

基于光栅衍射的广角凝视型激光告警技术研究

王 龙 王永仲 沈学举 何永强

(军械工程学院, 河北 石家庄 050003)

摘要 为了在大视场范围内同时探测来袭激光的方向和波长,设计了一种基于光栅衍射的广角凝视型激光告警系统,推导了入射激光方向和波长的解析表达式,分析了系统的成像特性。以 1064 nm 脉冲激光为例,实验测试了系统对入射激光方向和波长的探测性能。结果表明,该告警系统将入射激光成像为等间隔的三个亮斑,根据中央亮斑中心坐标和相邻亮斑间距可确定入射激光的方向和波长。随激光入射角度增大,鱼眼镜头的像差使告警系统的成像光斑变大、变模糊且形状由圆形畸变为锥形;该系统的半视场角为 35° ,激光方向和波长的最大探测误差分别为 1.5° 和 60 nm。

关键词 光学设计;激光告警;鱼镜头;光栅衍射

中图分类号 TN247; TN977 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0312005

Study of Wide-Angle Staring Laser Threat Detection System Based on Grating Diffraction

Wang Long Wang Yongzhong Shen Xueju He Yongqiang

(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

Abstract In order to detect both direction and wavelength of attacking incident laser beam, a wide-angle staring laser threat detection system based on grating diffraction is designed, analytic expressions of laser direction and wavelength are deduced, and imaging rule of the system is analyzed. The detecting ability of the system is put to test by utilizing 1064 nm pulse laser. Results show that incident laser beam is imaged to three equal-interval bright spots by this detection system, and the direction and wavelength of incident laser can be calculated based on the coordinate of middle spot and the interval of two adjacent spots. Optical aberration of fish-eye lens makes the system's imaging spots larger, more blurred and distort to cone with increase of incident angle of the laser beam. Half angle of vision of the designed system is 35° , and both direction and wavelength of incident laser beam can be detected effectively with the maximum detection errors of 1.5° and 60 nm, respectively.

Key words optical design; laser threat detection; fish-eye lens; grating diffraction

OCIS codes 120.1880; 120.4570; 220.4830

1 引 言

研究激光告警技术的目的是在大视场范围内,尽可能准确地确定入射激光的方向和波长等信息^[1~3]。普通凝视型激光告警系统主要由鱼镜头和 CCD/CMOS 阵列探测器件构成^[4~6],根据鱼镜头对入射激光所成像光斑的位置解算入射激光方向^[7~10],其突出的优点是鱼镜头保证了系统无需机械扫描就具有大视场,但无法确定入射激光波长。

对于光栅衍射型激光告警系统,入射激光在探测器上形成衍射条纹,由条纹的中心坐标和条纹间隔同时确定入射激光的方向和波长^[11],且定向精度和波长分辨率都很高但视场较小。

为了在大视场范围内同时探测入射激光的方向和波长,通过引入变换透镜将鱼镜头和光栅衍射型激光告警系统相结合,设计了一种基于光栅衍射的广角凝视型激光告警系统,分析了告警系统的成

收稿日期: 2012-10-19; **收到修改稿日期**: 2012-11-16

作者简介: 王 龙(1985—),男,博士研究生,主要从事激光告警技术方面的研究。E-mail: wanglong4800533@163.com

导师简介: 王永仲(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事光电对抗及激光防护方面的研究。

像特性,实验测试了系统对激光入射方向和波长的探测性能。

2 理论模型

2.1 基于光栅衍射的广角凝视型激光告警系统结构

基于光栅衍射的广角凝视型激光告警系统的结构如图 1 所示, F_1 为鱼镜头,其大视场保证了告警系统可对较大空域进行有效的凝视探测, F_1 后焦面 P 与变换透镜 F_2 的前焦面重合。为简化入射激光方向和波长的提取算法,选用只有 0 级和 ± 1 级衍射条纹的正弦光栅 G ,光栅 G 紧贴衍射透镜 F_3 前表面放置,面阵探测器 D 位于透镜 F_3 的后焦面上接收光栅的衍射图样。

