

文章编号: 1001-3806(2005)05-0549-03

“猫眼”效应用于主动式激光侦察的适用条件分析

蒋治国, 谭吉春*, 梁晶, 曹丁象, 张丽强

(国防科学技术大学 理学院 光电工程系, 长沙 410073)

摘要: 阐述了用激光主动扫描法侦察远方(隐蔽的)观察、瞄准仪器的原理及实验技术。以红外物镜为例, 运用矩阵光学追迹法对影响“猫眼”效应回波强度的因素作定性、定量分析。研究表明, 回波强度受光学仪器内部反射面倾斜和离焦的影响较大, 扫描光束的入射角和物镜相对孔径等因素对回波强度也有一定影响。例如在主动扫描装置距被探测观瞄仪器约 1000m, 扫描光束的入射角为 0.3rad 条件下, 反射面离焦及倾斜使得侦察装置接收到的回波能量与发射脉冲能量之比由理想条件下的 3.3% 分别下降到 0.03% 和 0.016%。

关键词: 激光探测技术; 隐藏光学仪器; 反射; “猫眼”效应; 矩阵光学

中图分类号: TN977 **文献标识码:** A

Suitability of “Cat’s eye” effect for reconnaissance by the scanning laser

JANG Zhi-guo, TAN Ji-chun, LIANG Jing, CAO Ding-xiang, ZHANG Li-qiang

(Department of Optical Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The principle and experimental technique of hiding optical instruments detection based on “Cat’s eye” effect were described. The factors that influence the intensity of the reflection wave were analyzed both quantitatively and qualitatively with the method of ray tracing. Research results show that the incline and defocusing of reflection plane in optical instrument (such as telescope and camera) reduce the intensity of the “Cat’s eye” reflection. For example, the ratio of the reflection energy of optical instrument and the pulse energy of scanning laser decreases from 3.3% (under the ideal reflection condition) to 0.03% (for the defocusing) and 0.016% (for the incline) respectively, while the distance between the laser scanning setup and infrared camera is 1000m and the incidence angle of scanning laser is 0.3rad.

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

引 言

用激光束扫描前方阵地, 通过收集和检测激光回波, 可判定远方观察、瞄准仪器的隐藏位置。这种主动式侦察原理在反恐和军事侦察中有重要实用价值^[1]。笔者用矩阵光学追迹法分析主动式侦察装置发射光束在被探测仪器光路中的透射、反射路径, 对影响“猫眼”反射效应回波的主要因素开展定性、定量的分析。

1 利用“猫眼”反射效应探测光学仪器的隐藏位置

如图 1a 所示, 入射光线 I 经过物镜 L 会聚在光学仪器的焦平面 F 上, 若反射面(例如, 分划板、摄像机光敏面等)位于 F 处, 入射到 E_0 点的光线将沿 I' 返回。斜入射光线 I_1 则沿 I_1' 方向返回。这种能使反射

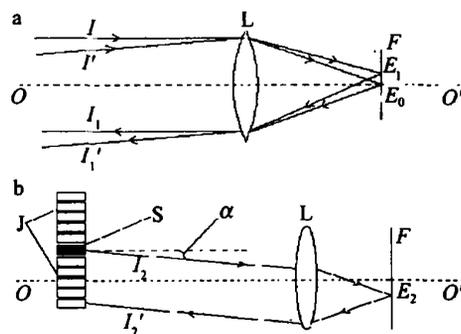


Fig 1 Hiding optical instruments detection based on the “Cat’s eye” effect
a—“Cat’s eye” reflection b—diagram of the laser detective setup

光按入射方向返回的光路被称为“猫眼”反射光路。

主动式激光侦察装置如图 1b 所示。图 1b 中 L 是物镜, S 为激光发射/扫描器, J 为回波探测器, α 为入射角。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”反射波较强。这种回波差异是主动式激光侦察装置发现光学仪器隐藏位置的依据。

作者简介: 蒋治国 (1977-), 男, 硕士研究生, 从事光电技术科研工作。

* 通讯联系人。E-mail: tanjichun@hotmail

收稿日期: 2004-06-03; 收到修改稿日期: 2004-09-10

2 影响“猫眼”反射回波强度的因素

基于“猫眼”效应的后向反射器是一种技术成熟的实验器件,经过精加工和调校,这类实用器件有很高的后向反射率。

尽管军用观瞄仪器中形成后向反射的原理与上述实用型后向反射器有可比性,但普通观瞄仪器的光学系统存在各种加工误差(即便是“优质”产品,仍存在国家标准允许范围内的公差)。影响“猫眼”反射波强度的因数主要有:扫描光束的强度及入射角,被探测仪器内部反射面面积和反射率,反射面离焦和倾斜,物镜视场角和相对孔径、像差等。

