

基于二维激光告警的闪耀光栅设计

张 瑞^{1,2,3}, 王志斌^{1,2,3}, 温廷敦^{1,2,3}, 张敏娟^{1,2,3}, 李克武^{1,2,3}

(1. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

3. 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: 现有光栅衍射型激光告警中, 正弦光栅存在 ± 1 级衍射效率较低, 闪耀光栅在闪耀波长附近 0 级和 -1 级衍射效率很低, 这两种光栅的缺点都降低了激光告警的可靠性。为此文中提出了一种改进型闪耀光栅。将两闪耀光栅反相对接, 并且中间留一定无光栅空间, 此改进可提高波长在闪耀波长附近 0 级和 -1 级的衍射效率, 将有效克服传统闪耀光栅的漏报警现象。设计加工了闪耀波长为 800 nm 的改进型闪耀光栅, 理论分析了 0 级和 ± 1 级衍射效率; 采用波长为 808 nm 和 850 nm 的光, 对改进型闪耀光栅进行二维激光告警实验测试, 实验结果表明, 在波长为闪耀波长附近光入射时, 改进型较普通闪耀光栅的 0 级和 -1 级衍射强度有很大提高, 能够被 CCD 有效探测。该改进型闪耀光栅可有效提高二维激光告警系统的可靠性。

关键词: 二维激光告警; 闪耀光栅; 光栅衍射; 衍射效率

中图分类号: TN247; TJ95 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1020004

Blazed grating design based on two-dimensional laser warning

Zhang Rui^{1,2,3}, Wang Zhibin^{1,2,3}, Wen Tingdun^{1,2,3}, Zhang Minjuan^{1,2,3}, Li Kewu^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Lab of Instrument Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. Engineering and Technology Research Center of Shanxi Provincial for Optical-Electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Existing laser warning based on the diffraction grating has the following disadvantages. The diffraction efficiencies of ± 1 order based on sinusoidal grating are low and the diffraction efficiencies of -1 order and 0 order based on blazed grating are very low. These shortcomings have reduced the reliability of the laser warning. A method for improving the blazed grating was presented. The two blazed gratings inverted docking, some no grating space was vacated in the middle of the grating. This improvement can increase the diffraction efficiencies of -1 order and 0 order. This grating will effectively overcome the missing alarm. The improved blazed grating was designed and processed with blazed wavelength $\lambda=800$ nm. The diffraction efficiencies of 0 order and ± 1 order were derived. This grating was tested by two-dimensional laser warning using the laser with $\lambda=808$ nm and $\lambda=850$ nm. When

收稿日期: 2016-02-10; 修订日期: 2016-03-23

基金项目: 国际科技合作项目(2013DFR10150); 青年科学基金(61505180)

作者简介: 张瑞(1987-), 男, 博士生, 主要从事光电信息检测方面的研究。Email: ruizhanghy@163.com

导师简介: 王志斌(1966-), 男, 教授, 主要从事光电探测方面的研究。Email: wangzhibin@nuc.edu.cn

wavelength of the incident light close to the blaze wavelength, the experimental results show that the improved blazed grating diffraction efficiencies of -1 order and 0 order have greatly improved, and they can be effectively detected by CCD. The reliability of two-dimensional laser warning is improved using this improved blazed grating.

Key words: two-dimensional laser warning; blazed grating; grating diffraction; diffraction efficiency

