

文章编号: 1001-3806(2013)03-0380-05

猫眼光学窗口反侦察能力影响因素分析

华文深 张悦 王元铂 李刚 马左红 杨佳
(军械工程学院 光学与电子工程系 石家庄 050003)

摘要: 为了提高我军光电对抗能力,达到攻防兼备的目的,必须在开展猫眼主动侦察研究的同时,开展猫眼光学窗口的反侦察策略研究。以探测激光回波功率为主要判断依据,利用数值仿真的方法对反侦察能力影响因素进行了定性和定量分析。结果表明,猫眼回波功率会随着探测器入射光功率、接收光学系统光学窗口面积、发射光学系统透过率、发射激光束发散角、猫眼物镜口径、焦距及反射元件失调量的改变而变化,且受漫反射背景和系统工作波长的影响。对影响因素的分析为反侦察策略的研究提供了理论依据。

关键词: 激光光学;猫眼效应;反侦察能力;光学系统失调;大气能见度;色差

中图分类号: TN977 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.03.025

Analysis of influence factors for anti-detection ability of cat-eye optical windows

HUA Wen-shen, ZHANG Yue, WANG Yuan-bo, LI Gang, MA Zuo-hong, YANG Jia
(Department of Optics and Electronic Engineering, Mechanical Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: To improve the ability of optoelectronic countermeasure and defensive and offensive capabilities, the methods of anti-detection should be studied as well as the cat-eye active detecting technology. Influence factors of anti-detection ability were qualitatively and quantitatively analyzed by numerical simulation based on the reflected wave power. The simulation results show that reflected wave power is changed with the changing of incident power of detector, optical window area of receiver system, transmittance of emission system, divergent angle of incident laser, diameter and focal length of objective lens and maladjustment of reflector, and it is influenced by diffuse background and system operating wavelength. The research of influence factors provides theoretical basis for anti-detection strategy.

Key words: laser optics; cat-eye effect; anti-detection ability; imbalance of optical system; atmospheric visibility; aberration

引言

“猫眼”效应^[1-2]普遍存在于光电装备的光学窗口中,是敌方实施光学窗口主动侦察的物理依据。利用“猫眼”效应,美、俄等军事强国已经装备了比较完备的集光学窗口侦察、干扰和致盲为一体的激光武器系统^[3-4]。在近年来的几次局部战争中,激光主动探测系统凭借其较高的定位精度和快速的探测速度大大提高了战场武器系统的作战效能,凸显出惊人的作战效果和威力,而国内对“猫眼”效应的研究还处于理论分析和实验室研究阶段,在应用领域还是空白,在敌

方具备实施“猫眼”主动侦察的条件下,即使我方采用被动观测方式,如微光夜视仪、热像仪等各种夜视装备,也会暴露无遗。如若不采取反侦察措施,我军必将受到敌方激光侦察及其武器系统的压制和破坏,造成我军光电装备迷盲、失控和失效,致使指挥系统混乱,作战系统瘫痪,陷入任人宰割的局面,因此“猫眼”效应已经成为我军光电装备的致命伤。如何降低“猫眼”效应,减小光学窗口被探测到的概率成为提高光电装备战场生存能力亟待解决的问题。由此可见,在开展“猫眼”主动侦察研究的同时,同步开展军用光电装备的反侦察能力测试,研究反侦察能力影响因素,对反侦察策略的研究具有重要的意义。

1 反侦察能力影响因素分析

ZHANG 等人已对典型猫眼光电装备的光学结

作者简介: 华文深(1967-),男,副教授,现主要从事光电对抗与光信息处理方面的研究。

E-mail: huawenshe@126.com

收稿日期: 2012-07-16; 收到修改稿日期: 2012-08-30

构和工作原理进行了分析,总结概括出了简易猫眼模型^[5-6]。为了更好地评估猫眼光电装备的反侦测能力,深入地研究猫眼目标特性,有必要对反侦测能力影响因素加以分析,明确外界条件、系统参量等因素对猫眼效应的影响。本文中将从探测系统自身参量、环境因素、猫眼目标光学系统参量 3 个方面入手,探讨“猫眼”光学窗口反侦测能力的影响因素。