2.1 反射面离焦

由于装配和元件加工误差等原因,光学仪器内的分划板、摄像机光敏面不一定正好位于焦平面上(即存在轻微“离焦”)。如图 2 所示,光学仪器的反射面 P 位于焦平面 F 左方(前离焦)。入射光线 I_3 经物镜 L 聚焦,与反射面 P 交于 E_3 点,再沿 I_3' 方向射出。由几何光学可知,离焦使反射光线 I_3' 和 I_4' 的方向有别于图 1a 中光线 I 和 I_4 的方向,对“猫眼”回波的能量及空间分布产生很大的影响。

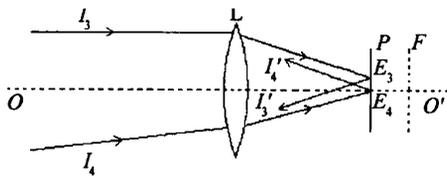


Fig 2 The “Cat’s eye” reflection in the condition of defocusing (reflection plane P is in lift of the ideal focal plane F)

2.2 反射面倾斜

光学仪器内的反射面不一定完全与光轴垂直。如图 3 所示,反射面 P 与焦平面 F 的夹角为 θ 。入射光线 I_5, I_6, I_7 过会聚点 E 后成为发散光束,照在反射面 P 上。由图 3 知, E 点位于光轴 OO' 之外,反射面倾斜包含反射面“离焦”和“旋转”两个因素,此时反射光线 I_5', I_6', I_7' 的空间分布较图 1 和图 2 有较大偏移。

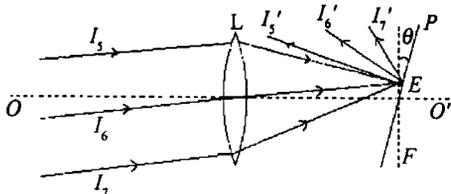


Fig 3 The “Cat’s eye” reflection in the condition of incline (θ is the rotating angle of reflection plane P relative to the ideal focal plane F)

光学仪器还存在像差(在此只讨论球面像差)。球差随着入射光的入射角而变,对回波的影响与反射面倾斜类似。

3 分析“猫眼”效应回波的方法

3.1 “猫眼”反射光线追迹

激光照射红外光学系统见图 4,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”反射光线在仪器中的往返路径。

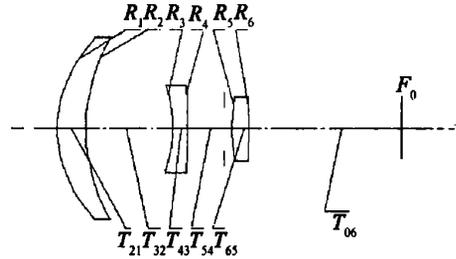


Fig 4 Configuration of the infrared optical system

根据矩阵光学^[2],图 4 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 :

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n_1 - n_0)/r_1 & 1 \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n_0 - n_1)/r_2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n_2 - n_0)/r_3 & 1 \end{bmatrix}, R_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n_0 - n_2)/r_4 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n_3 - n_0)/r_5 & 1 \end{bmatrix}, R_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n_0 - n_3)/r_6 & 1 \end{bmatrix},$$

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

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

$$T_{65} = \begin{bmatrix} 1 & d_5/n_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, T_{06} = \begin{bmatrix} 1 & \tau/n_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

反射面的反射矩阵 F_0 为: $F_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。式中, n_0 为空气折射率; n_1, n_2, n_3 分别为 3 片透镜的折射率; $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$ 分别为 3 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 4 中曲面 6 到系统焦平面的距离 $\tau = 29.41\text{mm}$ (以上参数引自文献 [3])。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)。

由左向右传播的系统矩阵 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 “猫眼”反射回波能量的估算方法

在一定条件下,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 η ”为从光学仪器反射出来照在回波探测器 J 上的光线数

目与进入此光学仪器的光线总数的比值。在大气透过率、透镜透射率及反射面反射率 ($\leq 5\%$) 等参数一定的条件下,用接收光线比例数 η 可以估计回波探测器 J 接收到的激光强度。

3.3 计算结果

主动式探测装置离红外光学系统的距离为 1000m,假设扫描光束由 10000 条平行光线组成 (光线在截面内呈均匀分布,充满光学系统有效孔径)。回波探测器 J 的有效尺寸为 2m。

以下根据 3.1 节中对入射光线的追迹结果,定量分析反射面离焦、倾斜、及物镜球差、相对孔径对回波强度的影响。

3.3.1 反射面离焦对回波强度的影响 取离焦量 Δ 为分划板的厚度 (2mm),应用 (1) 式、(2) 式计算不离焦、前离焦 (见图 2)、后离焦 3 种情况。结果见表 1。