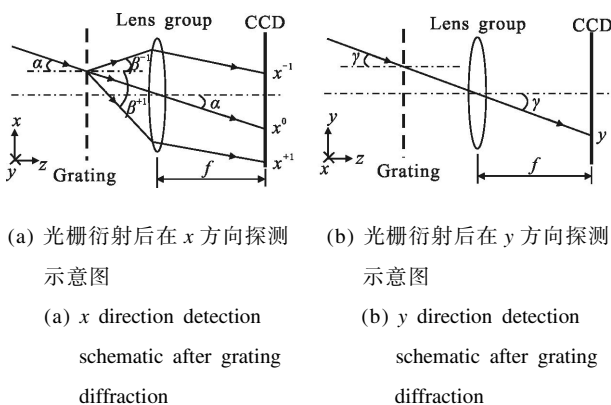
0 引言

随着激光技术的快速发展,使其在现代战争中发挥着越来越重要的作用,激光侦察、激光测距仪、激光眩目器、激光致盲武器、反导弹激光武器、反卫星激光武器、激光制导武器等被越来越广泛地应用在现代战争中^[1-7]。激光武器的广泛应用改变了现在战争的格局,激光技术的发展甚至将影响未来的战争模式。激光告警技术是光电信息对抗的重要组成,是激光对抗的重要手段。通过探测,确定激光威胁源的位置,检测激光特性,判断其用途与威胁程度,为己方采取适当措施提供可靠依据。来袭激光的入射方向角度与波长信息的快速精确获取是激光告警技术研究的核心内容。因为不同波长激光的军事用途是不同的,只有获取来袭激光准确的波长信息才能正确判断出敌方的武器种类、军事企图与威胁程度等信息,为我方是否采取防卫或反击措施提供依据;只有获取了来袭激光准确入射方向角度,判断出威胁源的位置,才能为我方干扰或者摧毁对方目标提供保障。

根据原理,激光告警可分为光谱识别型、相干识别型、散射探测型三种类型^[4-10],其中相干识别型,在波长分辨率、角度分辨率、视场角和抗干扰性等方面具有较大优势。和其他相干型相比,采用光栅、透镜、阵列探测器等构成的光栅衍射型激光告警器,无需机械扫描、工艺要求低、系统结构简单,实时性好。2013 年王志斌等人提出二维激光告警技术^[7],可以同时获得被测激光的方位角、俯仰角和波长信息。目前应用于激光探测的光栅主要有正弦光栅和闪耀光栅两种,正弦光栅的±1 级衍射效率较低,传统的闪耀光栅 0 级衍射效率和-1 级衍射效率较低,这都对激光探测灵敏度有影响。为此文中通过优化设计闪耀光栅来克服这些缺点。

1 二维激光告警基本原理

光栅衍射型激光波长和二维方位探测系统如图 1 所示,主要由光栅、透镜组和 CCD 探测器组成,CCD 置于焦平面处。在 xOz 面投影如图 1(a)所示,在 yOz 面投影如图 1(b)所示。被测激光的方向信息不仅包括方位角 α ,如图 1(a)所示;而且包括俯仰角 γ ,如图 1(b)所示。



(a) 光栅衍射后在 x 方向探测示意图 (b) 光栅衍射后在 y 方向探测示意图
 (a) x direction detection schematic after grating diffraction (b) y direction detection schematic after grating diffraction

图 1 基于光栅衍射的二维激光告警原理图

Fig.1 Schematic of two-dimensional laser warning based on grating diffraction

激光入射经过光栅衍射后由透镜汇聚干涉,成像在 CCD 上。在 x 方向,零级光谱位置为 x^0 ,+1 级光谱位置为 x^+1 , -1 级光谱位置为 x^-1 ,如图 1 (a)所示;在 y 方向,入射光衍射后在探测器位置为 y ,如图 1(b)所示。其中光栅常数为 d ,透镜组的焦距为 f 。

由图 1(a)可知,零级衍射角等于入射角 α ;+1、-1 级衍射角度 β^+1 、 β^-1 满足:

$$\text{负一级为: } \sin\beta^+1 = \sin\alpha + \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

$$\text{负一级为: } \sin\beta^-1 = \sin\alpha - \frac{\lambda}{d} \quad (2)$$

CCD 位于焦距为 f 的透镜组焦面处,将衍射后的光信号转换为电信号,其 0、+1、-1 级衍射的位置如下:

$$\begin{cases} x^0 = f \tan \alpha \\ x^{+1} = f \tan \beta^{+1} \\ x^{-1} = f \tan \beta^{-1} \\ y = f \tan \gamma \end{cases} \quad (3)$$

