

猫眼效应回波的动态成像探测与目标识别

武东生^{1,2} 白廷柱¹ 刘秉琦² 周 斌³ 胡文刚¹

(¹ 北京理工大学光电学院, 北京 100081; ² 军械工程学院, 河北 石家庄 050003)
³ 中国人民解放军 71192 部队, 山东 文登 264400)

摘要 为实现复杂背景下猫眼效应回波的动态成像探测与目标识别,根据猫眼效应回波、背景及噪声的成像特点,构建了成像探测系统,探讨了目标的探测方法,提出了激光照射与成像探测工作时序同步调制、视场同步控制的探测模式。在此基础上对目标的识别算法进行了研究,运用帧间差分法实现对背景干扰的滤除,提出区域灰阶平均法实现对噪声的有效抑制,通过自适应的目标判别与识别阈值完成对目标的识别。利用搭建的实验系统对 500 m 和 2500 m 目标进行了探测,结果表明,在 2500 m 的探测距离内,利用成像探测方法和目标识别算法,得到虚警概率为 0.3×10^{-12} ,探测概率为 1,从而消除了背景和噪声对目标识别过程的影响。

关键词 激光主动探测;猫眼效应;成像探测;目标识别

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0811003

Dynamic Imaging Detection and Target Recognition for Cat-Eye Effect Echo

Wu Dongsheng^{1,2} Bai Tingzhu¹ Liu Bingqi² Zhou Bin³ Hu Wengang²

(¹ School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
² Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China
³ Army 71192 of the Chinese People's Liberation Army, Wendeng, Shandong 264400, China)

Abstract In order to realize dynamic imaging detection and target recognition for cat-eye effect echo in complex background, the imaging detection system is constructed and the detection methods are discussed according to the imaging characteristics of the cat-eye effect echo, background and noises. The detection mode is proposed that the timing is modulated synchronously and the field of view is controlled synchronously for the laser irradiation and imaging detection. Based on it, the target recognition algorithm is researched. The background interference can be removed by the method of frame difference. The method of regional grayscale average is put forward to suppress noises. The target can be recognized through adaptive thresholds of target discrimination and recognition. The detection experiments for 500 m and 2500 m targets are carried out with built imaging detection system. The results show that, utilizing imaging detection method and target recognition algorithm, the false alarm probability is 0.3×10^{-12} and the detection probability is one in the detection distance of 2500 m, which eliminates the effect of background and noise in target recognition process.

Key words active laser detection; cat-eye effect; imaging detection; target recognition

OCIS codes 100.3008; 140.7300; 280.5600

1 引 言

由于光电系统结构的限制,当用强光对其进行照射时,会产生指向光源方向,回波能量比漫反射目标强 2~4 个数量级的后向反射光,这种效应即通常所说的“猫眼效应”,猫眼效应在光电装备探测、导引头跟踪和自由空间通信等领域有着广泛的应用前

景^[1-3]。基于猫眼效应实现对光电系统目标的探测与识别是其中的关键技术,国内外学者提出了阈值处理、波门控制、距离选通、形状判别、压缩感知等多种方法^[4-8]。但在实际的复杂背景环境下,由于猫眼效应回波会受到照射激光、背景杂散光以及大气等因素的影响,造成回波图像信噪比低、图像稳定性

收稿日期: 2013-02-05; 收到修改稿日期: 2013-04-10

作者简介: 武东生(1978—),男,硕士研究生,讲师,主要从事光电探测与跟踪等方面的研究。E-mail: wds116@aliyun.com

导师简介: 白廷柱(1955—),男,博士,教授,主要从事光学成像与信息工程等方面的研究。E-mail: tzhbai@bit.edu.cn

差和目标成像形状不规则,采用通常的目标识别方法难以取得良好的识别效果。Lecocq 等^[9]根据猫眼效应的特点,提出了主动图像与被动图像相减以消除背景杂散光影响的方法,人眼识别效果明显,但相减后图像的噪声会被凸显,且没有给出进行目标自动识别的解决方法。Ren 等^[10]在图像处理方法的基础上,提出了以目标形状和激光调制频率为准则的猫眼目标图像识别算法,对于固定场景的目标而言识别效果有很大的改善。

本文针对复杂背景下猫眼效应回波的动态成像探测与目标识别问题,提出了激光照射与成像探测视场(FOV)同步控制、激光照射与成像探测工作时序同步调制的探测体制,探讨了动态成像探测方法,构建了成像探测系统。在此基础上提出了采用帧间差分、区域灰阶平均、自适应阈值等关键技术的目标识别算法。通过实验对探测系统及识别算法进行了验证,并对探测性能进行了分析。