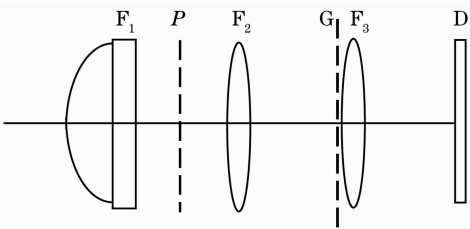


图 1 基于光栅衍射的广角凝视型激光告警系统结构图

Fig. 1 Structure of wide-angle staring laser

threat detection system based on grating diffraction

2.2 工作原理分析

告警系统各元件间的位置关系如图 2 所示,光轴沿 z 轴方向,各元件中心分别位于相应坐标平面的原点上。来袭激光经远距离传输后,入射光束完全覆盖鱼镜头,若入射激光与光轴夹角为 ω ,子午面与 x_1O_1z 平面夹角为 θ ,则入射激光束被鱼镜头 F_1 聚焦后,以张角 α 会聚为后焦面 $x_2O_2y_2$ 上一点 $M(x_m, y_m)$,张角 α 由鱼镜头入瞳口径和后焦距决定,成像规律满足^[8]

$$\begin{cases} |O_2M| = f_1F(\omega) \\ x_m = -|O_2M| \cos \theta \\ y_m = -|O_2M| \sin \theta \end{cases}, \quad (1)$$

式中 f_1 为鱼镜头焦距, $|O_2M|$ 为激光束在鱼镜头后焦面的像高,其值为镜头焦距与激光入射角 ω 的函数 $F(\omega)$ 的乘积。因 P 为变换透镜 F_2 的前焦面,经 F_2 的出射光变为平行光束射向振幅型正弦透射光栅,其方向余弦 $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$ 可表示为

$$\begin{cases} \cos \alpha = -x_m / \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + f_2^2} \\ \cos \beta = -y_m / \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + f_2^2} \\ \cos \gamma = f_2 / \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + f_2^2} \end{cases}. \quad (2)$$

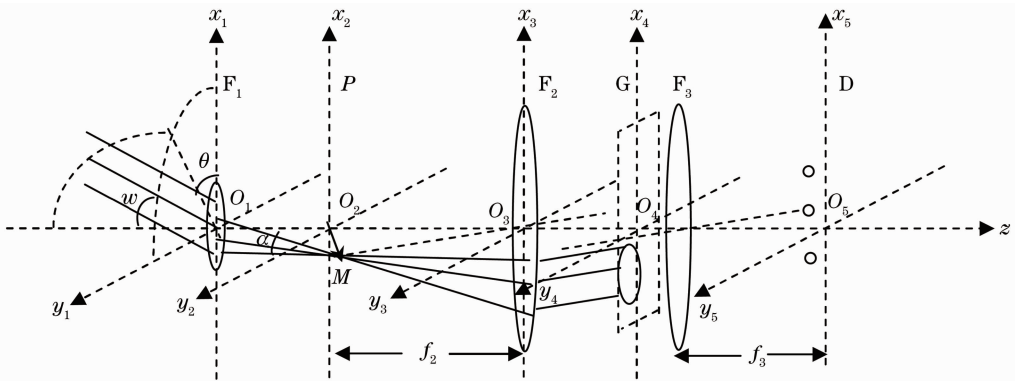


图 2 基于光栅衍射的广角凝视型激光告警系统工作原理示意图

Fig. 2 Mechanism of wide-angle staring laser threat detection system based on grating diffraction

考虑光栅表面上入射激光束的口径和位置,光栅 G 的入射光场复振幅可近似表示为

$$u(x_4, y_4) = \exp[ik(x_4 \cos \alpha + y_4 \cos \beta)] \text{circ} \sqrt{[(x_4 - x_{40})^2 + (y_4 - y_{40})^2]}/r^2}, \quad (3)$$

