

文章编号: 1001-3806(2010)04-0557-04

基于漫反射探测的全向激光告警性能分析

陈玉丹¹, 何永强¹, 尚彩娟², 李丹³

(1. 军械工程学院 光学教研室, 石家庄 050003; 2. 装甲兵工程学院 科研部, 北京 100072; 3. 陆军指挥学院, 石家庄 050084)

摘要: 为了通过对基于漫反射探测的全向激光告警系统性能的分析, 进而达到对系统性能优化的目的, 采用理论推导和实验分析的方法, 讨论了普通鱼眼镜头的成像规律, 得出了系统所使用的鱼眼镜头的成像规律。推导了全向激光告警系统中探测器接收到的漫反射信号功率公式, 讨论了鱼眼系统像面照度均匀性, 分析了系统中 CCD 成像特性, 得出光斑成像像素个数的公式。采用针对不同成像像素数, 得出不同 CCD 成像面上单像素所探测到的光斑功率公式的方法。得到了不同传输距离时, 光斑成像的像素数与探测器距光斑距离 d 的关系图; 不同的能见度条件下探测器所探测到的单个像素功率与传输距离 R 的关系图; 以及在能见度和传输距离一定的条件下, 探测器单个像素功率随距离 d 的变化图。研究结果对于基于漫反射探测的全向激光告警系统设计和研制, 优化系统性能具有重要帮助。

关键词: 激光技术; 全向激光告警; 成像特性; 漫反射; 探测功率

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.033

Study on capability of omni-direction laser warning systems based on diffusive reflection detection

CHEN Yu-dan¹, HE Yong-qiang¹, SHANG Cai-juan², LI Dan³

(1. Department of Optics & Electrical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Department of Science Research, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China; 3. Army Commander College, Shijiazhuang 050084, China)

Abstract: In order to optimize an omni-direction laser warning system based on diffusive reflection detection, using the method of theoretical derivation and experiment analyzing, the imaging rule of a fish-eye lens was deduced and discussed by means of theoretical derivation and experiment. The power function of the receiving signal was deduced. The illumination uniformity of the image-plane and imaging characteristics of CCD were discussed. The formula of the number of imaging elements was deduced. For different imaging elements, the power formula of one imaging element was put forward. The graphs of relation between the number of imaging elements and the distance d between the detector and the facula was provided. At different visible range, the graphs of power of one imaging element related with the transmission distance R and with distance d were shown. The obtained results offer performance guidance for design, development and optimization of an omni-direction laser warning system based on diffusive reflection detection.

Key words: laser technique; omni-direction laser warning; image characteristic; diffusive reflection; detection power

引言

随着大功率激光武器的不断出现, 在军事上应用广泛的光学探测仪器受到了日益严重的激光威胁, 作为光电对抗领域的重要组成部分, 激光告警直接影响到被保护目标的战场生存。激光源(激光测距机或激光目标指示器)辐射出的激光在大气中可能经过直射、反射和散射到达光电探测器表面。激光发散角小的特点决定了其光斑直径通常很小, 如果采用直接截

获式激光告警器保护大型目标, 将使告警器布设量非常大。因此, 研究基于漫反射探测的激光告警对于大型目标的保护具有重要作用。成像型激光告警器^[1-3]作为告警器中的一大类型, 通常由广角远心鱼眼透镜, 窄带滤光片和 CCD 成像器件构成, 具有等特点大空域接收、凝视式探测、固定波长探测, 只要求对某一种或几种波长的激光进行探测。

1 鱼眼镜头的成像规律

全向激光探测系统的组成部分为: 鱼眼镜头、窄带滤光片和成像探测器, 如图 1 所示。鱼眼透镜的超大视场, 可覆盖半球空域; 窄带滤光片滤除杂散光, 降低虚警率, 实现对特定波长的告警; 成像探测器通常响应

