

# 基于探测光学表面反射光侦察远方观瞄器材

蒋治国, 樊洋

(海军工程大学理学院应用物理系, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 阐述了用激光扫描法侦察远方光学仪器的原理及实验技术。以红外光学系统和红外望远物镜为例, 运用矩阵光学追迹法对三种探测方法进行了对比研究: ①“猫眼效应”; ②“近似猫眼效应”; ③“剩余反射效应”。研究表明: 在野外环境, “猫眼效应”产生的回波概率极低。在适当条件下, “近似猫眼效应”和“剩余反射效应”的应用效果优于严格“猫眼效应”, 是具备实用价值的侦察手段。

**关键词:** 激光探测技术; 反射; 矩阵光学; 猫眼效应; 红外光学系统

**中图分类号:** TN977 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.09.002

## Distant optical equipment detection by detecting the reflection of optical surface

JIANG Zhi-guo, FAN Yang

(Department of Applied Physics, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The principle and experiment technique of detecting the hostile optical devices based on reflection are described in this paper. Three kinds of detecting method are researched contrastively by the method of ray tracing: ①the “Cat’s eye” effect; ②the similar “Cat’s eye” effect; ③the “surplus reflection” effect. Research results show that the probability of “cat’s eye” reflection is very low in the field environment. But in the right conditions, the probability of the similar “Cat’s eye” effect and the “surplus reflection” effect reflection is much bigger, which is of practical value for the combat field reconnaissance.

**Key words:** laser detect technique; reflection; matrix optics; “Cat’s eye” effect; infrared optical system

### 1 引言

用激光束扫描视场远方, 通过收集、探测激光回波, 判定远方光学望远镜、瞄准具的位置, 这种侦察原理在反恐和军事斗争中有重要实用价值。

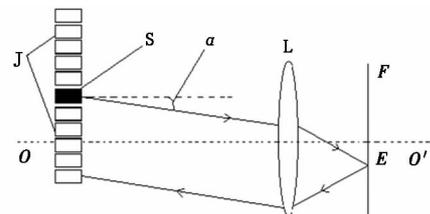
用激光束侦察远方观瞄器材的原理主要有三种: 利用“猫眼效应”和“近似猫眼效应”产生激光回波<sup>[1-4]</sup>, 以及利用光学元件“剩余反射效应”产生激光回波<sup>[5-6]</sup>。

本文用矩阵光学追迹法, 以红外光学系统和红外望远物镜为例, 对以上三种效应展开定量分析, 结果分述如下。

### 2 利用回波探测光学仪器的隐藏位置

主动式激光侦察装置如图1所示。扫描装置S向划定区域发射激光束。目标和背景所反射的激光信号由光电探测系统J接收。植物和土壤等产生的

背景回波通常较弱, 而被探测观瞄仪器产生的“猫眼反射”、“近似猫眼反射”和各镜面产生的“剩余反射”回波能量较强。这种回波差异是主动式激光侦



L - 物镜; S - 激光发射/扫描器; J - 回波探测器;  $\alpha$  - 入射角  
L-object lens; S-laser transmitter/scanner; J-detectors;  $\alpha$ -angle of incidence

图1 主动式激光侦察装置示意图

Fig. 1 schematic diagram of the laser detective setup

**作者简介:** 蒋治国(1977-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事光电信息处理。E-mail: 12345xyzabc54321@163.com

**收稿日期:** 2011-12-24

察装置发现光学仪器隐藏位置的依据。

### 3 “猫眼效应”产生的激光回波

#### 3.1 “猫眼效应”的应用价值

沿“猫眼反射”光路入射的激光,一定会沿入射方向返回发射点。遗憾的是,如图2所示,严格符合“猫眼效应”的反射光路仅一条(如光路A)。敌方观瞄器材的光轴指向无规可循,我方激光器正巧与敌方光轴形成“猫眼反射”,这种事件的概率极低。