1.1 探测系统自身参量

激光主动侦查系统主要由激光发射系统、接收放大系统以及信息处理系统构成,通过发射激光束对猫眼目标进行扫描探测,接收其猫眼回波并进行信息处理,来实现对猫眼目标的探测和识别。其探测系统自身参量必然影响猫眼效应的回波强度,而激光的回波强度的大小间接反映了被探测方的反侦测能力。假设探测激光发射功率为 P_i ,发射光学系统透过率为 T_i ,大气透过率为 T_a ,发射激光束发散角为 θ_i ,探测系统距“猫眼”目标的距离为 L ,则探测激光入射到猫眼目标光学窗口的功率密度为:

$$E_i = \frac{P_i T_i T_a}{(1/4) \pi \theta_i^2 L^2} \quad (1)$$

式中,设光学窗口有效接收面积为 A_e ,猫眼光学系统反射系数为 T_0 ,则猫眼目标回波功率为:

$$P_r = \frac{E_i A_e T_0 T_a T_r}{(1/4) \theta_r^2 L^2} \cdot A_i = \frac{16 P_i T_i T_r T_0 T_a^2 A_e A_i}{\pi^2 \theta_i^2 \theta_r^2 L^4} \quad (2)$$

式中, T_r 为接收光学系统透过率, A_i 为接收光学系统光学窗口面积, θ_r 为猫眼回波发散角,且其值受“猫眼”光学系统参量的影响。

(2) 式反映了猫眼目标回波功率与探测激光发射功率、发射接收光学系统透过率、接收光学系统面积、探测激光束发散角等参量之间的关系,为了定量反应各参量对猫眼效应的影响,利用 MATLAB 软件对其进行数值仿真,数值计算时各参量设定为: $T_0 = 0.3$, $T_a = 0.3$, $A_e = 10\text{cm}^2$, $A_i = 80\text{cm}^2$, $L = 400\text{m}$ 。同时假设探测激光正入射,且猫眼光学系统是一个没有像差、无衍射的系统,此时,回波发散角近似为 $\theta_r = \theta_i$ 。图 1 为探测系统各参量与回波功率的关系曲线,且对应各变量的其它参量分别设定为: $P_i = 100\text{W}$, $T_i = T_r = 0.9$, $\theta_i = 2\text{mrad}$ 。

由仿真结果可以看出,回波功率随着 P_i , A_i , T_i 的增大而增大,随 θ_r 的增大而减小,因此对于研究如何提高“猫眼”光学窗口反侦测能力,可以从减小