作者简介: 陈玉丹(1981-), 女, 博士研究生, 主要从事光电对抗及防护方面的研究工作。

E-mail: chenjudan2009@163.com

收稿日期: 2009-04-17; 收到修改稿日期: 2009-07-13

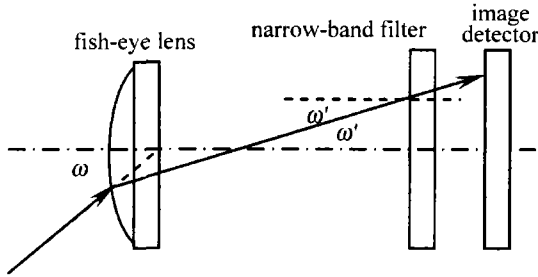


Fig. 1 Structure of an omni-direction laser warning system

灵敏度高,像元密度大,像元尺寸很小,通常为微米量级,因而可以实现激光威胁源的精确定位。在作者所研究的漫反射探测中,可以通过对成像光斑的定向,确定反射面的位置,进而对受激光威胁的区域告警,使其规避或是进行干扰。

良好的普通光学系统成像都遵循“相似”成像规律,即像与物总是相似的。已知理想成像高度公式^[1]为:(1)当物在近距离时, $y' = \beta y$; (2)当物在无穷远时, $y' = f \tan \omega$ 。其中, y' 为理想像高度; y 为物体高度; β 为横向放大率; f 为光学系统物方焦距; ω 为物方半视场角, ω' 为像方半视场角。

鱼眼镜头 $|\omega| \geq 90^\circ$,上述公式不能采用,需采用“非相似”成像思想。在工程上,要对物空间实行“变形压缩”理想成像。从光学上说,这种压缩可通过人为地引入大量“桶形”畸变来实现。满足此条件的理想成像公式有^[2]:

$$y' = 2f \tan(\omega/2) \quad (1)$$

$$y' = f\omega \quad (2)$$

$$y' = 2f \sin(\omega/2) \quad (3)$$

$$y' = f \sin \omega \quad (4)$$

(1)式~(4)式代表了4种新的物像映射关系。设计正确的鱼眼镜头,尽管其图像有变形,使之与“物”不再相似,但不会使图像模糊,即不影响图像的清晰度。从数学上说,从“物”空间到“像”空间,二者之间仍然存在着一一对应的“映射”关系。为了获得这种数学规律,需要在使用鱼眼镜头前对它进行标定。对系统的鱼眼系统进行实验,测得若干组激光束对鱼眼系统的人射角 ω 及其在鱼眼系统中的成像高度,通过多次拟合,得到它们之间的关系如图2所示。从图中可以

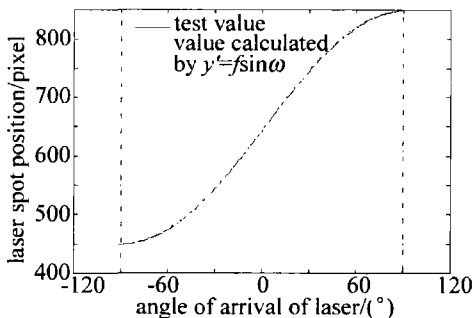


Fig. 2 Imaging curve of the fish-eye lens

看出,它们之间基本成正弦关系变化^[4],即:

$$y' = f \sin \omega \quad (5)$$

由表达式得到同一目标经过鱼眼镜头在像面上成像,对不同的入射角,目标图像所占的像素个数存在差别, these 问题是研究中必须考虑的。

2 全向激光系统成像分析

2.1 目标漫反射信号

激光告警器所探测到的反射信号通常是由目标载体或是周围平台所反射(漫反射)的激光信号。激光告警器接收的目标漫射信号辐射度是表面材料、表面结构、入射角度及探测角度的函数^[5-8]。为了研究方便,假设反射光束是半球内的漫反射。在作者研究的情况下,激光束在反射处的光斑面积通常小于目标的有效反射面积。