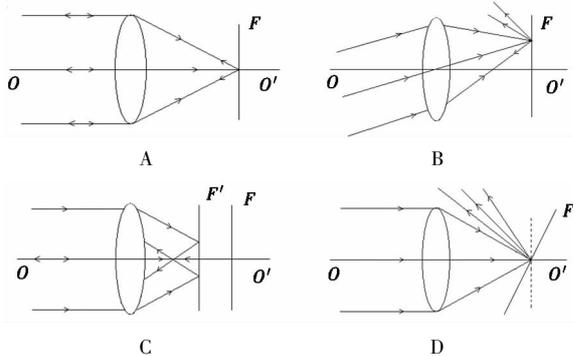


图2 “猫眼反射”光路示意图

Fig.2 the diagram of “Cat’s eye” reflection

在适当条件下,图2中光路B,C,D也能产生回波。本文将B,C,D称为“近似猫眼反射光路”。它们的回波与光路A有相似之处,具有一定的军用价值。

#### 3.2 “猫眼效应”回波的分析

##### 3.2.1 计算方法

扫描激光照射红外光学系统,光线透过系统中的各透镜,再经反射面反射后,又通过各透镜射出。以下运用矩阵光学追迹法分析“猫眼反射”光线在系统中的往返路径。

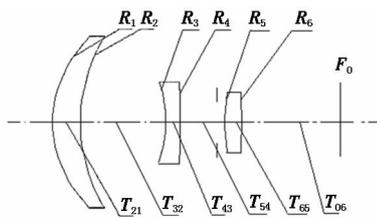


图3 红外光学系统结构示意图

Fig.3 Configuration of the infrared optical system

根据矩阵光学<sup>[7]</sup>,图3中各透镜的折射表面和光学间隔可表示为矩阵R和矩阵T:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n_1 - n_0)/r_1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n_0 - n_1)/r_2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n_2 - n_0)/r_3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n_0 - n_2)/r_4 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n_3 - n_0)/r_5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n_0 - n_3)/r_6 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{21} = T_{12} = \begin{bmatrix} 1 & d_1/n_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_{32} = T_{23} = \begin{bmatrix} 1 & d_2/n_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{43} = T_{34} = \begin{bmatrix} 1 & d_3/n_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_{54} = T_{45} = \begin{bmatrix} 1 & d_4/n_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{65} = T_{56} = \begin{bmatrix} 1 & d_5/n_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_{06} = T_{60} = \begin{bmatrix} 1 & \tau/n_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

反射面的反射矩阵  $F_0$  为:

$$F_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中,  $n_0$  为空气折射率;  $n_1, n_2, n_3$  分别为前三片透镜的折射率;  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$  分别为三片透镜的前、后曲率半径;  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$  为透镜厚度及透镜间的距离。图3中曲面6到系统焦平面的距离  $\tau = 29.41 \text{ mm}$ (以上参数引自《光学镜头手册》<sup>[8]</sup>)。在遵守符号规则(及下标编号规则)的前提下,以上公式不仅适用于由左向右传播的光路(例如常规透射光路),也适用于由右向左传播的光路(例如“猫眼反射”光路)。

光路由左向右传播经过反射和折射到达摄像管靶面的系统矩阵  $A_{61}$  为:

$$A_{61} = R_6 T_{65} R_5 T_{54} R_4 T_{43} R_3 T_{32} R_2 T_{21} R_1 \quad (1)$$

设入射光矩阵为  $L_i$ , 则回射(出射光)光矩阵为  $L_o$ :

$$L_o = R_1 T_{12} R_2 T_{23} R_3 T_{34} R_4 T_{45} R_5 T_{56} R_6 T_{60} F_0 T_{06} A_{61} L_i \quad (2)$$

##### 3.2.2 回波能量的估算方法

本文设光束截面内光线的密集程度与光束携带的能量成正比。定义“探测器接收光线比例  $\eta$ ”为从光学系统反射出来照在回波探测器J上的激光束中光线数目与从扫描装置S发射的进入此光学系统的激光束中光线总数的比值。在大气透过率、透镜透射率、衰减片透过率及反射面反射率( $\leq 5\%$ )等参数一定的条件下,用接收光线比例数  $\eta$  可以估计回波探测器J接收到的激光强度。