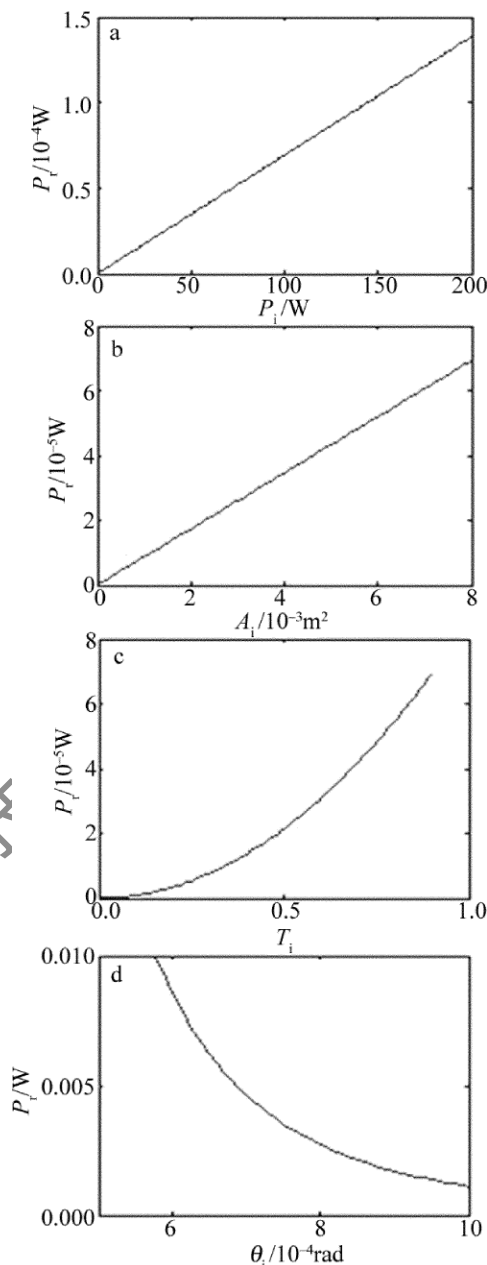


Fig. 1 Relationship between detecting system parameters and reflected power

这 4 个参量入手,如通过镀膜方式降低入射激光能量,通过加装外置装置调制探测光发散角等等。

1.2 环境因素

主动探测系统在接收到猫眼目标回波信号的同时,也会接收到漫反射背景的回波信号,因此,目标背景对比度^[7]也会影响探测系统对猫眼效应的探测能力。发射功率为 P_i 的探测激光到达漫反射目标表面的功率密度也可用(1)式来表示。

假设漫反射背景在入射方向上的有效接收面积为 A_e' ,且背景目标表面法线与入射光方向夹角为 φ ,漫反射系数为 ρ ,则漫反射回波功率密度为:

$$E_{sr} = \frac{E_i A_e \cos\varphi T_a T_r \rho}{2\pi L^2} = \frac{2P_i T_i T_r T_a^2 \rho A_e \cos\varphi}{\pi^2 \theta_i^2 L^4} \quad (3)$$

则目标背景对比度为:

$$C = \left| \frac{I_r - I_{sr}}{I_r} \right| = \left| \frac{E_r - E_{sr}}{E_r} \right| = 1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\rho}{T_0} \right) \left(\frac{A_e}{A_e'} \right) \theta_i^2 \cos\varphi \quad (4)$$

式中 I_r 和 I_{sr} 分别为猫眼目标与漫反射目标的回波能量。当漫反射背景为小目标时,漫反射背景有效接收面积与猫眼目标有效接收面积的比值 $A_e'/A_e \approx 10^{-2}$, $1 - C \approx 1 - 10^{-6}$, 当漫反射背景为大目标时, $A_e' \approx \frac{1}{4} \pi R^2 \theta_i^2$, 取 $T_0 = 0.3$, $R = 1000$, $\rho = 0.2$, $1 - C \approx 1 - 10^{-2}$ 。此时目标对比度接近于 1, 探测系统很容易从漫反射背景中识别出猫眼目标, 但是当背景中存在镜面目标或者其它光学系统干扰时, 对比度会明显下降, 大大影响主动探测系统的探测能力, 因此, 目标背景也是影响“猫眼”光学窗口反侦察能力的重要因素之一。

1.3 猫眼光学系统自身参量

1.3.1 光学口径、焦距、光学透过率的影响 猫眼目标光学窗口是激光主动侦查系统探测目标的依据, 分析(2)式可知, 猫眼回波功率与猫眼系统有效接收面积、猫眼回波发散角、目标反射系数有很大关系, 而光学系统的口径、焦距、光学透过率直接决定了猫眼系统的有效探测接收面积、猫眼回波发散角和目标反射系数, 因此, 深入探究光学口径、焦距、光学透过率对猫眼效应的影响对于反侦察方法的研究具有重要意义。

因为无离焦的光学系统, 系统参量的改变不会影响猫眼回波发散角的大小。研究光学系统口径、焦距对猫眼光学系统反侦察能力的影响, 可以从其对有效接收面积的影响进行分析(分析过程当中, 考虑探测器观察位置的影响)。假设探测器偏离猫眼目标的量值关系用斜入射角度来表征, 表示探测器与猫眼目标的连线与猫眼光学系统光轴的夹角。由图 2 所示的几何关系可知:

$$A_e = 2 \left[\frac{D^2}{4} \arccos \frac{2f \tan \alpha}{D} - f \tan \alpha \sqrt{\frac{D^2}{4} - f^2 \tan^2 \alpha} \right] \quad (5)$$