2 成像探测系统组成及原理

图 1 为成像探测系统构成原理图。成像探测系统主要由激光器模块、发射光学模块、接收光学模块、成像模块、工作时序同步调制模块、视场同步控制模块、图像处理模块、控制及显示模块等组成。

系统基本工作原理为:发射光学模块、接收光学模块分别对激光照射视场和成像探测视场进行调节,并且通过视场同步控制模块使两者保持恒定的比例关系,这里称为视场同步控制方法。如图 2 所示,视场同步控制方法的目的是为了保证激光回波能量不会对成像探测造成干扰,同时保证探测系统具有足够远的探测距离。成像区域根据激光照射视场和成像探测视场的比例关系可分成三个部分:C 为成像探测视场、A 为激光照射视场、B 为背景区域,且满足 $C=A+B$ 。通过工作时序调制模块使激

光器模块和成像探测模块按图 3 所示的工作时序工作,保证采集到的图像序列在 $k+1, k+3, \dots$ 隔帧有激光照射,这里称为工作时序同步调制方法,其目的是为了实现在目标识别算法中的帧间差分。视场同步控制模块、工作时序调制模块受控于控制及显示模块。成像模块前端安装有窄带滤光片,以抑制背景光对成像的影响,成像模块对景物成像后送入图像处理模块,通过其中的识别算法对图像进行目标识别,最终将识别的结果在控制及显示模块上显示出来。整个成像探测系统安装在二维云台上,完成对一定空域的动态扫描探测。

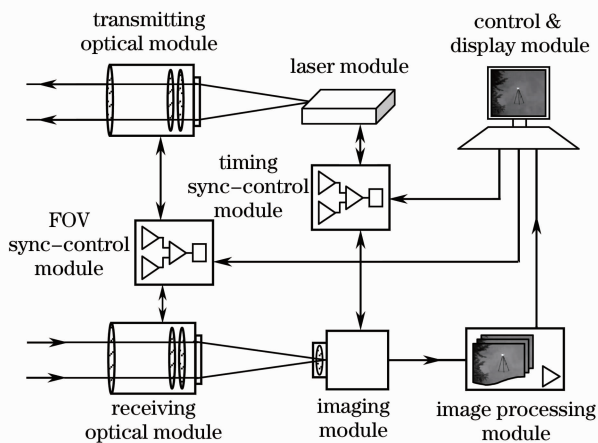


图 1 成像探测系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of imaging detection system



图 2 激光照射视场与成像探测视场比例关系

Fig. 2 FOV scaling relation between laser irradiation and imaging detection

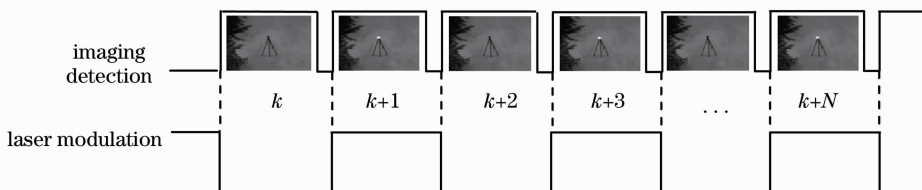


图 3 激光调制与成像探测时序关系

Fig. 3 Sequential relationship between laser modulation and imaging detection

3 目标识别算法

为保证目标识别的实时性,理想情况应能依据单一帧图像数据给出识别结果,但由于背景和噪声的影响,此方法不能同时保证高探测概率和低虚警率。所以考虑利用相邻帧图像数据完成目标探测识别,具体目标识别算法流程如图4所示。