式中 (x_{40}, y_{40}) 为光栅入射面上激光斑的中心坐标, r 为光斑半径。

周期常数为 d 的一维正弦透射光栅 G 与衍射透镜 F_3 紧贴在一起,复振幅透射系数可表示为^[2,11]

$$t(x_4, y_4) = \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(2\pi \frac{x_4}{d} \right) \right] \exp \left[-\frac{ik}{2f_3} (x_4^2 + y_4^2) \right]. \quad (4)$$

探测器接收平面 $x_5O_5y_5$ 上的光场复振幅为^[12]

$$u(x_5, y_5) = \frac{\exp(ikf_3)}{i\lambda f_3} \iint \exp \left\{ \frac{ik}{2f_3} [(x_5 - x_4)^2 + (y_5 - y_4)^2] \right\} u(x_4, y_4) t(x_4, y_4) dx_4 dy_4. \quad (5)$$

将(3)、(4)式代入(5)式,并综合运用傅里叶变换的相似性定理和位移定理,可求得^[12,13]

$$u(x_5, y_5) = \frac{\exp(ikf_3)}{i\lambda f_3} \exp\left[\frac{ik(x_5^2 + y_5^2)}{2f_3}\right] \exp[i2\pi(x_{40}f_x + y_{40}f_y)] \times \left[\frac{r}{2} \frac{J_1(2\pi r \sqrt{u_0^2 + v_0^2})}{\sqrt{u_0^2 + v_0^2}} + \frac{r}{4} \frac{J_1(2\pi r \sqrt{u_{+1}^2 + v_{+1}^2})}{\sqrt{u_{+1}^2 + v_{+1}^2}} + \frac{r}{4} \frac{J_1(2\pi r \sqrt{u_{-1}^2 + v_{-1}^2})}{\sqrt{u_{-1}^2 + v_{-1}^2}} \right], \quad (6)$$

式中 J_1 是一阶第一类贝塞尔函数,且有:

$$\begin{cases} f_x = \frac{x_5}{\lambda f_3}, & f_y = \frac{y_5}{\lambda f_3} \\ u_0 = f_x - \frac{1}{\lambda} \cos \alpha \\ u_{+1} = f_x - \frac{1}{\lambda} \cos \alpha - 1/d \\ u_{-1} = f_x - \frac{1}{\lambda} \cos \alpha + 1/d \\ v_0 = v_{+1} = v_{-1} = f_y - \cos(\beta/\lambda) \end{cases} \quad (7)$$

若光栅前表面上入射激光束的光斑半径 r 比光栅的周期常数 d 大很多,则三个贝塞尔函数之间不存在交叠^[14],探测器接收平面上的光强分布为

$$I(x_5, y_5) = \frac{r^2}{\lambda^2 f_3^2} \left\{ \frac{1}{4} \left[\frac{J_1(2\pi r \sqrt{u_0^2 + v_0^2})}{\sqrt{u_0^2 + v_0^2}} \right]^2 + \frac{1}{16} \left[\frac{J_1(2\pi r \sqrt{u_{+1}^2 + v_{+1}^2})}{\sqrt{u_{+1}^2 + v_{+1}^2}} \right]^2 + \frac{1}{16} \left[\frac{J_1(2\pi r \sqrt{u_{-1}^2 + v_{-1}^2})}{\sqrt{u_{-1}^2 + v_{-1}^2}} \right]^2 \right\}. \quad (8)$$

由(7)式可求得探测器接收平面上 0 级和 ±1 级衍射亮斑的坐标分别为

$$\begin{cases} x_0 = f_3 \cos \alpha \\ x_{+1} = f_3 \cos \alpha + \lambda f_3 / d \\ x_{-1} = f_3 \cos \alpha - \lambda f_3 / d \\ y_0 = y_{+1} = y_{-1} = f_3 \cos \beta \end{cases} \quad (9)$$

