

二维激光告警光学系统设计

李 晓^{1,2}, 张 瑞^{2,3}, 王志斌^{2,3}, 黄艳飞^{2,3}

- (1. 中北大学 计算机与控制工程学院, 山西 太原 030051;
2. 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;
3. 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)

摘要: 由于现有单激光告警系统只能实现来袭激光一维的方位和波长等信息, 提出了一种单激光告警系统同时测得二维方位信息和波长信息的新方法, 该方法的光学系统主要由遮光罩、光栅、透镜组和面阵 CCD 组成, 通过对来袭激光经过光栅后的一级和零级衍射光斑位置的判决, 得到来袭激光二维方位和波长信息。通过理论分析说明了该方法的原理, 并推导得出二维方位角和波长的测量公式, 根据要求推导确定了光学元件参数, 并通过实验验证了其可行性。实验结果显示波长分辨率小于 10 nm, 角度分辨率小于 1°, x 方向视场角为 30°, y 方向视场角为 15°。

关键词: 二维激光告警; 光栅衍射; 激光波长; 二维方位角; 光学设计

中图分类号: TN247; TJ95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1806-05

Design of two-dimensional laser warning optical system

Li Xiao^{1,2}, Zhang Rui^{2,3}, Wang Zhibin^{2,3}, Huang Yanfei^{2,3}

- (1. School of Computer Science and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Engineering and Technology Research Center of Shanxi Provincial for Optical-Electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. Key Lab of Instrument Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: As an existing single laser warning system can only achieve a one-dimensional azimuth and wavelength information of the incoming laser light. A new method of single-laser warning system was proposed which can simultaneously measure two-dimensional azimuth and the wavelength information of the incoming laser light. The optical system consists of shade, grating, lens group and CCD array. Two-dimensional azimuth and wavelength information of the incoming laser light was measured by measuring the position of the zero-order and first-order diffraction. The basic principle was introduced, the equations of two-dimensional azimuth and wavelength measurement formula was derived. Depending on the project requirements, optical component parameters were deduced. The feasibility was verified through experiment. The experimental results show that the laser warning device can realize measurements of the incoming laser light, azimuth resolution no more than 1°, x direction field of view of 30°, y direction field of view of 15°.

Key words: two-dimensional laser warning; grating diffraction; laser wavelength; two-dimensional azimuth; optical design

收稿日期: 2014-10-05; 修订日期: 2014-11-03

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项基金(61127015); 国际科技合作项目(2012DFA10680)

作者简介: 李晓(1972-), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学信息检测方面的研究。Email: lixiaoydx@163.com

通讯作者: 张瑞(1987-), 男, 博士, 主要从事光电技术方面的研究。Email: ruizhanghy@163.com

0 引 言

随着与激光相关武器成功研制和应用于军事,如激光眩目器、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,激光告警技术已经得到各国高度重视,也是光电对抗领域的一项重要技术^[1-5]。激光告警接收机用来探测敌方来袭激光信息(比如激光波长、入射方向等信息)^[6-10],相干探测型激光告警接收机是其中抗干扰能力较强的一类,根据相干元件的不同可分为:F-P型、Michelson型、Fizeau型、光栅衍射型、傅里叶变换光谱型等,各种激光告警机都存在优缺点^[3-10]。文中以光栅为相干元件,设计了二维激光告警机光学系统,确定了光学元件的参数。由于其采用面阵探测器,不需要光机扫描,就可以同时探测二维激光的方向角度和波长。

1 基于光栅衍射的激光波长和二维方向探测原理

被测激光的方位如图1所示,被测激光为OB,OB₁为OB在xOz面的投影,且与z轴的夹角为α;OB₂为OB在yOz面的投影,且与z轴的夹角为γ。测量激光的入射方向也就是测量α角和γ角。