照射在回波探测器J上的光线数目的统计采用逐条光线追踪计数的方法<sup>[2]</sup>。例如追踪扫描光束中的一条光线,设其入射角为  $\alpha$ , 主动式探测装置离红外光学系统的距离为  $S$ , 回波探测器J的有效尺寸为  $H$ , 摄像管靶面(反射面)倾斜角为  $\theta$ , 离焦量为  $\Delta$ , 光学镜头相对孔径为  $\ddot{O}$ (由  $\ddot{O}$  可以计算出光学系统有效孔径为  $D = \ddot{O}f$ ), 进入光学系统时入射光线与光学系统光轴之间的距离为  $h$  ( $h$  在光学系统有效

孔径范围内),则入射光矩阵为  $L_i = [h \ \alpha]$ 。当此光线通过系统光学镜头后光线矩阵变为  $L_{i1} = AL_i = [h_1 \ \alpha_1]$ ,对其中的  $\alpha_1$  进行判断,若  $\alpha_1 \geq 0$ ,则  $\alpha_2 = \alpha_1 + \theta$ ,反之  $\alpha_2 = \alpha_1 - \theta$ ,此时光线  $L_{i1}$  的矩阵变为  $L_{i2} = [h_1 \ \alpha_2]$ ,光线  $L_{i2}$  经过光学间隔  $T$  (矩阵  $T$  中的  $t$  变成  $t + \Delta$ ) 射入摄像管靶面,再经靶面反射后反向传播,最后射出系统的光线矩阵为  $L_o = ATF_0L_{i2} = [h_2 \ \alpha_3]$ 。由扫描光束入射角  $\alpha$  和距离  $S$  可以得到回波探测器 J 的上下边界为  $[Stg(-\alpha) + H/2 \ Stg(-\alpha) - H/2]$ ,根据  $h_2$  的数值可以判断出射光线是否照在探测器 J 上,若照在探测器上则计数,反之不计数。

表1 接收光线比例  $\eta$  随摄像管靶面离焦、倾斜和光学镜头相对孔径的变化

Tab.1 the ratio  $\eta$  changes with defocusing, incline and relative aperture

Angle of incidence/rad	The relative aperture of object lens; $\bar{O} = 1:2$				$\Delta = 0 \text{ mm}$	
	$\eta_1/\%$ ( $\Delta = 0 \text{ mm}$ )	$\eta_2/\%$ ( $\Delta = 1 \text{ mm}$ )	$\eta_3/\%$ ( $\theta = 10'$ )	$\eta_4/\%$ (Spherochromatism)	$\eta_5/\%$ ( $\bar{O} = 1:8$ )	$\eta_6/\%$ ( $\bar{O} = 1:16$ )
0	100.00	5.11	0.78	28.49	68.53	38.56
0.10	88.69	5.06	0.35	15.99	54.73	9.46
0.20	47.37	4.92	0.34	9.68	9.46	0
0.30	16.05	4.67	0	5.26	0	0
0.40	0.73	0	0	2.34	0	0
0.50	0	0	0	0.67	0	0

从表1可以看出,在理想“猫眼效应”条件下 ( $\Delta = 0 \text{ mm}, \alpha = 0 \text{ rad}$ ),接收光线比例  $\eta_1 = 100\%$ ,随着扫描光束入射角  $\alpha$  的增大 ( $0 \rightarrow 0.4 \text{ rad}$ ),接收光线比例  $\eta_1$  急剧下降 ( $100.00\% \rightarrow 0.73\%$ )。摄像管靶面前离焦和倾斜时的接收比例变小 ( $\alpha = 0 \text{ rad}$  时  $\eta_2 = 5.11\%$ ),且随着入射角的增大而迅速减少 ( $5.11\% \rightarrow 0\%$ )。相对口径的变化也对接光线比例产生了很大的影响。