(8)、(9)式表明,告警系统将入射激光成像为等间距的三个艾里斑,0 级亮斑强度是 ±1 级亮斑强度的 4 倍,0 级亮斑坐标和相邻亮斑间距分别由入射激光方向和波长决定。由(9)式求得入射激光波长为

$$\lambda = d(x_0 - x_{-1})/f_3 \text{ 或 } \lambda = d(x_{+1} - x_0)/f_3. \quad (10)$$

联立(1)、(2)、(9)式求得激光入射方向为

$$\begin{cases} \theta = \arctan\left(\frac{y_0}{x_0}\right) \\ \omega = F^{-1} \left[\frac{f_2}{f_1} \sqrt{\frac{(x_0^2 + y_0^2)}{(f_3^2 - x_0^2 - y_0^2)}} \right] \end{cases}, \quad (11)$$

式中 F^{-1} 表示求反函数。

3 实验验证

3.1 实验装置

实验装置如图 3 所示, A 为可调衰减器, S_1 , S 为光阑, L_1, L_2 为透镜。基于光栅衍射的广角凝视型激光告警系统按照 2.1 节论述的相对位置关系固

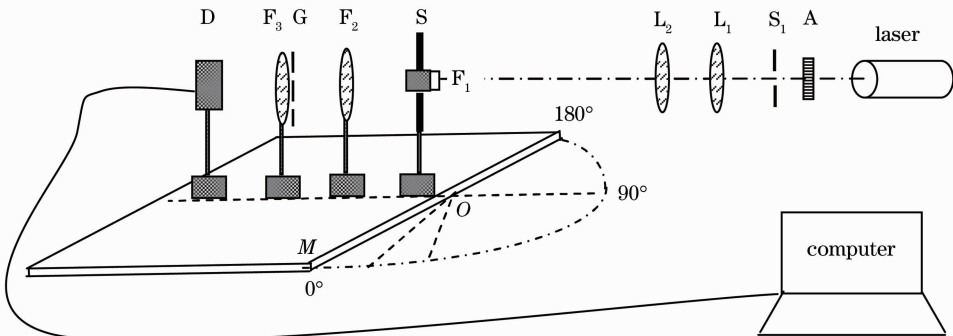


图 3 激光告警系统性能测试实验装置示意图

Fig. 3 Experimental setup used to ability test of this laser threat detection system

定于 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 的薄平板上,鱼镜头前表面中心对正平板前边沿中点 O 。以 O 为圆心、 20 cm 为半径作半圆,以 1° 圆心角为步长将半圆区域 180 等分并在圆周上标记相应角度值。固定激光入射方向,保持平板前沿中点 O 位置不变,逆时针旋转平板使其前边沿端点 M 以 1° 为步长依次到达圆周上各标记位置,以此模拟告警系统工作时激光入射角度的改变过程。其中某型短波红外鱼镜头 F_1 焦距为 2.4 mm ,相对孔径为 $1/2$ ^[15],光栅 G 周期常数为 $d=1/16\text{ mm}$;变换透镜 F_2 和衍射透镜 F_3 焦距分别为 50 mm 和 38.1 mm 。探测器 D 为 MINTRON 公司生产的 MTV-1881EX 型 CCD 探测器,其与北京嘉恒中自图像技术有限公司生产的 OK 系列 C20A 卡以及计算机组成图像采集系统,双向剪切干涉法测得其所采集图像的像素间距为 $7.98\text{ }\mu\text{m} \times 7.99\text{ }\mu\text{m}$ ^[16]。光源是 Beamtech Optonics 公司生产的 SGR-10 型 Nd:YAG 激光器,实验使用 1064 nm 激光,脉宽为 8 ns ,能量不稳定性小于 5% ,经 S_1 滤光和 A 适当衰减并被透镜 L_1 和 L_2 组成的系统扩束准直后能量密度约为 $2.41\text{ }\mu\text{J}/\text{cm}^2$,激光束完全覆盖鱼镜头,尺寸为 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 的自制光阑 S 除固定鱼镜头外主要用于消除杂散光的干扰。考虑到鱼镜头的