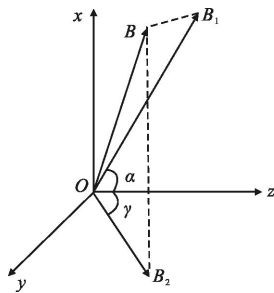


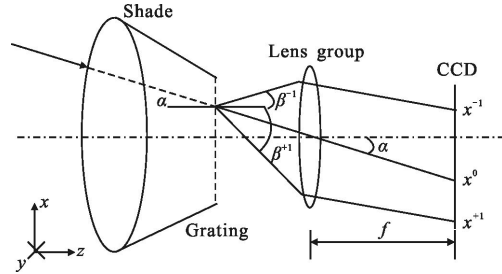
图1 被测激光方位角

Fig.1 Measured laser azimuth

光栅衍射型激光波长和二维方位探测系统如图2所示,主要由遮光罩、光栅、透镜组和 CCD 面阵探测器组成,CCD 置于焦平面处。在xOz面投影如图2(a)所示,在yOz面投影如图2(b)所示。

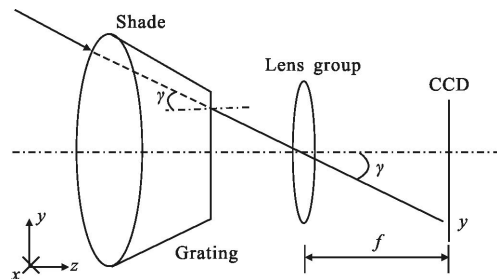
激光入射经过光栅衍射后由透镜汇聚后,形成干涉条纹,成像于光接收器 CCD 面阵探测器上。在x方向,零级光谱位置为x⁰,正一级光谱位置为x⁺¹,负一级光谱位置为x⁻¹,如图2(a)所示;在y方向,入

射光衍射后在探测器位置为y,如图2(b)所示。其中光栅常数为d,透镜组的焦距为f,该电信号被高速信号处理电路处理后,给出波长、方向等信息。



(a) 光栅衍射后在x方向探测示意图

(a) x direction detection schematic after grating diffraction



(b) 光栅衍射后在y方向探测示意图

(b) y direction detection schematic after grating diffraction

图2 基于光栅衍射的激光探测原理图

Fig.2 Schematic of laser detection based on grating diffraction

正弦透射光栅的复振幅透射率为:

$$T(x)=T_0+T_1\cos(2\pi x/d+\varphi) \tag{1}$$

如图2(a)所示,当波长为λ的激光以α角入射时,入射光光波表示为:

$$U(\lambda, X)=Ae^{(j2\pi x \frac{\sin\alpha}{\lambda})} \tag{2}$$

因此透射光栅后的波前为:

$$U_1(\lambda, x)=U(\lambda, x)T(x)=T_0U(\lambda, x)+\frac{1}{2}T_1A$$

$$\{e^{[j2\pi x(\frac{\sin\alpha}{\lambda} + \frac{1}{d} + \varphi)]} + e^{[j2\pi x(\frac{\sin\alpha}{\lambda} - \frac{1}{d} - \varphi)]}\} = U^0(\lambda, x) + U^+1(\lambda, x) + U^-1(\lambda, x) \tag{3}$$

其中:

$$U^0(\lambda, x)=U(\lambda, x)T_0=AT_0e^{(j2\pi x \frac{\sin\alpha}{\lambda})} \tag{4}$$

$$U^+1(\lambda, x)=\frac{1}{2}T_1Ae^{[j2\pi x(\frac{\sin\alpha}{\lambda} + \frac{1}{d} + \varphi)]} \tag{5}$$

$$U^-1(\lambda, x)=\frac{1}{2}T_1Ae^{[j2\pi x(\frac{\sin\alpha}{\lambda} - \frac{1}{d} - \varphi)]} \tag{6}$$

由此可见,正弦透射光栅输出的三列平面波中, $U^0(\lambda, x)$ 是沿原方向的零级波, $U^{+1}(\lambda, x)$ 和 $U^{-1}(\lambda, x)$ 是一定共轭波。由上述和图 2(a)可知,零级衍射角等于入射角 α ;正负一级衍射角度 β^{+1} 、 β^{-1} ,满足:

$$\text{正一级为: } \sin\beta^{+1} = \sin\alpha + \frac{\lambda}{d} \quad (7)$$

$$\text{负一级为: } \sin\beta^{-1} = \sin\alpha - \frac{\lambda}{d} \quad (8)$$

面阵探测器将在焦距为 f 的透镜组焦面形成的干涉条纹转换为电信号,其零级、正、负一级条纹的位置如下:

$$\begin{cases} x^0 = f \tan\alpha \\ x^{+1} = f \tan\beta^{+1} \\ x^{-1} = f \tan\beta^{-1} \\ y = f \tan\gamma \end{cases} \quad (9)$$