由以上分析可以得到结论:“猫眼效应”回波受到很多因素的影响,概率极低,通过此效应来侦察远方光学仪器,在现实中很难操作,需要探索其他方法。

#### 4 光学元件“剩余反射效应”产生激光回波

光学观瞄器材的元件虽然镀有增透膜,但各光学表面的反射率不可能为零。在外部激光照射下,光学器材内可能存在一条特殊反射路径,入射激光经该路径反射,光学器材的位置被该反射光束揭示出来。

##### 4.1 计算方法

用  $\lambda = 4.26 \times 10^{-6} \text{ m}$  的扫描激光射入图4红外望远物镜(其参数引自《光学镜头手册》<sup>[8]</sup>),除了发生“猫眼反射”外,更多的是发生焦平面以外的“剩余反射”,以下还是运用前述矩阵光学追迹

##### 3.2.3 计算结果与分析

如图1所示,设主动式探测装置离红外头光学系统的距离  $S$  为  $1000 \text{ m}$ ,假设进入此光学系统的扫描激光束由  $10000$  条平行光线组成,且光线在截面内呈均匀分布,并充满光学系统有效孔径。回波探测器 J 的有效尺寸为  $2 \text{ m}$ 。

应用公式(1)、式(2)分别计算,当入射角  $\alpha$  从  $0 \sim 0.50 \text{ rad}$  时,摄像管靶面(反射面)不离焦、后离焦(离焦量  $\Delta = 1 \text{ mm}$ )、反射面倾斜(倾斜角  $\theta = 10'$ )、相对孔径变化( $\bar{O}$  分别为  $1:8$  和  $1:16$ )等各种情况下的回波强度。计算结果如表1所示。

法分析此光学系统中前两片镜片上的反射光波的能量分布区域、强弱及影响因素(只考虑一次反射情况)。

如图4所示,入射激光射入红外望远物镜后,在第一和第二块透镜前、后表面上的反射光线分别为  $I_1, I_2, I_3$  和  $I_4$ ,显然只有经第一块透镜前表面反射的光束为发散光束,经其他表面反射的光束透过镜片后汇聚。

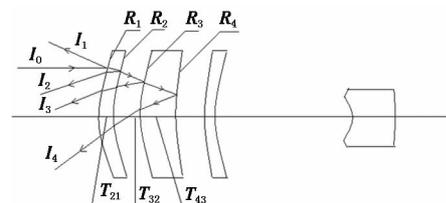


图4 红外望远物镜反射光路图

Fig.4 the reflection of the infrared optical system

用于侦察的光学镜头,虽然镜头内的镜片上都镀有增透膜,但是反射率不可能为零。沿  $I_1$  方向出来的反射光束,由于低反射率、大发散角,其能量随着传输距离的增大而迅速减弱,但覆盖区域却不断增大。沿  $I_2, I_3$  和  $I_4$  方向出来的反射光束经汇聚,最后叠加在一起,其能量较强,不容忽视。后面其他镜片的反射光束与多次反反射后射出的反射光束能

量极弱,可以忽略。

#### 4.2 计算结果与分析

如图 1 所示,设主动式探测装置离红外望远物镜的距离  $S$  分别为 100 m, 1000 m, 5000 m, 其他与第 3.2.3 节一样。前两片透镜共四个反射面所反射回波强度的计算结果如表 2 所示。

表 2 接收光线比例  $\eta$  随探测距离  $S$  和入射角  $\alpha$  而变化

Tab. 2 the ratio  $\eta$  changes with the distance of detector, and angle of incidence

Angle of incidence/rad	$\eta_7/\%$ ( $S=100$ m)	$\eta_8/\%$ ( $S=1000$ m)	$\eta_9/\%$ ( $S=5000$ m)
0	38.20	4.84	0.56
0.10	37.17	4.52	0.30
0.20	36.11	3.50	0.11
0.30	30.56	2.30	0
0.40	20.11	1.15	0
0.50	16.23	0	0