如图3所示,假设激光器发射功率为 P_s ,发射光

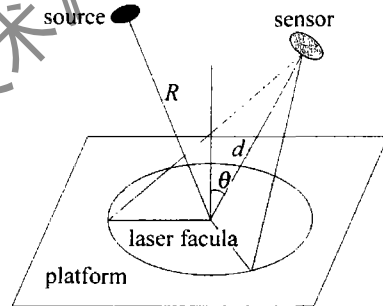


Fig. 3 Position that laser source related to the detector

学系统透过率为 τ_s ,探测器距离光斑为 d ,透镜光轴与反射表面法线的夹角为 θ ,大气对激光的衰减系数为 α ,经过距离为 R 的大气传输,当激光光斑打到目标载体或平台上时,形成光斑的面积为 A ,则平台上光斑处接收到的光功率:

$$P_r = P_s \cdot \tau_s \cdot \exp(-\alpha R) \quad (6)$$

因此,激光束在平台上光斑处产生的辐照度:

$$E_r = P_r/A = P_s \cdot \tau_s \cdot \exp(-\alpha R)/A \quad (7)$$

为了研究方便,将平台上的反射光束看作朗伯反射,即半球内均匀反射,设其漫反射系数 ρ ,目标上光斑处的漫反射辐照亮度为:

$$L_r = E_r \cdot \rho/\pi = P_s \cdot \tau_s \cdot \exp(-\alpha \cdot R) \cdot \rho/(A \cdot \pi) \quad (8)$$

由于探测器光敏面相对于激光斑面积较小,可看作微元面。假设探测光学系统透过率为 τ_d ,窄带滤光片的透光率为 τ ,则激光告警器探测到的反射光束的信号幅度值:

$$E_d = L_r \cdot \bar{\omega} \cdot \tau_d \cdot \tau \quad (9)$$

式中, $\bar{\omega}$ 为光斑对于探测器光敏面所成的立体角,则:

$$\bar{\omega} = \frac{A \cdot \cos \theta}{d^2} \quad (10)$$

将(8)式和(10)式带入(9)式,得告警器接收到的信号幅度:

$$E_d = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{P_s \cdot \tau_s \cdot \exp(-\alpha \cdot R) \cdot \rho \cdot \tau_d \cdot \tau \cdot \cos\theta}{d^2} \quad (11)$$

式中, $\alpha = \frac{3.912}{V} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^{q[5,9-10]}$, q 为经验常数,能见度较好,取 1.6;中等能见度取 1.3;能见度很差, $q = 0.585V^{1/3}$, V 为大气能见度, λ 为波长。

鱼镜头口径光阑所对应的轴上入瞳的直径为 D ,则入瞳面积 S 为:

$$S = \pi D^2 / 4 \quad (12)$$

则探测器接收到的信号功率为:

$$P_d = E_d \cdot S = \frac{P_s \cdot \tau_s \cdot \exp(-\alpha \cdot R) \cdot \rho \cdot \tau_d \cdot \tau \cdot \cos\theta \cdot D^2}{4d^2} \quad (13)$$

2.2 鱼眼系统中激光光斑成像特性分析

在全向告警系统中,鱼镜头的视场是半空域的,因此平台上的光斑在系统中完全成像。假设激光发散角为 β ,经过距离 R 传输后,光斑面积为:

$$A = \pi \left(\beta \cdot \frac{R}{2} \right)^2 = \frac{\pi}{4} \cdot \beta^2 \cdot R^2 \quad (14)$$

激光光斑在垂直于透镜光轴方向上的投影面积为:

$$S_0 = A \cdot \cos\theta \quad (15)$$

激光光斑在垂直于透镜光轴方向上的投影光斑不是严格的圆光斑,而由鱼镜头成像规律的讨论可知,对于不同的入射角,鱼镜头对光斑的放大是不一样的。因此,为了讨论的方便,在不影响对全向激光告警系统的整体性能讨论的条件下,假设激光光斑在垂直于透镜光轴方向上为圆光斑,半径为 r ,即 $S_0 = \pi r^2 = A \cdot \cos\theta$ 。根据鱼镜头的成像规律, $y = f \cdot \sin\omega = f \cdot \frac{r}{\sqrt{d^2 + r^2}}$,可得光斑在 CCD 成像面上的大小为:

