG 激光器,可输出波长 1064 nm 和 532 nm 激光,脉宽为 8 ns,能量不稳定度 <5%。为便于观察,光路调整过程中激光器采用 532 nm 输出,待光路调试完毕后将激光器切换为 1064 nm 输出模式。脉冲激光经连续可调衰减器 A1 和衰减片 A2 适当衰减并被透镜 L1 扩束后,激光束完全覆盖告警系统的鱼镜头。采用 Coherent. Ltd. EPM-1000 激光能量计,能量探头型号为 J25LP-1A,考虑到告警系统的探测灵敏度约为纳焦每平方厘米量级,直接将能量探头放置在告警系统前无法探测如此小的能量,实验中用能量计探测经分束镜 BS 和反射镜 M 反射的激光能量标记照射到激光告警系统的能量密度。

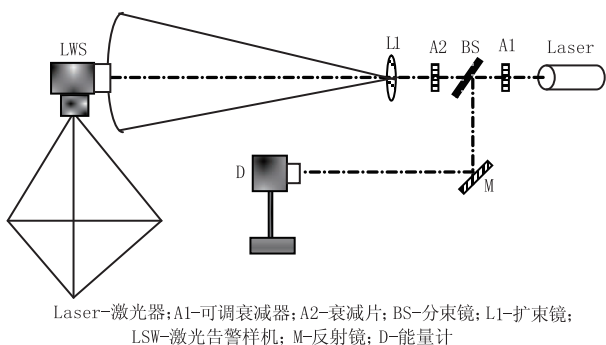


图 2 激光告警系统探测灵敏度测试装置示意图
Fig. 2 Experimental setup used to sensitivity test of this laser warning system

3.2 入射激光能量密度标定

光路调整完毕后,首先将能量探头放置在告警系统前,垂直于激光入射方向探测激光能量,调整可调衰减器,使能量计可有效探测入射激光,测量 50 个激光脉冲;然后将能量计放置在反射光路中合适位置探测分束镜 BS 和反射镜 M 反射的激光能量,测量 50 个激光脉冲。能量计探测到的能量除以探头感光面积即为相应位置的能量密度,为描述方便,将能量计在告警系统前所处的位置记为位置 1,其在反射光路

中的位置记为位置 2。实验数据如表 1 所示,两位置处的能量密度比为 1 : 53.85。

表 1 两标记位置处能量密度实验数据

Tab. 1 Experimental data of energy density for two marked positions

Serial number	Energy intensity of position 1 / (μJ · cm ⁻²)	Energy intensity of position 2 / (μJ · cm ⁻²)	Serial number	Energy intensity of position 1 / (μJ · cm ⁻²)	Energy intensity of position 2 / (μJ · cm ⁻²)
1	0.0393	2.25	11	0.0399	2.14
2	0.0428	2.20	12	0.0438	2.21
3	0.0395	2.21	13	0.0416	2.18
4	0.0420	2.21	14	0.0409	2.18
5	0.0428	2.24	15	0.0407	2.22
6	0.0393	2.24	16	0.0440	2.17
7	0.0387	2.18	17	0.0395	2.24
8	0.0407	2.19	18	0.0407	2.21
9	0.0416	2.22	19	0.0397	2.25
10	0.0395	2.25	20	0.0440	2.22

3.3 告警系统探测灵敏度测试

以 100 mil 为步长,沿水平方向转动告警样机,模拟激光从不同角度入射告警系统的情况。对告警系统采集的图像,采用帧相减技术提取入射激光的成像光斑。由于脉冲激光器输出能量的不稳定性,尽管衰减器连续可调,但改变激光入射角度过程中,激光的成像光斑灰度值很难完全相等,故将告警系统的探测阈值设定为 (8 ± 2) 个灰度单位。激光入射角度较小情况下,成像光斑灰度值为 (8 ± 2) 时,位置 2 处的激光能量过小,能量计无法准确探测。激光入射角度为 0° ~ 42° 范围内,调节入射激光能量密度至能量计可正常测量的最小值 1.8 nJ/cm²,记录激光成像光斑的灰度值,如图 3(a) 所示;激光入射角度大于 42° 后,改变入射激光能量使告警系统的成像光斑灰度值为阈值,每个角度测量 10 个激光脉冲,取均值,实验结果如图 3(b) 所示。

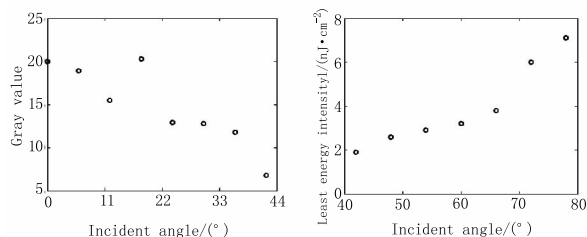


图 3 不同入射方向情况下系统的最小可探测能量密度
Fig. 3 Least energy density of the warning system with different incident angle

可以看出,随激光入射角度增大,告警系统的

探测性能下降。激光入射角度 $0^\circ \sim 42^\circ$ 范围内,在入射激光能量密度保持 1.8 nJ/cm^2 基本不变的情况下,告警系统成像光斑的灰度值基本上是逐渐减小; $48^\circ \sim 78^\circ$ 范围内,随入射角度的增大,告警系统的最小可探测能量密度大约由 2 nJ/cm^2 逐渐增大为 7 nJ/cm^2 。