由公式(7)、(8)和(9)可以确定一级衍射角 β^{+1} 、 β^{-1} 以及 α 角、 γ 角和波长 λ ,结果如下:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(\frac{x_0}{f}\right) \\ \gamma = \arctan\left(\frac{y}{f}\right) \\ \lambda = d \left[\sin\left[\arctan\left(\frac{x_0}{f}\right)\right] + \sin\left[\arctan\left(\frac{x_1}{f}\right)\right] \right] \end{cases} \quad (10)$$

可见,正弦光栅没有高级衍射,这不仅简化激光方向和波长的辨别,而且由于能量集中在零级、正负一级上,有利于提高光学系统的信噪比。

2 光学系统参数的选择

根据课题激光告警性能可测得入射激光波长和二维方向角 α 角、 γ 角;适用波长范围为 800~1500 nm;波长分辨率 ≤ 10 nm;视场角 α 角最大为 $\pm 30^\circ$, γ 角最大 $\pm 15^\circ$;角度分辨率 $\leq 1^\circ$ 。探测器选用的是面阵 CCD,该 CCD 有效探测面积为 $L \times H = 9.60 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm}$,每个光敏面单元为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ (即 CCD 分辨力为一个光敏单元的宽度 $30 \mu\text{m}$)。

要满足波长分辨率 10 nm,就必须要求在被测激光垂直入射时(此时波长分辨率最差),测量波段 800~1500 nm 之间都有 10 nm 的分辨率。设波长为 800 nm 的激光用 λ_1 表示,对应 CCD 上正负一级光谱在 x 方向的位置为 x_1^{+1} 、 x_1^{-1} ;波长为 1500 nm 的激光用 λ_2 表示,对应 CCD 上正负一级光谱在 x 方向的位置为 x_2^{+1} 、 x_2^{-1} 。因此由公式(7)、(8)和(9)可得激光

垂直入射时需满足:

$$\begin{cases} x_2^{+1} - x_1^{+1} \geq 30 \mu\text{m} \times \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{10 \text{ nm}} \\ x_1^{+1} = f \tan\beta_1^{+1}, \sin\beta_1^{+1} = \frac{\lambda_1}{d} \\ x_2^{+1} = f \tan\beta_2^{+1}, \sin\beta_2^{+1} = \frac{\lambda_2}{d} \end{cases} \quad (11)$$

要满足 α 角的角分辨率为 1° ,如图 2(a)所示,就必须要求在被测激光入射角小时, α 角能有 1° 角分辨率,即入射角 α 为 0° 、 1° 时在 CCD 上分辨出来,由公式(10)可知, α 角度的测量主要是由零级的位置得到。设激光入射角 α 为 0° 时,在 CCD 的 x 方向的位置为 x_1^0 ; α 为 1° 时,在 CCD 的 x 方向的位置为 x_2^0 。由公式(9)和 CCD 的光敏单元宽度得:

$$\begin{cases} x_2^0 - x_1^0 \geq 30 \mu\text{m} \\ x_1^0 = f \tan 0^\circ \\ x_2^0 = f \tan 1^\circ \end{cases} \quad (12)$$

同理,要满足 γ 角的角分辨率为 1° ,如图 2(b)所示,就必须要求在被测激光入射角小时, γ 角能有 1° 角分辨率,即入射角 γ 为 0° 、 1° 时在 CCD 上分辨出来,由公式(10)可知, γ 角度的测量主要是由零级或一级在 CCD 上 y 方向的位置得到,与在 x 方向的位置无关。设激光入射角 γ 为 0° 时,零级或一级在 CCD 的 y 方向的位置为 y_1 ; γ 为 1° 时,零级或一级在 CCD 的 y 方向的位置为 y_2 。由公式(9)和 CCD 的光敏单元宽度得:

$$\begin{cases} y_2 - y_1 \geq 30 \mu\text{m} \\ y_1 = f \tan 0^\circ \\ y_2 = f \tan 1^\circ \end{cases} \quad (13)$$