$$S_1 = \pi y'^2 = \pi \frac{f^2 r^2}{d^2 + r^2} \quad (16)$$

将(14)式和(15)式代入得:

$$P = \frac{P_s \cdot \tau_s \cdot \exp(-\alpha \cdot R) \cdot \rho \cdot \tau_d \cdot \tau \cdot \cos\theta \cdot D^2 \cdot (a \times b) \cdot (4d^2 + \beta^2 \cdot R^2 \cos\theta)}{4d^2 \cdot \pi \beta^2 \cdot R^2 \cdot \cos\theta \cdot f^2} \quad (21)$$

(2)当光斑成像为单像素或是亚像素时,CCD 成像面上单像素探测到的光斑功率为探测器所接收到的功率,由(13)式得:

$$P = \frac{P_s \cdot \tau_s \cdot \exp(-\alpha \cdot R) \cdot \rho \cdot \tau_d \cdot \tau \cdot \cos\theta \cdot D^2}{4d^2} \quad (22)$$

取美军 AN/GVS25 型手持式激光测距机为计算对象,主要技术指标如下:在 12km 能见度下作用距离 8km,

$$S_1 = \frac{\pi \cdot A \cdot \cos\theta \cdot f^2}{\pi d^2 + A \cdot \cos\theta} = \frac{\pi \cdot \beta^2 \cdot R^2 \cdot \cos\theta \cdot f^2}{4d^2 + \beta^2 \cdot R^2 \cdot \cos\theta} \quad (17)$$

假设 CCD 的单个像素大小为 $a \times b$,则激光光斑在 CCD 上成的像素个数为:

$$N = \frac{S_1}{a \times b} = \frac{\pi \cdot \beta^2 \cdot R^2 \cdot \cos\theta \cdot f^2}{(a \times b) \cdot (4d^2 + \beta^2 \cdot R^2 \cdot \cos\theta)} \quad (18)$$

2.3 鱼眼像面照度均匀性分析

在普通光学系统中像面照度有如下特点^[1]:(1)即使没有斜光束的渐晕存在,像面上的照度也是不均匀的——随着像方半视场角 ω' 的增大,像面照度按 $\cos^4 \omega'$ 规律下降;(2)当存在斜光束渐晕时,若轴外斜光束截面积与轴上点光束面积之比为 K ,则像面照度表示为:

$$E = KE' \cos^4 \omega' \quad (19)$$

式中, E' 为轴上光束的照度, E 为轴外斜光束的照度。上式表达了轴外像点照度呈像方半视场角余弦 4 次方下降的规律,在实用中,若 $\omega' \geq 60^\circ$,则视场边缘的照度不足中央的 6.5%。像面照度分布如此严重的差异将使系统无法应用。为了设法保证像面的均匀性,鱼镜头设计采用了设计技术措施^[2]:(1)利用高额桶形畸变使 $|\omega'|$ 大幅度变小,显然引入的桶形畸变量越大,则物方半视场角 ω 对应的 $|\omega'|$ 越小,从而使 $\cos \omega$ 有足够大的数值。在鱼镜头的设计中,当入射角为 90° 时,所对应的 $|\omega'|$ 可以达到 10° 左右;(2)充分利用像差渐晕使轴外物点成像光束截面积增大,促使(19)式中 K 值尽可能增大,以抵消 $\cos^4 \omega'$ 的影响。在鱼镜头的设计中 K 值可以达到 1.2 左右。实践证明^[2],鱼镜头像面照度分布均匀,效果良好。

3 计算分析及应用讨论

综上所述,可以认为鱼眼像面照度均匀,并且不考虑 CCD 的填充率。

(1)当光斑成像为 N 个像素时,CCD 成像面上单像素所探测到的光斑功率为:

$$P = \frac{P_d}{N} \quad (20)$$

将(13)式、(18)式带入(20)式,得:

激光波长 $1.06 \mu\text{m}$,输出峰值功率 $P_0 = 2\text{MW}$,反射率 $\rho = 0.2$,发射和接收透镜的透过率 $\tau_s = \tau_d = 0.9$,窄带滤光片的透光率 $\tau = 0.9$,取夹角 $\theta = 60^\circ$,大气对激光的衰减系数 $\alpha = \frac{3.912}{V} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^{1.3}$,所选用的鱼镜头的焦距为 $f' = 2.4\text{mm}$,相对孔径为 $1/2$,入瞳直径为 $D = 1.2\text{mm}$,探测器的单个像素大小 $a \times b = 50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$,

激光的发散角 $\beta = 0.1 \text{ mrad}$ 。

通过计算,分以下3个部分进行分析讨论。

(1)由(18)式得到,当激光传输距离变化时,激光光斑成像的像素数与探测器距光斑距离 d 的关系如图4所示。从图中看出,随着传输距离的增加,当光斑成

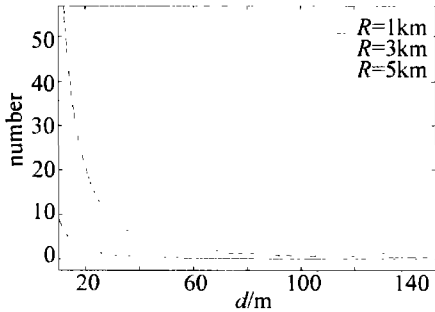


Fig. 4 Numbers of imaging elements

像为单像素数时,所对应的 d 值增加。当激光传输距离 $R = 1 \text{ km}$ 时,激光光斑所成的像的像素个数也较少,在 $d \approx 30 \text{ m}$,激光光斑成像为单像素;当激光传输距离 $R = 3 \text{ km}$,激光光斑成像为单像素时,对应的 $d \approx 90 \text{ m}$;当激光传输距离 $R = 5 \text{ km}$,激光光斑成像为单像素时, $d \approx 150 \text{ m}$ 。

(2)图5为不同能见度 V 条件下,当 $d = 20 \text{ m}$,即

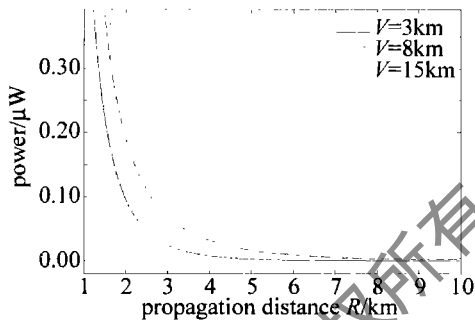


Fig. 5 Detection power of one imaging element when $d = 20 \text{ m}$

光斑成像为多像素时,CCD成像面上单像素探测到的光斑功率随传输距离 R 的变化关系图。由图5看出,能见度越高,CCD成像面上单像素探测到的光斑功率越大。这是因为能见度越高,大气对激光的衰减系数越小,因此,单像素探测到的光斑功率越大;图中,在相同能见度条件下,随着传输距离的增加,单像素探测到的光斑功率急剧减少,传输距离小于 5 km 时,功率约为 0.01 mW 的数量级。这是因为随着传输距离的增加,一方面激光衰减增加,另一方面随着传输距离增加,激光在平台上的光斑增大,则在 CCD 面上所成的像的像素相应增加,因此单个像素所探测到的功率减少。

(3)由前面讨论知,当传输距离为 5 km , $d \approx 150 \text{ m}$ 时,光斑在探测器所成的像为单像素。因此作者从光斑成像为单像素和多像素两部分进行讨论。首先假设能见度为 10 km ,图6为 $d < 150 \text{ m}$,即光斑成像为多像素时,CCD成像面上单像素探测到的光斑功率随距离