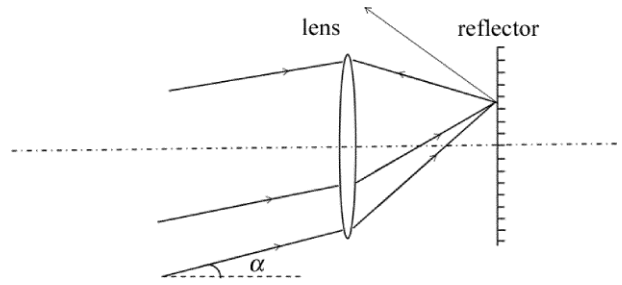


Fig.2 Simple model of cat-eye optical windows with detector deviating from cat-eye target

式中 D 为光学窗口的物镜口径 f 为系统焦距 α 为探测器偏离猫眼目标位置, 且 $\alpha = \arctan\left(\frac{D}{2f}\right)$ 为最大偏离角, 当 α 超过最大偏离角时, 无回波。

对(5)式进行数值仿真, 得到猫眼有效照射面积与物镜口径、焦距和探测器偏离角度之间的关系曲线如图 3 所示。由仿真结构可以看到, 上述 3 个参量对猫眼有效照射面积有很大的影响, 为研究反侦察策略提供了思路。

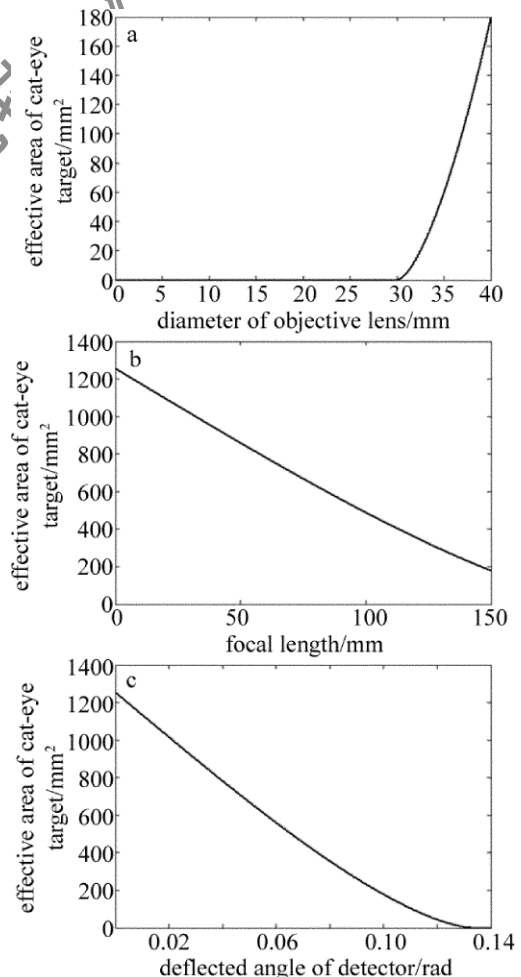


Fig.3 D , f and α vs. A_e

1.3.2 反射原件失调的影响 存在“猫眼”效应的

光电装备的光学窗口都具有可探测的反射面,可按照反射面的不同将光学窗口分为分划板类和光敏面类。反射原件位于物镜焦平面上,会存在离焦、倾斜、离轴等失调的情况^[8],LI 和 ZHANG 等人对离焦对猫眼效应的影响做了深入的研究,发现猫眼回波功率与反射面离焦量的平方近似成反比,正离焦情况下,反射面的前后移动引起猫眼目标有效接收孔径的减小以及回波发散角的增大,导致猫眼目标回波功率强度降低,负离焦情况下,离焦量的增大对猫眼目标有效接收面积没有影响,但会导致回波发散角的增大,使回波接收系统单位面积的能量减小,从而也将导致猫眼目标回波功率强度降低^[9-11]。

当反射面存在倾斜时,如图 4 所示,边缘入射光线会溢出物镜口径外,被光阑遮挡而损耗,因此猫眼系统有效接收面积会相应降低。图 5 反映了反射光斑在物镜平面的投影,相交部分即为猫眼系统的有效接收面积。