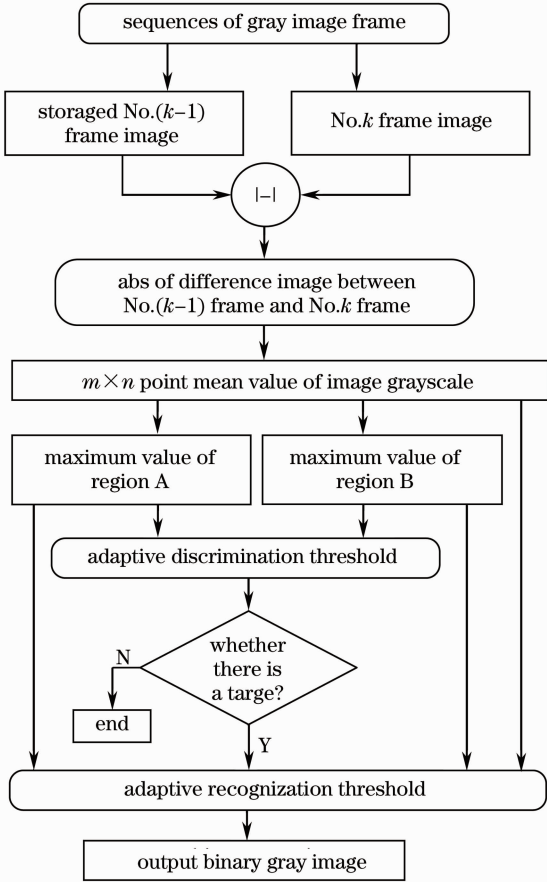


图4 目标识别算法流程图

Fig. 4 Flow diagram of target identification algorithm

3.1 图像帧间差分

存储第 $k-1$ 帧图像,当采集到 k 帧图像时,对第 $k-1$ 帧和第 k 帧图像进行帧间差分并取绝对值,表示为

$$I'_k(p, q) = |I_k(p, q) - I_{k-1}(p, q)|, \quad (1)$$

式中 $I_{k-1}(p, q)$ 、 $I_k(p, q)$ 分别表示第 $k-1$ 、 k 帧图像第 p 行第 q 列像素点灰阶值, $I'_k(p, q)$ 表示第 p 行第 q 列像素点经帧间差分取绝对值后的灰阶值,其中 $p = 1, 2, \dots, P; q = 1, 2, \dots, Q, P, Q$ 为图像像素总的行列数。

在动态扫描探测中,由于图像帧时间间隔较短,第 $k-1$ 帧和第 k 帧图像背景部分几乎完全相同,经此步骤后相邻两帧图像的绝大部分背景将被消除。

由于探测系统硬件已实现了隔帧激光照射,当存在光电系统时,猫眼效应回波的成像光斑会被凸显出来,为目标识别提供了有力条件。但另一方面,经此步骤后图像的噪声会被凸显出来,给目标的识别带来了不便。

3.2 区域灰阶平均

经图像帧间差分处理后,如以图像灰阶最大值为指标对目标进行识别,由于图像噪声与猫眼效应回波成像光斑的灰阶分布几乎相同,所以无法进行目标识别。猫眼效应回波成像光斑具备区域连续高灰阶值分布的特点,而图像噪声认为近似高斯分布,据此可对帧间差分取绝对值后的图像进行区域灰阶平均,以增大猫眼效应回波成像光斑与图像噪声的灰阶差。以 $m \times n$ 个像素为单元,将 I'_k 分成 $M \times N$ 个图像子区域 $H_k(\omega, h)$,其中 $\omega = 1, 2, \dots, M; h = 1, 2, \dots, N$; 存在关系 $P = m \times M, Q = n \times N$ 。区域 $H_k(\omega, h)$ 的灰阶平均值表示为

$$H_k(\omega, h) = \frac{1}{mnt} \sum_{u=1}^{u=m} \sum_{v=1}^{v=n} I'_k[(\omega-1)m + u, (h-1)n + v], \quad (2)$$

式中 m, n 取值的大小依据猫眼效应回波成像光斑的大小确定,猫眼效应回波成像光斑可认为是光学窗口几何成像和回波衍射成像叠加的结果,利用典型数据经简单计算后可知成像光斑的直径至少要大于 6 pixel,本文中 m, n 值均取为 6。

3.3 目标判别

设定目标判别阈值,判别图像中是否存在目标,目标判别方法为

$$|\max[H_k^A(\omega, h)] - \max[H_k^B(\omega, h)]| > I_t, \quad (3)$$

式中 $\max[H_k^A(\omega, h)]$ 为激光照射区域 A 中 $H_k(\omega, h)$ 的最大值, $\max[H_k^B(\omega, h)]$ 为背景区域 B 中 $H_k(\omega, h)$ 的最大值。 I_t 为判别阈值,为适应环境、光线等的变化,这里采用自适应阈值,表示为

$$I_t = \lambda' \frac{1}{M_B} \sum_{(\omega, h) \in B} H_k^B(\omega, h), \quad (4)$$