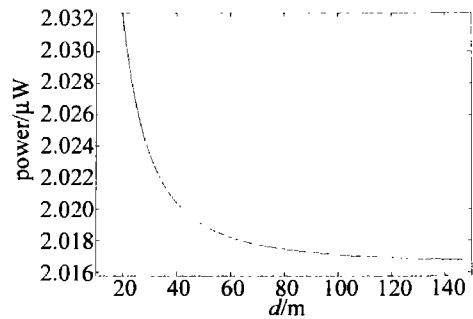


Fig. 6 Detection power of one imaging element when $d < 150 \text{ m}$

d 的变化图。从图6看出,随着 d 的增加,CCD成像面上单像素探测到的光斑功率随距离增加变化缓慢。因为当光斑成像为多个像素时,随着距离 d 的增加,探测器探测到的总功率减少,但相应的光斑成像像素也在减少,因此单像素探测到的光斑功率随距离 d 变化不大。这从(18)式、(21)式也可看出,随着 d 的增加, $\beta^2 R^2 \cos \theta \ll 4d^2$ 因此可忽略 $\beta^2 R^2 \cos \theta$,则光斑在 CCD 上成的像素个数和 CCD 成像面上像素所探测到的光斑功率分别为: $N \approx \frac{\pi \cdot \beta^2 \cdot f^2 \cdot \cos \theta \cdot R^2}{4d^2 \cdot (a \times b)}$, $P \approx \frac{P_s \cdot \tau_s \cdot \exp(-\alpha \cdot R) \cdot \rho \cdot \tau_d \cdot \tau \cdot \cos \theta \cdot D^2 \cdot (a \times b)}{\pi \cdot \beta^2 \cdot R^2 \cdot \cos \theta \cdot f^2}$,

即在近似条件下,CCD成像面上单像素探测到的光斑功率与距离 d 变化无关。其次当 $d > 150 \text{ m}$ 时,光斑所成的像基本上是单像素或是亚像素,探测器功率与距离 d 的关系如图7所示。由图7看出,CCD成像面上

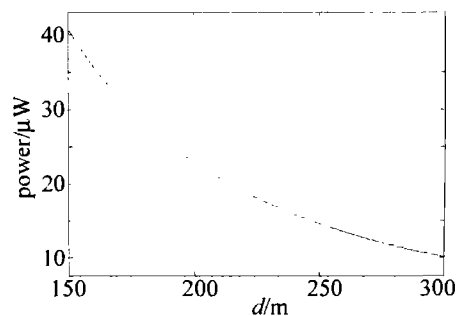


Fig. 7 Detection power of one imaging element when $d > 150 \text{ m}$

单像素探测到的光斑功率随距离 d 的增加急剧减少。因为随着距离 d 增加,探测器探测到的总功率减少,而光斑成像为单像素或亚像素,因此,探测器总功率即为 CCD 成像面上单像素探测到的光斑功率。

4 结论

通过对基于漫反射的全向激光探测告警性能的分析,得出了影响探测性能各个因素之间的关系,对于系统的研制以及参量的选择具有重要意义。本文中为了讨论的方便,在 CCD 成像像素的分析上,将 CCD 成像理想化,没考虑具体 CCD 的填充率和光斑像在 CCD

(下转第 576 页)

0, 表现为红移。对三角波而言, 当 $t < 0$ 时, $\delta\omega_{\text{triangle}} > 0$, 表现为蓝移; $t > 0$ 时, $\delta\omega_{\text{triangle}} < 0$, 表现为红移, $t = 0$ 处为非连续点, 故未表示该点啁啾。以脉冲中值点为参考点时啁啾分布情况和以峰值点为参考点时差别不大, 两条曲线几乎重合。

若信号光和控制光之间采用比特同步方式, 要想使信号光脉冲各点的 NPD 都同时达到 π , 计算得到的每比特信号光实际所需的控制光脉冲波形如图 7 所示。若信号光脉冲为正弦波, 其控制光波形类似正弦波, 峰值点功率 3.313mW, 中值点功率 2.009mW。三角波所需的控制光脉冲同样为三角波, 峰值点功率 3.313mW, 波形斜率为 ± 13.5 , 是信号光斜率的 2.7 倍。