由公式(1)、(2)和(3)可以确定 1 级衍射角 β^{+1} 、 β^{-1} 以及角 α 、角 γ 和波长 λ , 结果如下:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(\frac{x^0}{f}\right) \\ \gamma = \arctan\left(\frac{y}{f}\right) \\ \lambda = d \left\{ \sin \left[\arctan\left(\frac{x^0}{f}\right) \right] + \sin \left[\arctan\left(\frac{x^{\pm 1}}{f}\right) \right] \right\} \end{cases} \quad (4)$$

二维激光告警就是通过下文来得到被测目标激光的方位角 α 、俯仰角 γ 和波长 λ 信息。

2 闪耀光栅设计

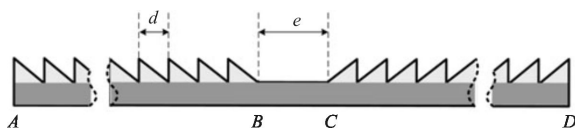
由于传统的闪耀光栅在闪耀波长附件的光, 经过闪耀光栅的能量主要集中在+1 级衍射上, 0 级和-1 级的衍射效率很低。这将导致如果被测激光的波长在闪耀波长附近, 由于 0 级和-1 级的衍射效率很低, 很容易被背景影响, 导致无法探测。为此, 文中改进设计了一种闪耀光栅可有效克服上面的问题。改进后的闪耀光栅结构及衍射光路如图 2 所示, 光栅

常数 d , 该结构的特点: 等效为两个完全相同的闪耀光栅 AB 和 CD 反相对接, 这样可以保证+1 级和-1 级的衍射光强相同; 并且中间 BC 段空一定间距 e 以提高 0 级的强度, 这样便于后续处理中 0 级和+1 级衍射光斑的确定。为体现光强的分布, 在图 2 (b) 中, 光线越粗表示光强越强。

首先, 改进后的闪耀光栅使衍射后的能量主要集中于 0 级、+1 级和-1 级衍射光斑, 提高了二维激光告警系统的灵敏度; 其次, +1 级和-1 级衍射效率相同, 对于波长在闪耀波长的激光, 避免了由于 0 级和-1 级的衍射效率很低所导致的漏报警现象。

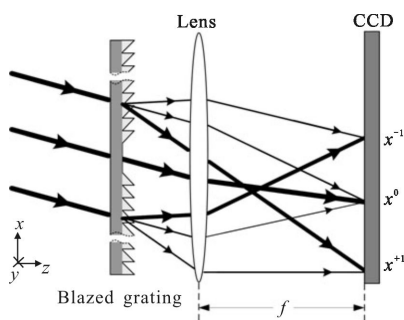
3 实验及分析

为验证改进后闪耀光栅在二维激光告警上的优点, 设计加工了改进后的闪耀光栅, 并搭建实验系统进行验证, 实验装置及光栅如图 3 所示。设计改进后的闪耀光栅的参数: 尺寸 50 mm×50 mm, 光栅常数 $d=(1/300)$ mm, 结合图 2(a) 中间空的 BC 间距 $e=1.6$ mm, 闪耀波长 $\lambda=800$ nm, 改进后的闪耀光栅实物如图 3 中的 B 。实验中采用相同尺寸、相同光栅常数、相同闪耀波长、相同材料的普通闪耀光栅(如图 3 中的 A)进行实验对比。



(a) 改进闪耀光栅结构示意图

(a) Schematic of improved blazed grating



(b) 光栅衍射光路及强度分布示意图

(b) Diffracted light path and the light intensity distribution

图 2 改进闪耀光栅结构及衍射光路示意图

Fig.2 Schematic of improved blazed grating and diffracted light path

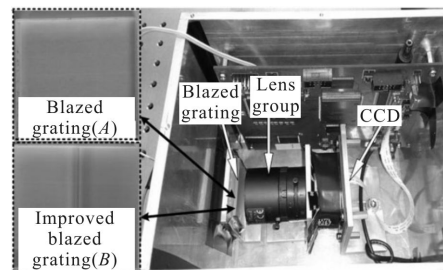


图 3 实验装置

Fig.3 Experimental rig

由于实验中透镜的直径 $R=30$ mm, 因此衍射后能进入透镜组的光束并不是按光栅的形状(正方形), 而是透镜的形状(圆形)进行计算, 如图 4 所示, 中间无光栅区域 II 的面积 $S_{II}=eR$, 两个对接光栅 I 和 III 的有效面积是 $S_I=S_{III}=[\pi(R/2)^2-eR]/2$ 。