式中 λ' 为抑制系数(参考值取 0.2), M_B 为背景区域 B 内 $H_k(\omega, h)$ 像素点的数目。当(3)式成立时,则表明在激光照射区域内存在目标,否则不存在目标。

3.3 目标识别

当判别激光照射区域存在目标后,就可以进行目标识别了,否则结束整个识别过程。这里目标的识别采用的是灰阶阈值分割法,表示为

$$T_z = \frac{1}{2} \{ \max[H_k^A(\omega, h)] + \max[H_k^B(\omega, h)] \}, \quad (5)$$

$$R_k^A(\omega, h) = \begin{cases} 0 & H_k^A(\omega, h) \leq T_z \\ 1 & H_k^A(\omega, h) > T_z \end{cases}, \quad (6)$$

式中 T_z 为分割阈值; $H_k^A(\omega, h)$ 为激光照射区域 A 中的 $H_k(\omega, h)$ 值; $R_k^A(\omega, h)$ 为分割结果, “1”表示目标, “0”表示背景, 由此也可以确定目标在图像中的位置坐标。

4 探测实验与结果分析

4.1 探测试验

基于图 1 所示的成像探测系统组成框图构建了成像探测实验系统, 实验环境为中等能见度条件。实验系统激光器采用了 $0.94 \mu\text{m}$ 的半导体激光器,

输出功率 15 W; 成像探测器采用红外增强型 CCD, 自动增益方式工作, 成像探测视场 $0.6^\circ \sim 6^\circ$ 可调, 激光照射视场为成像探测视场的二分之一, 扫描角步长与激光照射视场相同。利用成像探测系统样机分别对 500 m 和 2500 m 的光电系统进行了猫眼效应回波成像探测实验, 被测目标光学窗口直径为 60 mm, 视场为 6° 。

500 m 和 2500 m 目标成像探测与识别过程分别如图 5、6 所示。图 5 和图 6 表示方法相同, (a) 为激光未照射帧图像, (b) 为激光照射帧图像, (c) 为帧间差分取绝对值图像, (d) 为区域灰阶平均图像, (e) 为目标识别结果图像。(f)~(j) 分别为 (a)~(e) 按行顺序将图像首尾相连后的展开信号, 对应电子扫描的视频信号, 横轴表示像素点数, 纵轴表示相应像素点的灰阶大小。

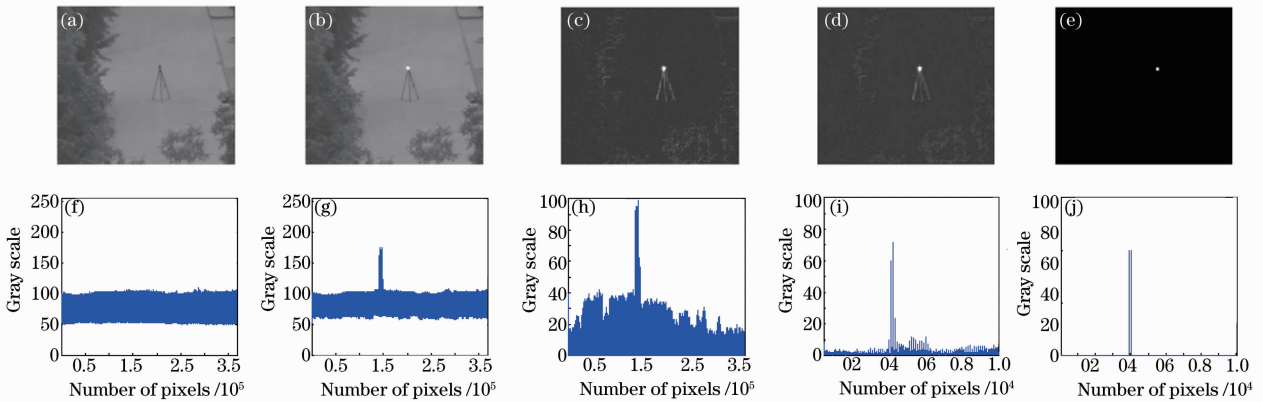


图 5 500 m 目标成像探测与识别过程

Fig. 5 500 m target detection and identification process

对比图 5 和图 6 可以看出, 在近距离目标成像探测中, 由于成像模块自动增益小使图像噪声小, 大气影响小使序列采集图像的背景起伏变化小。经帧间差分取绝对值后背景几乎被全部消除, 目标被凸