2 结论

模拟光信号在 SOA 中进行交叉相位调制时, 若仍采用数字光信号系统常用的帧同步方式, 将导致信号光脉冲各点通过 SOA 时所获增益出现波动, 进而导致脉冲各点的非线性相移差异, 偏离各种全光处理器件所要求的理想值。信号光和控制光之间采用比特同步方式, 可使模拟光信号脉冲各点的非线性相移同时达到理想值, 此时每比特信号光所需的控制光波形和信号光相似。对其它形式的模拟光信号如余弦波、锯

齿波等均有相似的结论。

参考文献

- [1] LIU A M, WU Ch Q, GONG Y D. Dual loop optical buffer (DLOB) based on 3×3 collinear fiber couple[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(9): 2129-2131.
- [2] ZHANG L J, WU Ch Q, LI Y J. Novel read/write independently controlled all-optical buffer based on dual-semiconductor optical amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(11): 1945-1949(in Chinese).
- [3] LIU A M, WU Ch Q, GONG Y D, et al. All-optical switch with double switched ports based on semiconductor optical amplifier [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2004, 28(5): 28-31(in Chinese).
- [4] PAN W, ZOU L F, LUO B, et al. Theoretical study of all optical XOR using Mach-Zehnder interferometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(3): 339-347(in Chinese).
- [5] YANG X L. Optical fiber communication system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 245-248(in Chinese).
- [6] YANG X L. Optical amplifier and its application [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2000: 108(in Chinese).
- [7] HENRY C. Theory of the linewidth of semiconductor lasers [J]. IEEE J Q E, 1982, 18(2): 259-264.
- [8] EISELT M, PIEPER W, WEBER H G. SLALOM: semiconductor laser amplifier in a loop mirror [J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(10): 2099-2112.
- [9] GAO H L, WU Ch Q, LI Y J, et al. Measurement of linewidth enhancement factor of SOA using fiber Sagnac ring [J]. Optoelectronics Letters, 2006, 2(2): 142-144.
- [5] POLLOCK D H. The infrared & electro-optical systems handbook, volume 7: countermeasure systems [M]. Bellingham, Wash: SPIE Optical Engineering Press, 1993: 77-140.
- [6] AN X Q, ZHU B, QING R Sh. Detective power of photoelectric imaging system on $1.06\mu\text{m}$ laser facula[J]. Laser Technology, 2001, 25(6): 441-445(in Chinese).
- [7] ZHANG B D, QIN Sh Q, JIA H J, et al. Measurement model and uncertainty analysis of pulsed laser far field energy density based on CCD imaging[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(9): 1417-1420(in Chinese).
- [8] DONG J H, HU Q Q. Analysis of working distance of CCD gaze imaging tracking system in space[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(2): 173-177(in Chinese).
- [9] COLEMAN C I. Laser warning system: US, 2187335 [P]. 1987-09-03.
- [10] GUO Zh H, XU D Sh, WANG Sh P, et al. Effect of atmospheric turbulence on laser beam propagation[J]. Laser Technology, 1992, 16(2): 65-72(in Chinese).

(上接第 560 页)

的具体位置, 这些因素都会对 CCD 的成像像素值有一定的影响, 但对成像的趋势变化影响不大, 因此, 本文中的结论具有一定的参考价值, 但在具体的使用中, 还需根据所使用的 CCD 的型号及性能进行进一步的分析。

参考文献

- [1] YUAN X C. Application optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 179-180(in Chinese).
- [2] WANG Y Zh. Fish-eye lens optics [M]. Beijing: Science Press, 2006: 42-46, 61-64(in Chinese).
- [3] GE Q Sh, GE Q L, GONG Ch K. Research on sensitivity of vehicular laser warning device [J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(4): 473-476(in Chinese).
- [4] ZHOU Zh L. Study on complete airspace staring laser threat imaging detection techniques [D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2008: 20-25(in Chinese).