此时衍射效率计算具体如下, 对于普通闪耀光栅来说, 设波长为 λ 时, +1 级、0 级和-1 级的衍射效率分别为 $\eta^{+1}(\lambda)$ 、 $\eta^0(\lambda)$ 和 $\eta^{-1}(\lambda)$, 对于改进后的闪耀光栅+1 级、0 级和-1 级的衍射效率 $\eta_{改进}^{+1}(\lambda)$ 、 $\eta_{改进}^0(\lambda)$

和 $\eta_{改进}^{-1}(\lambda)$ 分别为:

$$\begin{cases} \eta_{改进}^{+1}(\lambda) = \frac{S_I}{\pi(R/2)^2} \eta^{+1}(\lambda) + \frac{S_{III}}{\pi(R/2)^2} \eta^{-1}(\lambda) \\ \eta_{改进}^0(\lambda) = \frac{S_I}{\pi(R/2)^2} \eta^0(\lambda) + \frac{S_{II}}{\pi(R/2)^2} + \frac{S_{III}}{\pi(R/2)^2} \eta^0(\lambda) \Rightarrow \\ \eta_{改进}^{-1}(\lambda) = \frac{S_I}{\pi(R/2)^2} \eta^{-1}(\lambda) + \frac{S_{III}}{\pi(R/2)^2} \eta^{+1}(\lambda) \\ \eta_{改进}^{+1}(\lambda) = \eta_{改进}^{-1}(\lambda) = \frac{\pi(R/2)^2 - eR}{2\pi(R/2)^2} [\eta^{+1}(\lambda) + \eta^{-1}(\lambda)] \\ \eta_{改进}^0(\lambda) = \frac{\pi(R/2)^2 - eR}{2\pi(R/2)^2} \eta^0(\lambda) + \frac{eR}{\pi(R/2)^2} \end{cases} \quad (5)$$

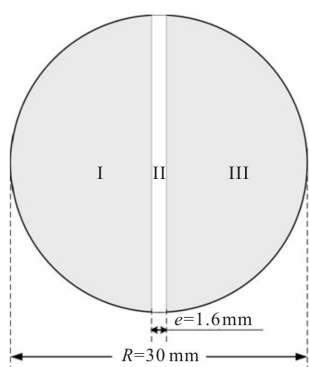


图 4 光进入透镜组的有效面积

Fig.4 Effective area when light passes through the lenses

根据项目中探测激光波长范围:800~1 600 nm, 结合图 3 的两种光栅和公式(5),在闪耀波长 800 nm 附近选用了波长 $\lambda=808 \text{ nm}$ 和 $\lambda=850 \text{ nm}$ 及波长范围内边界波长 $\lambda=1 550 \text{ nm}$ 这三种激光进行理论分析和实验验证。其中相应参数带入后得到两种闪耀光栅的衍射效率对比如表 1 所示,在 CCD 上成像的结果如图 5 所示。由图 5 可以看出:对于普通的闪耀光栅,入射光接近闪耀波长时+1 级衍射光斑接近饱和,但是 0 级和-1 级衍射光斑几乎被背景淹没(如图 5(a1)和图 5(a2)虚线椭圆区域),这将无法计算波长和方向信息;但是对于改进后的闪耀光栅,入射光在接近闪耀波长时,+1 级和-1 级衍射光斑强度几乎相同,并且 0 级也可明显看出(如图 5(b1)和图 5(b2));对于入射光远离闪耀波长时普通与改进的光栅 ± 1 级衍射光斑强度几乎一样,主要的不同在于改进后的闪耀光栅 0 级光斑强度明显加强(如图 5(a3)和图 5(b3))。