显出来, 如图 5(c)、(h) 所示, 目标与噪声的信噪比从图 5(g) 中的 2.3 提高到图 5(h) 中的 2.8。经区域灰阶平均后, 目标与噪声的信噪比提高到了 7, 目标被进一步凸现出来, 如图 5(d)、(i) 所示。经过区

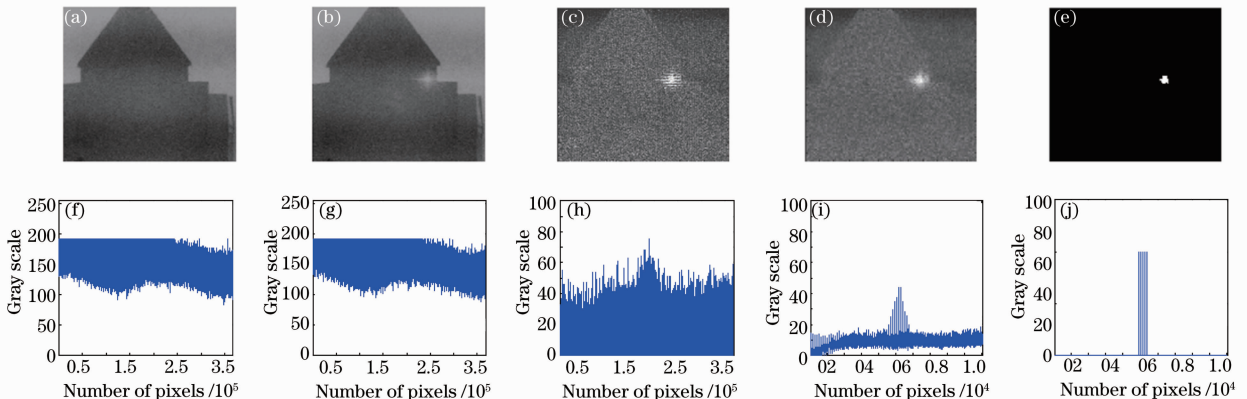


图 6 2500 m 目标成像探测与识别过程

Fig. 6 2500 m target detection and identification process

域灰阶平均后,通过目标判别、目标识别阈值可以将目标从背景中识别出来。在远距离的目标成像探测中,成像模块自动增益大使图像噪声显著增强,大气影响明显使序列采集图像的背景起伏变化较大,如图 6(a)、(b)、(f)、(g)所示,此时目标与噪声的信噪比近于 1。经帧间差分取绝对值后对噪声有所抑制,信噪比增大到 1.4,如图 6(c)、(h)所示。经区域灰阶平均后,信噪比提高到了 3,如图 6(d)、(i)所示。经过区域灰阶平均后,通过目标判别、目标识别阈值也可以很容易将目标从背景中识别出来,识别结果如图 6(e)所示。

4.2 探测能力分析

在猫眼效应的成像探测中,图像经帧间差分后,背景、探测器和处理电路的噪声在 I'_k 图像中是主要噪声,噪声信号可近似为高斯概率密度分布^[11],表示为

$$f(i_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}I_n} \exp\left(-\frac{i_n^2}{2I_n^2}\right), \quad (7)$$

式中 i_n 为噪声信号, I_n 为噪声均方根。经区域 $m \times n$ 点灰阶平均后,图像 $H_k(\omega, h)$ 中噪声均方根变为 $I_n / \sqrt{m \times n}$ ^[12]。

虚警概率可表示为

$$P_f = \int_{I_t}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}I_n / \sqrt{mn}} \exp\left(-\frac{mmi_n^2}{2I_n^2}\right) = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left[\frac{\sqrt{mn}R_{TN}}{\sqrt{2}} \right] \right], \quad (8)$$

探测概率可表示为

$$P_d = \int_{I_t - I_s}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}I_n / \sqrt{mn}} \exp\left(-\frac{mmi_n^2}{2I_n^2}\right) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[\frac{\sqrt{mn}(R_{SN} - R_{TN})}{\sqrt{2}} \right] \right\}, \quad (9)$$

式中 $\operatorname{erf}()$ 为高斯误差函数, R_{TN} 为阈噪比, $R_{TN} = I_t / I_n$, R_{SN} 为信噪比, $R_{SN} = I_s / I_n$, I_s 为目标信号。因为目标判别采用自适应阈值,由(4)式可知 $R_{TN} = 1.2$, $m = n = 6$,利用(8)式可计算 $P_f = 0.3 \times 10^{-12}$ 。当探测距离为 500 m 时,经区域灰阶平均后 $R_{SN} = 7$,可得 $P_d = 1$ 。当探测距离为 2500 m 时,经区域灰阶平均后 $R_{SN} = 3$,可得 $P_d = 1$ 。