成像具有旋转对称性,实验以水平方向为例进行测试,即在 $\theta=90^\circ$ 情况下,改变入射激光与光轴的夹角 ω 测试告警系统的成像特性以及其对入射激光方向和波长的解算能力。

3.2 告警系统的成像特性分析

告警系统对入射激光的方向和波长解算受系统成像光斑精确定位的影响很大,首先对告警系统的成像特性进行分析。

$0^\circ \sim 35^\circ$ 范围内激光从三个不同方向入射时告警系统的成像光斑如图 4(a)~(c) 所示,可以看出告警系统将入射激光成像为等间隔的三个光斑,中间光斑亮度比两侧光斑亮度强,这与由(8)式和(9)式得出的结论基本一致,激光入射角度增大,成像光斑变大、变模糊,这是由鱼镜头的大像差导致成像面随入射激光角度的增大而发生微小偏移引起的^[8]。为分析告警系统成像光斑形状随激光入射角度的变化情况,提取出图 4(a)~(c) 各自中央亮斑区域 $60\text{ pixel} \times 60\text{ pixel}$ 范围灰度分布分别如图 4(d)~(f) 所示,可以看出近轴激光入射时成像光斑近似为圆形亮斑;入射角度增大时系统所成像由衍射亮环和形状发生畸变的中央亮斑组成。

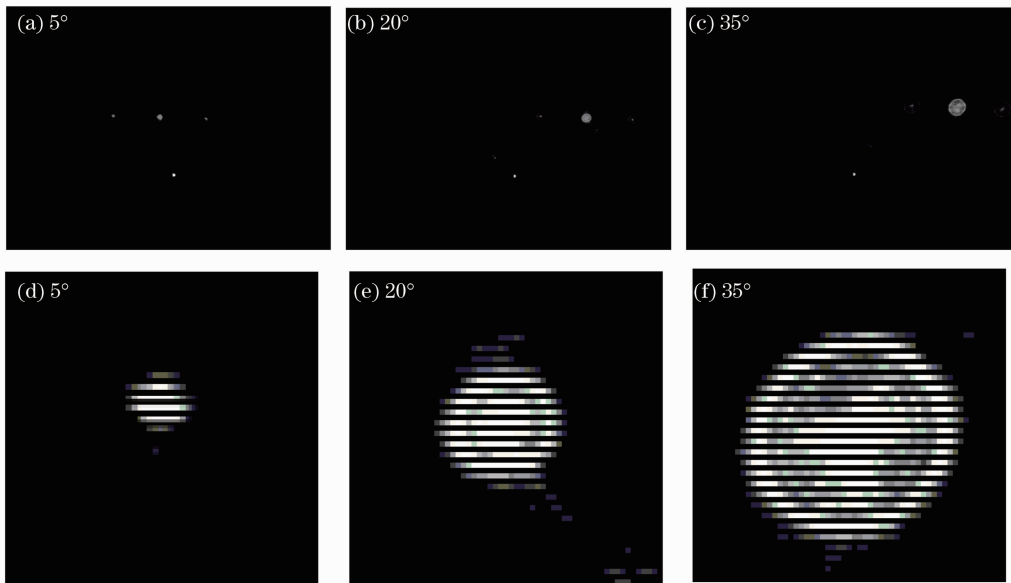


图 4 告警系统对不同方向入射激光的成像光斑

Fig. 4 Imaging spots of incident laser with different directions by threat detection system