表 1 衍射效率分布

Tab.1 Diffraction efficiency

Grating type	Wavelength λ/nm	Diffraction efficiency		
		+1 order	0 order	-1 order
Common grating	808	60%	0.2%	0.8%
	850	55%	0.5%	1.1%
	1 550	15%	5.1%	10%
Modified grating	808	28.3%	6.9%	28.3%
	850	26.2%	7.0%	26.2%
	1 550	11.7%	11.6%	11.7%

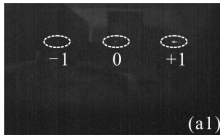
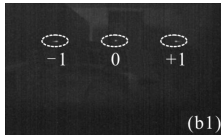
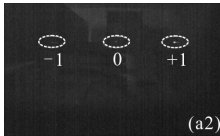
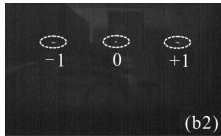
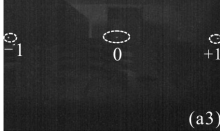
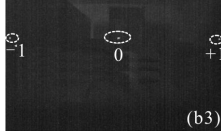
Wavelength λ/nm	Results of common blazed grating	Results of modified blazed grating
808		
850		
1 550		

图 5 实验对比结果

Fig.5 Comparison of experimental results

理论计算和实验结果都表明,改进后的闪耀光栅在闪耀波长附近的光,0 级和-1 级的衍射效率提高很大,这可有效克服在闪耀波长附近的光被漏报警的现象,进而提高二维激光告警系统的可靠性。

4 结论

分析了现有光栅衍射型激光告警中采用的正弦光栅和闪耀光栅存在的缺点,由于在接近闪耀波长的光进入传统闪耀光栅时,0 级和-1 级的衍射效率很低,容易被背景影响,导致的漏报警现象。文中提出一种改进型的闪耀光栅。将两闪耀光栅反相对接,并且中间留一定无光栅空间,这样可提高闪耀光栅波长在闪耀波长附近 0 级和-1 级的衍射效率,使能

量主要集中在+1级、0级和-1级衍射光斑中。改进的闪耀光栅将有效克服传统闪耀光栅的漏报警现象。设计加工了闪耀波长为 800 nm 的改进型闪耀光栅,理论分析了+1级、0级和-1级的衍射效率;采用波长为 808 nm 和 850 nm 的光对普通闪耀光栅和改进闪耀光栅进行实验对比测试,实验结果表明,在波长为闪耀波长附近光入射时,改进型闪耀光栅较普通闪耀光栅的 0 级和-1 级衍射强度有很大提高,能够被 CCD 有效探测。总之,改进型闪耀光栅可有效提高二维激光告警系统的可靠性。

参考文献:

- [1] Wang Zhibin, Zhang Jilong, Wu Feng. Analysis of signal light and skylight energy in grating-based laser warning system [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2006, 20(1): 92-94. (in Chinese)
王志斌, 张记龙, 吴峰. 光栅激光告警系统中信号光与天空光的能量分析[J]. 测试技术学报, 2006, 20(1): 92-94.
- [2] Zhang Jilong, Tian Erming, Wang Zhibin. Laser warning receiver based on sinusoidal transmission grating[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 326-330. (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): 326-330.
- [3] 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. (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.
- [4] Su Ping, Niu Yanxiong, Li Daqian, et al. Design and implementation of grating diffraction laser warning system based on DSP[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (3): 643-647. (in Chinese)
苏平, 牛燕雄, 李大乾, 等. 基于 DSP 的光栅衍射型激光告警系统设计与实现 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 643-647.
- [5] Zhang Chao, Niu Yanxiong, Su Ping, et al. Design and realization of staring laser detection and warning system based on sinusoidal grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(10): 1016001. (in Chinese)
张超, 牛燕雄, 苏平, 等. 基于正弦光栅的凝视型激光探测告警系统的设计与实现 [J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1016001.
- [6] Bolander G, Nissborg K. Laser warning device providing a direction of laser radiation: US, 5440116 [P]. 1995-08-08.
- [7] 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. (in Chinese)
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.
- [9] Wootton John R, Waldman Gary. Laser warning system and method: US, 001440A1[P]. 2003-10-31.
- [10] Gething M J. Jane's Electro-optic Systems [M]. London: Jane's Information Group Inc, 2005-2006.