受 CCD 探测面 $L \times H = 9.6 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm}$ 的限制,要满足波长范围:800~1500 nm 和视场角 α 角最大 $\pm 30^\circ$ 及 γ 角最大 $\pm 60^\circ$ 的测量,就必须要求在零级和一级(正一级与负一级至少有一个)光谱位置都在 CCD 上,由此可知,只要满足以下上条件即可保证 CCD 的探测面满足测量要求。

(1) 由光栅方程式(7)、(8)和(9)可知,当被测激光入射角 α 为 0° 时,波长最长的激光的一级衍射在 CCD 的 x 方向最大,如图 3(a)所示。要满足课题要求,就必须使 $\lambda_2 = 1500 \text{ nm}$ 激光, $\alpha = 0^\circ$ 时一级衍射最大的位置 x_{max}^{+1} 和 x_{max}^{-1} 就在 CCD 探测面内。由公式(7)

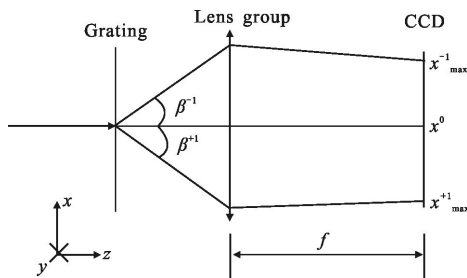
~(9)可得:

$$\begin{cases} |x_{\max}^{+1}| = |x_{\max}^{-1}| = |f \tan \beta^{+1}| \leq \frac{L}{2} \\ \sin \beta^{+1} = \frac{\lambda_2}{d} \end{cases} \quad (14)$$

(2) 根据公式(9)和课题要求,当被测激光入射角 α 最大时(即 $\alpha_{\max} = \pm 30^\circ$),零级衍射在 CCD 的 x 方向最大,且必须在探测面内,如图 3(b)所示。由公式(9)可得:

$$|x_{\max}^0| = |f \tan \alpha_{\max}| \leq \frac{L}{2} \quad (15)$$

(3) 上面的(1)和(2)是由探测器 x 方向(即 CCD 的长 L)得到的约束条件,CCD 的宽 H 主要对入射角 γ 角有约束,由公式(9)可知,当被测激光入射角 γ 最大时(即 $\gamma_{\max} = \pm 15^\circ$),零级或一级衍射在 CCD 的 y 方向最大,且必须在探测面内,如图 3(c)所示。



(a) 光栅衍射后在 x 方向探测示意图

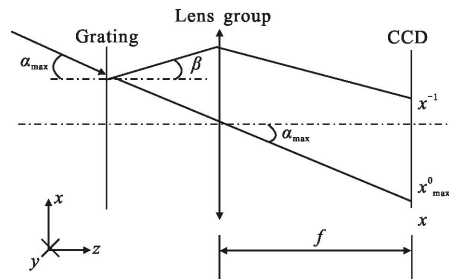
(a) x direction detection schematic after grating diffraction

$$\begin{cases} f \left[\tan \left[\arcsin \left(\frac{1500 \text{ nm}}{d} \right) \right] - \tan \left[\arcsin \left(\frac{800 \text{ nm}}{d} \right) \right] \right] \geq 30 \mu\text{m} \times \frac{1500 \text{ nm} - 800 \text{ nm}}{10 \text{ nm}} \\ f [\tan(1^\circ) - \tan(0^\circ)] \geq 30 \mu\text{m} \\ f \tan \left[\arcsin \left(\frac{1500 \text{ nm}}{d} \right) \right] \leq \frac{9.6 \text{ mm}}{2} \\ f \tan(30^\circ) \leq \frac{9.6 \text{ mm}}{2} \\ f \tan(15^\circ) \leq \frac{7.68 \text{ mm}}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1.7187 \text{ mm} \leq f \leq 8.3138 \text{ mm} \\ f \tan \left[\arcsin \left(\frac{800 \text{ nm}}{d} \right) \right] \leq 2.7 \text{ mm} \end{cases} \quad (18)$$