告警系统的成像特性由鱼镜头的成像规律与变换透镜 F_2 通光孔径和其表面入射光束的相对关系共同决定。图 5 是使用光学设计软件 Zemax 建立某视场角为 170° 的鱼镜头模型^[8],模拟不同方向激光入射时的成像光斑。 5° 方向激光入射时鱼镜头成

像为规则的圆形光斑如图 5(a) 所示;激光入射角增大时,在彗差影响下主光线偏折到成像光斑的一边,光斑变为以主光线和像面交点为顶点的锥形光斑,如图 5(b)、(c) 所示。激光入射角度较小时,入射激光经鱼镜头会聚后完全通过变换透镜 F_2 ,告警系统成

像光斑的形状只由鱼眼镜头的成像特性决定,如图 4(d)、(e)和图 5(a)、(b)所示;激光入射角度增大到某一临界值后,经鱼眼镜头会聚所形成的激光束只能部分通过变换透镜 F_2 ,故告警系统的成像光斑仅为锥形光斑的一部分,如图 4(f)和图 5(c)所示。

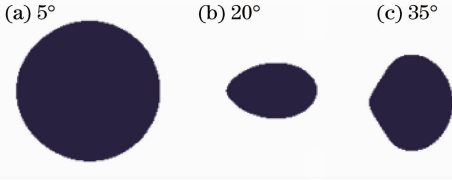


图 5 鱼眼镜头对不同方向入射激光的成像光斑

Fig. 5 Imaging spots of incident laser with different directions by the fish-eye lens

3.3 告警系统的探测性能分析

固定激光源,以 1° 为步长旋转告警系统改变激光入射方向,并采集系统的成像光斑。对激光光斑中心位置的计算方法较多^[17,18],如重心法、曲线拟合法和 Hough 变换法等,鉴于重心法计算简单,运算速度快,采用重心法计算所采集光斑的中心。设光斑横向和纵向的像素数分别为 m 和 n , $I(x_i, y_j)$

是点 (x_i, y_j) 处的灰度值,则光斑中心坐标 (x_c, y_c) 为^[19,20]

$$\begin{cases} x_c = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I(x_i, y_j) x_i}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I(x_i, y_j)} \\ y_c = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I(x_i, y_j) y_j}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I(x_i, y_j)} \end{cases} \quad (12)$$

告警系统旋转过程中,将(12)式求得的重心坐标代入(11)式和(10)式即可求得系统对激光入射方向和波长的探测值,结果如图 6(a)和 7(a)所示;将入射方向和波长的探测值与真实值做差,求得相应的误差曲线如图 6(b)和 7(b)所示。图 6 表明, $0^\circ \sim 35^\circ$ 范围内,告警系统能较好地探测激光的入射方向,最大探测误差小于 1.5° 。激光入射角度小于 30° 时,探测误差虽随机起伏但多为正值,说明存在一定的系统误差;激光入射角度大于 30° 后,探测误差变为负值且误差随激光入射角度的增大而变大,除实验过程中激光入射角度调节的误差外,很有可能是因为告警系统所成像畸变为锥形光斑丧失了对

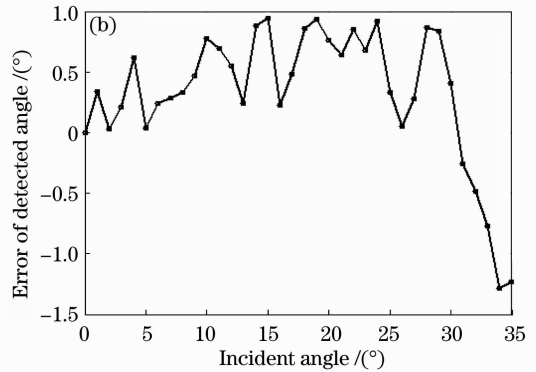
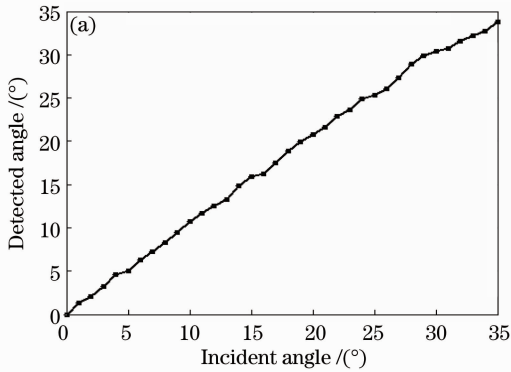