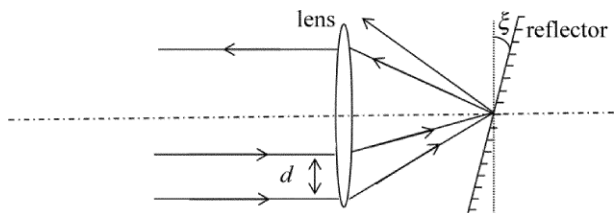


Fig. 4 Simple model of cat-eye optical windows with tilted reflector

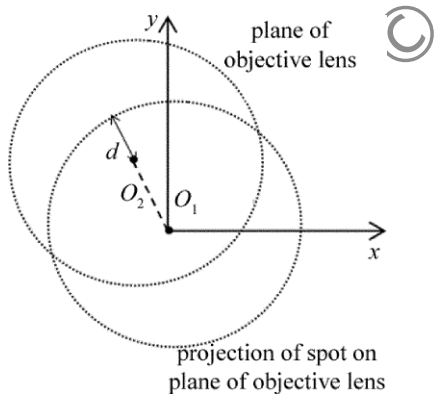


Fig. 5 Valid irradiated area of cat-eye system

由几何关系可知,猫眼系统的有效孔径 d 与反射面倾角的关系为:

$$f \cdot \tan(\arctan \frac{d}{f} + 2\xi) = \frac{D}{2} \quad (6)$$

式中 ξ 为反射面倾角,则猫眼系统的有效接收面积为:

$$A_e = 2 \left[\frac{\pi D^2}{4} \arccos \left[\frac{(D/2 - d)/2}{D/2} \right] - \right.$$

$$\left. \left(\frac{D/2 - d}{2} \right) \sqrt{\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{D/2 - d}{2} \right)^2} \right\} \quad (7)$$

由(6)式、(7)式可知,系统的有效接收面积与反射面倾角有关,因此,反射面倾角的改变必然会影 响猫眼效应的强弱。由此可见,通过改变猫眼光学原件的位置、倾角等参量,可以有效减少猫眼效应,降低被主动探测系统探测到的概率,可以从优化猫眼系统光学结构的方法入手研究反侦测策略。

1.3.3 色差的影响 光学系统一般都是针对特定光波波段进行设计和使用的。由于光学材料对不同波长的折射率存在差异,所以在透射式光学系统中存在色差现象。一般光学系统在其工作波段内色差会得到很好的校正。但是如果探测激光不在其工作波段范围内,经过光学系统折射后可能产生较大的色差,对猫眼效应造成较大影响。当处于光学系统工作波段外的探测激光入射到猫眼系统时,由于色差的存在,使得探测激光的焦点不是恰好落在光学系统的光敏面上,而是相对光敏面有一个轴向偏离,将光学系统的入射光束与反射光束对称展开^[12-13],其等效猫眼原理图如图 6 所示。

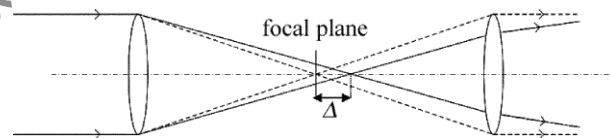


Fig. 6 Simple model of cat-eye optical windows in the condition of dispersion

可以看出,探测激光在猫眼系统产生的焦点偏移可以等效为猫眼系统光敏面相对于探测激光离焦,离焦量的大小与焦点偏移量相同,因此,光学系统色差的影响可以转化为离焦量对猫眼效应的影响,只要获得特定波长情况下系统的等效离焦量即可。一定波长的入射光透过光学玻璃的折射率可以通过 Schott 色散公式计算得到:

$$n^2 = a_0 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda^{-2} + a_3 \lambda^{-4} + a_4 \lambda^{-6} + a_5 \lambda^{-8} \quad (8)$$

式中 λ 为入射光波长 $a_0 \sim a_5$ 为待求系数。假设入射光线的矩阵表达式为 $L = \begin{bmatrix} y \\ n_0 \theta \end{bmatrix}$,其中 n_0 为空气折射率 y 为入射光线与光轴的距离 θ 为入射光线与光轴的夹角。光线经透镜第一表面,透镜介质,透镜第二表面的传输矩阵分别为:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n-n_0}{r_1} & 1 \end{bmatrix}, M_2 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{f_{\lambda_i}}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_0-n}{r_2} & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