上述只是针对课题的要求设计光学参数,实际应用中可根据需要设计各光学元件参数,具体参数推导与上述推导类似。

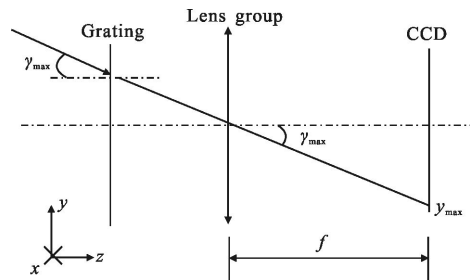
3 实验

实验采用波长 $\lambda = 780 \text{ nm}$ 和 850 nm , 光栅常数 $d = 1/400 \text{ mm}$, 透镜组焦距 $f = 7.5 \text{ mm}$, CCD 有效探测



(b) 光栅衍射后在 y 方向探测示意图

(b) y direction detection schematic after grating diffraction



(c) 光栅衍射后在 y 方向探测示意图

(c) y direction detection schematic after grating diffraction

图 3 基于光栅衍射的激光探测原理图

Fig.3 Schematic of laser detection based on grating diffraction

由公式(9)可得:

$$|y_{\max}| = |f \tan \gamma_{\max}| \leq \frac{H}{2} \quad (16)$$

由约束条件(11)~(16)式可求出光栅常数和透镜组焦距需满足:

面积为 $L \times H = 9.60 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm}$, 每个光敏面单元为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 。实验装置如图 4 所示。



图 4 实验装置

Fig.4 Experimental rig

实验结果表 1 所示,其中 α 和 γ 为入射角度, α' 和 γ' 为测得的角度, λ 为入射激光波长, λ' 为测得的波长。由测试结果可以看出,波长分辨率 ≤ 10 nm, 角度分辨率 $\leq 1^\circ$, 满足项目的要求。

表 1 实验数据

Tab.1 Experimental data

λ/nm	780								850							
$\alpha/(\circ)$	0	0	0	0	-1	1	30	-30	0	0	0	0	-1	1	30	-30
$\gamma/(\circ)$	-1	0	1	15	0	0	0	-15	-1	0	1	15	0	0	0	-15
λ'/nm	781	783	779	781	780	781	778	780	851	853	849	852	850	853	851	847
$\alpha'/(\circ)$	0	0	0.5	0	-1	1	30.4	-30	0	0	0	0.2	-1	1	30	-30
$\gamma'/(\circ)$	-1.5	0	1	15.5	0	0.5	0	-15	-1.7	0.2	1	15	0.4	0.1	0.8	-15

4 结 论

由于现有单激光告警系统只能实现来袭激光一维的方向和波长等信息,提出一种单激光告警系统同时测得二维方向信息和波长信息的新方法,该方法的光学系统主要由遮光罩、光栅、透镜组和面阵 CCD 组成,通过对来袭激光经过光栅后的一级和零级衍射光斑位置的判决,得到来袭激光二维方向和波长信息。通过理论分析说明了该方法的原理,并推导得出二维方位角和波长的测量公式,根据要求推导确定了光学元件参数,并通过 780 nm 和 850 nm 激光实验验证其可行性。

参考文献:

- [1] Tuttle R. Large aircraft infrared countermeasures system[J]. *Aerospace Daily & Defense Report*, 2004, 210(7): 6-7.
- [2] 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.
- [3] Zhang Jin. Status and evaluation of foreign laser warning systems[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(4): 307-314. (in Chinese)
张锦. 国外激光威胁告警器发展现状及评价[J]. *激光与红外*, 2008, 38(4): 307-314.
- [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及实现[J]. *红外与激光工程*, 2013(3), 42: 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, Goran (Linkoping, SE), Nissborg, et al. Laser warning device providing a direction of laser radiation: US, 5440116[P]. 1995-08-08.
- [7] Li Bing, Zhao Yuejin, Chu Xuhong, et al. Method for measuring laser incident direction based on cylindrical lens with non-imaging mode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 611-615. (in Chinese)
李冰,赵跃进,褚旭红,等.基于柱透镜的非成像式激光定向方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 611-615.
- [8] Froggatt M E, Childers B A. High precision wavelength monitor for tunable laser systems: US, 426496[P]. 2002-07-30.
- [9] Wootton, John R, Waldman, et al. Laser warning system and method: US, 001440A1[P]. 2003-10-31.
- [10] Michael J Gething. *Electro-optic Systems*[M]. London: Jane's Information Group Inc, 2005-2006.