Table 1 The ratio η in the condition of defocusing

angle of incidence / rad	$\eta_0 / \%$	$\eta_1 / \%$	$\eta_2 / \%$
	($\Delta = 0\text{mm}$)	($\Delta = -2\text{mm}$)	($\Delta = 2\text{mm}$)
0.10	88.69	5.06	5.06
0.30	66.05	4.67	4.67
0.50	43.41	3.93	3.94

the relative aperture of object lens: $f/D = 2$

从表 1 可以看出,反射面不离焦时,接收光线比例 η_0 ($\Delta = 0$) 是离焦时的 10 倍以上。随着扫描光束入射角的增大 (0.1 rad ~ 0.5 rad),接收光线比例 η_0 下降约一半 (88.69% ~ 43.41%)。前离焦与后离焦时的接收比例差别微小。

3.3.2 反射面倾斜及物镜球差、相对孔径对回波强度的影响 如图 3 所示,设反射面倾斜角 $\theta = 10^\circ$,计算入射角为 0.10 rad, 0.20 rad, 0.30 rad 时的 3 种情况。计算结果列于表 2。

Table 2 The ratio η changes with incline, spherochromatism and relative aperture (f/D)

angle of incidence / rad	$\eta_3 / \%$	$\eta_4 / \%$	$\eta_5 / \%$	$\eta_6 / \%$
	($\theta = 10^\circ$)	(spherochromatism)	($f/D = 8$)	($f/D = 16$)
0.10	0.35	15.99	54.73	9.46
0.20	0.34	9.68	9.46	0
0.30	0.32	5.26	0	0

从表 2 可以看出,反射面倾斜比球差对回波强度的影响更大。反射面倾斜时,接收光线比例 η_3 小至 0.30% 左右,使得探测器难以收到回波信号。

假设光学仪器的焦距不变,如表 2 所示,物镜相对孔径对“猫眼”效应有很大的限制。减小相对孔径 (即缩小仪器的口径),回射光线数目随之减少,越难以产生“猫眼”反射效应。相对孔径为 8 和 16 时,入射光入射角分别为 0.30 rad, 0.20 rad 时,到达探测器的回波

信号近似为 0。

3.3.3 反射面面积及探测波束入射角 α 对回波强度的影响 假设观瞄仪器的视场角分别为 0.70 rad 和 0.35 rad,追踪边沿光线,计算得到反射面的半径为 18.57mm 和 8.99mm。反之,也可以根据反射面的面积求出仪器的视场角大小。在“猫眼”反射光路中,反射面面积的大小对斜入射光束 (边沿光线) 的回波强度影响很大。

只有扫描光束位于物镜视场角范围以内,才有可能产生“猫眼”反射。随着扫描光束入射角 α 的增大,回波的空间分布区域及光强均会发生很大的变化。探测装置离被探测的光学仪器的距离越远,探测器接收光线比例越小。

4 结论

分析了观瞄器材在外部激光照射下,产生回波的物理图像,定量估算了影响“猫眼”效应回波强度的主要因素。光线追踪的结果表明:仪器内部反射面 (分划板,摄像机光敏面等) 倾斜和离焦对回波强度影响较大。当反射面偏离理想位置时,探测器难以接收到足够强的“猫眼”回波信号。

检索结果显示:国内已有较多文献讨论“猫眼”效应应用于侦察的设计方案^[1]。这些文献假设敌方仪器为理想“猫眼”光路,反射的回波较强。而在实际应用中,敌方反射面严格构成后向反射光路,我方探测器正好位于回波最强的有利位置,这两个条件通常不易同时满足。

研究表明:“猫眼”效应用于主动式激光侦察的适用条件较为苛刻。回波强度容易受到侦察环境 (例如,探测方和被探测方相对位置) 和仪器装配误差 (例如,反射面倾斜、离焦) 等因素的影响。只有理想“猫眼”反射光路能产生较强回波。

在探测装置位于光学仪器的视场角内时,原则上能收到回波。但是,如果回波散布的空间范围较大,由于探测器阵列的横向尺寸有限,光学仪器反射的激光未必能全部进入回波探测装置。主动式探测装置因回波较弱等原因而被迫多次扫描敌方阵地,则自身暴露的风险必然增大。因此,在研制主动式侦察装置时,深入分析“猫眼”效应的适用条件显得很有必要。

参考文献

- [1] 赵勋杰,高稚允,张英远. 基于“猫眼”效应的激光侦察机及其在军事上的应用 [J]. 光学技术, 2003, 29 (4): 415~417.
- [2] 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. 31~67.
- [3] 福建光学技术研究所. 光学镜头手册 [M]. 北京:国防工业出版社, 1980. 34.