则光线经透镜后的矩阵表达式为:

$$L' = \begin{bmatrix} y' \\ n_0 \theta' \end{bmatrix} M_3 M_2 M_1 L \quad (10)$$

式中 f_{λ_i} 为波长为 λ_i 的入射光焦距, r_1 和 r_2 为透镜前后表面的曲率。令 $y' = 0$, 则可以得到波长为 λ_i 的入射光与光轴的交点, 即得到焦距 f_{λ_i} 。则等效离焦量为:

$$\Delta = f_{\lambda_1} - f_{\lambda_2} \quad (11)$$

根据(11)式计算得到的等效离焦量, 便可根据现有研究^[8-9]对色散的影响进行分析。可见, 色差对于主动探测也具有一定的影响, 但是, 少数光电装备为了防止杂散光的影响, 内部设有滤光片, 如激光测距机、红外热像仪等, 对于这类光电系统的探测必须使用其工作波段内的探测激光, 否则不会形成明显的猫眼效应。

2 结论

从探测系统自身参量、环境因素、猫眼目标光学系统参量 3 个方面出发, 对影响“猫眼”光学窗口反侦测能力的因素进行了定性和定量分析。结果表明, 反侦测能力与探测激光发射功率、发射光学系统透过率、大气透过率、发射激光束发散角、大气能见度、目标背景对比度、光学口径、焦距、目标光学系统透过率、反射原件失调量、系统色差等因素有关。该研究对进一步根据影响因素建立反侦测能力评价模

型, 探索光电装备反侦测方法有很重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] ZHAO Y Zh, SUN H Y, SONG F H. Reflectivity test of cat eye effect with laser irradiating on optical lens [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(10): 1620-1622 (in Chinese).
- [2] GE Ch L, HUANG Z W, JI Y S, et al. Target classification with “cat eye effect” [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(7): 632-634 (in Chinese).
- [3] NOVICHKON N. Portable automatic device for optical and electronic countermeasures [J]. Arms Show News, 2005, 13(1): 27.
- [4] SUN H, GU S, NI G. The design of active laser detection system based on nonlinear optical effect [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 6029: 06291E1.
- [5] ZHANG B. Research of the optical window detection technology based on “cat eye effect” [D]. Shijiazhuang: Mechanical Engineering College, 2009: 6-7 (in Chinese).
- [6] QING G B, WANG X K, GUO Y, et al. Physical model of “cat eye effect” and its certification [J]. Laser Technology, 1995, 19(4): 244-248 (in Chinese).
- [7] WANG Y, FAN W, RAO R Zh. Analysis on the object-background contrast by numerical radiative transfer computation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(7): 848-852 (in Chinese).
- [8] TANG R, SHEN X J. Propagation properties of Gaussian beam passing through cat-eye optical systems with misaligned reticles [J]. Laser Technology, 2012, 36(2): 275-279 (in Chinese).
- [9] ZHANG B, NIU Y X, ZHANG Ch, et al. Analysis of influence factors for reflected wave power of “cat-eye” targets [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(3): 420-423 (in Chinese).
- [10] LI Sh G, CHENG Y B. Theoretical analysis on echo power of active laser reconnaissance based on “cat-eye” effect [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(s1): 80-83 (in Chinese).
- [11] ZHANG Ch X, SUN X Q. Influence of focal shift and detection beam parameters on cat-eye echo [J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26(1): 31-35 (in Chinese).
- [12] DOU X A, SUN X Q, ZHANG Ch X. Theory and experiment of influence of chromatic aberration on cat-eye system echo [J]. Electro-optic Technology Application, 2011, 26(2): 35-38 (in Chinese).
- [13] ZHAO Y Zh, SUN H Y, YU X Q, et al. Three dimensional analytical formula for oblique and of-axis gaussian beams propagating through a cat-eye optical lens [J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(3): 034101.