图 6 告警系统对不同方向入射激光的角度探测曲线

Fig. 6 Angle detecting curves of incident laser with different directions by threat detection system

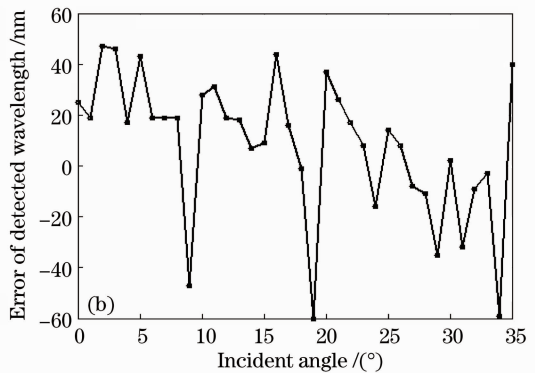
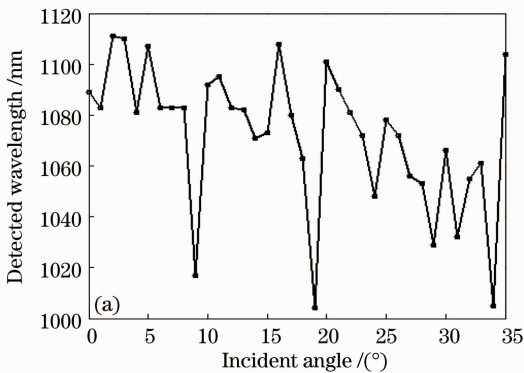


图 7 告警系统对不同方向入射激光的波长探测曲线

Fig. 7 Wavelength detecting curves of incident laser with different directions by threat detection system

称性,采用重心法计算光斑中心存在较大误差导致的。图7表明告警系统能较好地解算入射激光波长,最大误差为60 nm,除告警系统成像光斑定位误差外,正弦光栅的周期常数较大是导致入射激光波长探测误差较大的主要原因。

4 结 论

通过引入变换透镜将鱼镜头和光栅衍射型激光告警系统相结合,设计了一种基于光栅衍射的广角凝视型激光告警系统,理论分析了系统的工作原理并对告警系统的探测性能进行了实验测试。系统在半视场角 $0^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 范围内可有效地同时探测入射激光方向和波长,验证了该激光告警技术的可行性,后续工作将对变换透镜和衍射透镜以及光栅参数进行最优化设计以充分利用鱼镜头的大视场优势,同时从系统所成图像的畸变校正和光斑定位算法等方面提高系统对入射激光方向和波长的探测精度。