从表 2 可以看出,当测量距离  $S=100$  m、扫描光束入射角  $\alpha=0$  rad 时,回波能量较强,达到 38.44%,随着  $\alpha$  的增大(0~0.50 rad),不同探测距离的接收光线比例  $\eta_7, \eta_8, \eta_9$  缓慢减少。当入射角增大到 0.50 rad 后接收光线比例  $\eta_7$  还可达到 16.23%。当改变探测距离  $S$  时(100~5000 m),相同的入射角对应的接收光线比例也急剧变小(38.20%~0.56%)。

#### 5 结论

以红外光学系统和红外望远物镜为例,分析了光学观瞄器材在外部激光照射下,产生回波的物理图像。

研究表明:“猫眼效应”原则上可产生较强回波,但受影响因素较多,回波概率很低,不甚实用。而本文提出的“近似猫眼效应”和“剩余反射效应”,虽然回波强度稍弱,但是受影响因素少,回波强度较稳定,其回波被探测概率应该比严格“猫眼效应”高得多。

目前,国内已有较多文献报道“猫眼效应”在侦察上的应用。而未见公开发表文献讨论“剩余反射效应”在侦察方面的应用。“剩余反射效应”产生的回波因光学仪器的结构而异,不能笼统地说每台光学仪器均会产生可探测回波。但本文就典型物镜所作的分析表明,“剩余反射效应”的回波率在一般条件下高于猫眼效应。

上述结论的适用范围和准确程度,有待作者进一步用大量光学仪器的实验数据加以验证。

#### 参考文献:

- [1] Zhao Xunjie, Gao Zhiyun, Zhang Yingyuan. Technique of active laser reconnaissance and the applications in the military[J]. Optical Technique, 2003, 29(4): 415-417. (in Chinese)  
赵勋杰,高稚允,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.
- [2] Jiang Zhiguo, Tan Jichun, Liang Jing, et al. Suitability of “Cat’s eye effect” for reconnaissance by the scanning laser [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 549-551. (in Chinese)  
蒋治国,谭吉春,梁晶,等.“猫眼效应”用于主动式激光侦察的适用条件分析[J].激光技术,2005,29(5):549-551.
- [3] Jiang Zhiguo, Li Dingguo. Analyses and verification about influencing factors of “Cat’s eye effect” [J]. Optical Technique, 2008, 34(4): 6-7. (in Chinese)  
蒋治国,李定国.“猫眼效应”影响因素的分析与验证[J].光学技术,2008,34(4):6-7.
- [4] Qin Kai, Han Shaokun, Liu Jianhu. Evaluation and analysis to the “Cat’s Eye” effect in typical optical observation window [J]. Optical Technique, 2010, 36(3): 391-394. (in Chinese)  
秦楷,韩绍坤,刘建虎.典型光学观瞄窗口的“猫眼”效应特性评价与分析[J].光学技术,2010,36(3):391-394.
- [5] Tan Jichun, Jing Feng, Zhu Qihua, et al. Straylight inside multi-pass laser cavity of the sg-III prototype module [J]. High power laser and particle beams, 2000, 12(2): 159-163. (in Chinese)  
谭吉春,景峰,朱启华,等.多通放大器腔内的杂散光[J].强激光与粒子束,2000,12(2):159-163.
- [6] Liang Jing, Tan Jichun. Eliminating the damage of pencil beam by the misaligned optical lens system. High power laser and particle beams [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 528-532. (in Chinese)  
梁晶,谭吉春.基于光路失调原理消除笔形光束的危害[J].激光技术,2005,29(5):528-532.
- [7] Zhu Qingchun, Chen Shisheng. Introduction of optical matrix [M]. Shanghai: Shanghai Publishing House on Literature of Science and Technology, 1991: 15-18. (in Chinese)  
竺庆春,陈时胜.矩阵光学导论[M].上海:上海科学技术文献出版社,1991:15-18.
- [8] Translated and compiled by Fujian Research Institute on Optical Technology. Handbook of optical lens [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1980: 34. (in Chinese)  
福建光学技术研究所编译.光学镜头手册[M].北京:国防工业出版社,1980:34.