5 结 论

根据猫眼效应回波的成像特点,针对复杂背景下猫眼效应回波动态探测与识别的问题,提出了激光照射与成像探测视场同步控制、激光照射与成像探测工作周期同步调制的探测模式。依据硬件组成及探测模式,提出了帧间差分、区域灰阶平均、自动目标判别与识别的目标识别算法。利用构建的目标成像探测实验系统对近距离及远距离目标进行了目标探测及识别实验。实验结果表明,识别算法能有效对背景进行抑制,能有效消除噪声及不稳定成像部分的影响。通过帧间差分及区域灰阶平均使目标与噪声的信噪比提高了 3 倍,在 2500 m 的探测范围内,探测概率可达到 1,消除了背景及噪声对目标探测识别的影响,可以满足猫眼效应回波动态探测及目标识别的要求。

参 考 文 献

- Zhao Xunjie, Gao Zhiyun, Zhang Yingyuan. Technology of active laser reconnaissance and the application in the military [J]. Optical Technology, 2003, 29(4): 415-417.
- 赵勋杰, 高雅允, 张英远. 基于“猫眼”效应的激光侦察技术及其在军事上的应用[J]. 光学技术, 2003, 29(4): 415-417.
- A L Mieremet, R M A Schleijsen, P N Pouchelle. Modeling the detection of optical sights using retro-reflection [C]. SPIE, 2008, 6950: 69500E.
- Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Zheng Yonghui, et al.. Theoretical analysis of scanning and identifying cat-eye target with coherently combined array Gaussian beams [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0412002.
- 赵延伸, 孙华燕, 郑勇辉, 等. 相干合成线阵高斯光束扫描识别猫眼目标理论分析[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0412002.
- Feng Xiaorong. Target recognition of laser active detection [J]. Electro-Optic Technology Application, 2006, 21(5): 38-40.
- 冯小荣. 激光主动探测的目标识别[J]. 光电技术应用, 2006, 21(5): 38-40.
- Ge Chengliang, Huang Zhiwei, Ji Yunsong, et al.. Target classification with cat eye effect [J]. High Power Laser and Partical Beam, 2003, 15(7): 632-634.
- 葛成良, 黄志伟, 季云松, 等. 基于“猫眼效应”的目标识别[J]. 强激光与粒子数, 2003, 15(7): 632-634.
- Li Yuqi, Liang Feng. Optical target discernment on cat's eye effect [J]. Laser & Infrared, 2000, 30(4): 252-253.
- 李玉旗, 梁峰. 基于“猫眼效应”的光学目标识别[J]. 激光与红外, 2000, 30(4): 252-253.
- Tong Lanjuan, Jiang Xiaoyu, Song Xiaoshan, et al.. Target detection based on laser imaging with “cat eye effect” [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(9): 982-985.
- 同兰娟, 蒋晓瑜, 宋小杉, 等. 基于“猫眼效应”激光成像的目标探测[J]. 激光与红外, 2009, 39(9): 982-985.
- Dang Ersheng, Li Li. Laser detection cat-eye effect target recognition algorithm [J]. Aeronautical Science & Technology, 2011, (6): 59-62.

- 党二升, 李 丽. 激光探测“猫眼”效应目标识别算法[J]. 航空科学技术, 2011, (6): 59-62.
- 9 C Lecocq, G Deshors, O Lado-Bordowsky, *et al.*. Sight laser detection modeling [C]. *SPIE*, 2003, 5086: 280-286.
- 10 X Ren, L Li. Recognizing cat-eye targets with dual criterions of shape and modulation frequency [J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(4): 041101.
- 11 Chen Yubao, Huang Tao. Research on signal detection probability of electro-optic equipments [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2004, 19(4): 10-13.
- 程玉宝, 黄 涛. 几种光电探测设备的信号探测概率分析[J]. *光电技术应用*, 2004, 19(4): 10-13.
- 12 Xu Lu, Zhang Yu, Zhang Yong, *et al.*. Research on the detection performance of geiger-mode APD laser radar with accumulated detection [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0414003.
- 徐 璐, 张 宇, 张 勇, 等. 盖革模式雪崩光电二极管激光雷达累积探测性能的研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0414003.

栏目编辑: 李文喆