参 考 文 献

- 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
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
- Wang Ming, Zhang Jilong, Tian Erming *et al.*. Detectability analysis of laser warning receiver based on grating diffraction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4): 683~686
王明,张记龙,田二明等.光栅衍射激光告警接收机的探测性能分析[J].*红外与激光工程*, 2008, **37**(4): 683~686
- Sun Jianguo, Cong Junkui. Analyzing FOV errors in laser warning technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, **30**(4): 168~173
孙建国,从俊奎.激光告警技术中视场误差分析[J].*红外与激光工程*, 2001, **30**(4): 168~173
- Yang Zaifu, Qian Huanwen, Gao Guanghuang. Development of laser warning technology [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(1): 98~102
杨在富,钱焕文,高光煌.激光告警技术发展现状[J].*激光技术*, 2004, **28**(1): 98~102
- Zhang Jingxu. Warning and orienting technology for threaten laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(4): 365~368
张景旭.激光威胁源告警定向技术研究[J].*光学精密工程*, 2000, **8**(4): 365~368
- Bai Xiaoming, Li Gang, Yang Jun. A design of the imaging laser threat warning system [J]. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(4): 202~204
白晓明,李刚,杨军.成像型激光预警系统的设计[J].*激光与红外*, 2001, **31**(4): 202~204
- He Wuguang, Wu Jian, Wang Shifan. Design of laser detection and warning optical system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(7): 48~51
何武光,吴健,王仕璠.激光探测告警光学系统设计[J].*光电工程*, 2006, **33**(7): 48~51
- Wang Yongzhong. Fish-Eye Lens Optics. [M]. Beijing: Science Press, 2006. 30~40, 46, 55
王永仲.鱼镜头光学[M].北京:科学出版社,2006.30~40,46,55
- Chen Yongjun, Wu Xinyu, Gong Huixing. Study on laser warning technology with wideband [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(4): 346~350
陈拥军,吴新宇,龚惠兴.宽频带激光告警技术的研究[J].*红外与激光工程*, 2003, **32**(4): 346~350
- 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
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].*光电与控制*, 2009, **16**(12): 53~56
- Zhang Jilong, Tian Erming, Wang Zhibin. Laser warning receiver based on sinusoidal transmission grating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(3): 326~329
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
- Liang Quanting. Physical Optics [M]. 2nd ed., Beijing: China Machine Press, 1987. 168~178
梁铨廷.物理光学[M].第2版,北京:机械工业出版社,1987.168~178
- Chen Jiabi, Su Xianyu. Optical Information Technique—Principles & Applications [M]. Beijing: China Higher Education Press, 2002. 7
陈家璧,苏显渝.光学信息技术原理及应用[M].北京:高等教育出版社,2002.7
- Qin Kecheng, Liu Peisen, Chen Jiabi *et al.*. Introduction to Fourier Optics [M]. 3rd ed., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 73
秦克诚,刘培森,陈家璧等.傅里叶光学导论[M].第3版,北京:电子工业出版社,2006.73
- 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
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
- Luo Xinxin. Study on the Intelligent Method for Detecting and Adjusting the Parallelism of Laser-Range-Finder's Optic-Axes [D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2009. 29~35
骆新新.激光测距机光轴平行性智能检测校正方法研究[D].石家庄,军械工程学院,2009.29~35
- Yang Yaoquan, Shi Ren, Yu Xining *et al.*. An algorithm to raise the locating precision of laser spot center based on Hough transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(12): 1655~1660
杨耀权,施仁,于希宁等.用Hough变换提高激光光斑中心定位精度的算法[J].*光学学报*, 1999, **19**(12): 1655~1660
- Dong Hongjun, Zhou Zhongliang Wang Long. Subpixel location algorithm for laser spot in fish-eye imaging laser warning system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0917002
董红军,周中亮,王龙.鱼眼成像型激光告警系统光斑中心亚像元定位方法[J].*中国激光*, 2011, **38**(9): 0917002
- Zhang Laixian, Sun Huayan, Xu Jiawen. Measurement of laser atmosphere transmission spot floating based on virtual instrument [J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(3): 282~286
张来线,孙华燕,许嘉纹.基于虚拟仪器的激光大气传输光斑漂移测量[J].*激光与红外*, 2010, **40**(3): 282~286
- Cao Ying, Li Zhiyong, Du Kun. Numerical simulation and computation of degraded image by turbulent effect [J]. *Computer Simulation*, 2008, **25**(4): 186~189
曹瑛,李志永,杜坤.湍流效应退化图像的数值模拟和仿真计算[J].*计算机仿真*, 2008, **25**(4): 186~189