告警系统探测灵敏度随激光入射角度的变化规律由其光学系统能量透过率和告警系统的成像特性随激光入射角度的变化规律共同决定。文献[11]表明,即使激光束入射角为 90° ,经鱼镜头后其出射角也仅为 10° ,这保证了整个告警系统的能量透过率随激光入射角度的增大变化很小,可以忽略不计^[12],告警系统探测灵敏度的变化规律主要由告警系统的成像特性决定。以某视场角为 170° 的鱼镜头^[13]为例,使用光学设计软件 ZEMAX 建立光栅衍射型超广角激光告警系统的模型,模拟不同方向激光入射时的 1 级成像光斑,如图 3 所示。激光入射角度较小时,告警系统的成像光斑面积小,能量集中分布在有限的几个像元上;激光入射角增大时,告警系统的像差增大,成像光斑形状发生畸变的同时面积变大,能量分布变的分散,导致告警系统的最小可探测能量密度显著变大。

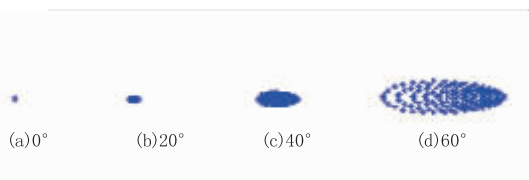


图4 告警系统对不同方向入射激光的 1 级成像光斑
Fig. 4 Imaged spots of the fish-eye lens for incidence laser with different direction

4 结论

给出了光栅衍射型超广角激光告警系统探测灵敏度的估算公式,用 1064 nm 脉冲激光在半视场角 $0^\circ \sim 78^\circ$ 内测试了告警样机的最小可探测能量密度。结果表明,告警系统像差随激光入射角度增大而变大导致成像光斑面积增大是引起告警系统探测灵敏度下降的主要原因。因此,在设计光栅衍射型激光告警系统时,选用像差小的鱼镜头,并使鱼镜头与变换透镜和衍射透镜配合得当,减小整个系统的像差,可有效提高告警系统的探测灵敏度。

参考文献:

[1] Chen Jian. Research on laser alarm technology based on laser reconnoiter alarm implement[J]. OME Information, 2011, 28(3): 6-11. (in Chinese)

陈健. 基于激光侦察告警器的激光告警技术研究[J]. 光机电信息, 2011, 28(3): 6-11.

[2] Li Wei. New type laser attack and countermeasure weapons [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10): 1944-1948. (in Chinese)
李伟. 新型激光攻击与对抗武器[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1944-1948.

[3] Chen Ning, Wang Bing, Chen Zhaobing. Developing actuality and trend of the laser warning equipments[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(7): 19-22. (in Chinese)
陈宁, 王兵, 陈兆兵. 激光告警装备的发展现状与趋势分析[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(7): 19-22.

[4] Gan Yuanliu, Li Chaorong. Development of laser alarm and laser interference technology [J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(12): 15-19. (in Chinese)
淦元柳, 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] Huang Chengong, Wu Junhui, Yao Mei, et al. Laser threat orientation identification technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(4): 626-630. (in Chinese)
黄成功, 吴军辉, 姚梅, 等. 激光威胁源方向识别技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 626-630.

[6] Ying Jiaju, Wang Yongzhong, HE Yongqiang, et al. An algorithm for laser spot precise locating in omni-directional laser warning system [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(12): 53-56. (in Chinese)
应家驹, 王永仲, 何永强, 等. 全向激光告警系统中激光光斑精确定位方法[J]. 电光与控制, 2009, 16(12): 53-56.

[7] Zhang Jilong, Tian Erming, Wang Zhibin. Laser warning receiver based on sinusoidal transmission grating [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(3): 326-329. (in Chinese)
张记龙, 田二明, 王志斌. 基于正弦透射光栅的激光告警接收机研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 326-329.

[8] Guo Hao, Ma Na, Wang Min, et al. Incidence measurement analysis in laser warning device based on fabry-perot etalon [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(3): 279-281. (in Chinese)
郭豪, 马娜, 王敏, 等. 法布里-珀罗型告警器激光入射角度的测量方法分析[J]. 激光与红外, 2008, 38(3): 279-281.

[9] Wu Dan. Multielement interrelated detection technique and design analysis in laser warning [J]. Aero Weaponry, 2006, (5): 54-56. (in Chinese)

- 吴丹. 激光告警中的多元相关探测技术和设计分析[J]. 航空兵器, 2006, (5): 54 - 56.
- [10] Wang Long, Wang Yongzhong, Shen Xueju, et al. Study of wide-angle staring laser threat detection system based on grating diffraction[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0312005 - 1 ~ 5. (in Chinese)
- 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 - 1 ~ 5.
- [11] Ying Jiaju, Wang Yongzhong, He Yongqiang, et al. Analysis of detective sensitivity for omni -directional laser warning system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(6): 1038 - 1042. (in Chinese)
- 应家驹, 王永仲, 何永强, 等. 全向激光告警系统的探测灵敏度分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 1038 - 1042.
- [12] Chi Zeying, Chen Wenjian. Applied optics and elements of optical design[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2006: 246 - 251. (in Chinese)
- 迟泽英, 陈文建. 应用光学与光学设计基础[M]. 南京: 东南大学出版社, 2006: 246 - 251.
- [13] Wang Yongzhong. Fish-eye lens optics[M]. Beijing: Science Press, 2006: 55. (in Chinese)
- 王永仲. 鱼眼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 55.