

·光电探测·

## 色差对猫眼系统回波影响的理论与实验

豆贤安,孙晓泉,张创新

(脉冲功率激光技术国家重点实验室,安徽 合肥 230037)

**摘要:**利用光学窗口“猫眼效应”进行的激光主动探测易受探测激光波长的影响。建立透射式光学系统猫眼效应的色差理论模型,分析了由探测激光波长与透射式猫眼系统工作波段不匹配所产生的色差对激光主动探测的影响,并设计实验对理论分析结果进行验证。结果表明:由探测激光波长与透射式猫眼系统工作波段不匹配产生的色差,使猫眼系统的焦点发生偏移,导致激光主动探测的回波发散角明显增大、回波接收功率显著降低。得出结论:在对透射式猫眼系统进行激光主动探测中,探测激光波长应与猫眼系统的工作波段相匹配。

**关键词:**激光主动探测;猫眼效应;色差;焦点偏移

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)02-0035-04

## Theory and Experiment of Influence of Chromatic Aberration on Cat-eye System Echo

DOU Xian-an, SUN Xiao-quan, ZHANG Chuang-xin

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Using optical window cat-eye effect, the laser active detection is easily influenced by laser wavelength. A chromatic aberration theoretical model of the transmission-type cat-eye effect is established. The detecting laser wavelength doesn't match with the operating band of transmission-type cat-eye system, which generates the chromatic aberration, so the influence of chromatic aberration on laser active detection is analyzed. An experiment is designed to validate the theoretical analysis results. The results indicate that the generated chromatic aberration results in the focus shift, the echo divergence angle is obviously increased and the received echo power is decreased. The conclusion is that the detecting laser wavelength should match with the operating band of the transmission-type cat-eye system.

**Key words:** laser active detection; cat-eye effect; chromatic aberration; focus shift

在透射式光学系统中,如果探测激光波长与其工作波段不匹配,将会产生较大的焦点偏移。文中主要针对探测激光波长与猫眼系统工作波段不匹配对探测效果的影响进行研究。通过建立透射式猫眼系统的色差模型,分析由探测激光波长与透射式猫眼系统工作波段不匹配所带来的焦点偏移的大小,及其对回波发散角、回波接收功率等参数的影响程度<sup>[1-3]</sup>,并设计实验对理论分析结果进行了实验验证。

### 1 理论分析

#### 1.1 模型建立

光学系统一般都是针对特定光波段设计和使用的。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,对激光主

收稿日期:2011-01-06

作者简介:豆贤安(1983-),男,安徽六安人,博士研究生,主要从事光电技术方面的研究。

动探测的效果造成较大影响。

在激光主动探测中,由于探测的目标距离较远,猫眼系统的口径远小于探测激光在目标处的截面,因此可以将探测激光看成是能量均匀分布的平行光。光学系统是由光学镜头与探测器构成的<sup>[4,5]</sup>。当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<sup>[6,7]</sup>,其猫眼效应的等效原理图如图1所示。

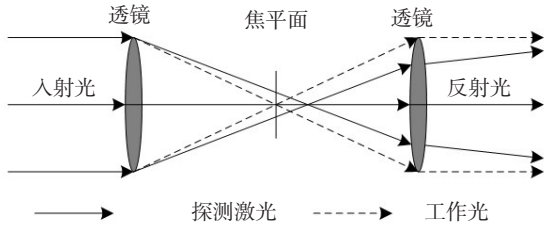


图1 色差光学系统猫眼效应等效原理图

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。

## 1.2 焦点偏移分析

从本质上讲,光学镜头由一系列光学表面和填充在光学表面之间的光学介质构成的。大多数光学镜头表面都是球面或平面,镜片材料也大都使用光学玻璃,其结构如图2所示。

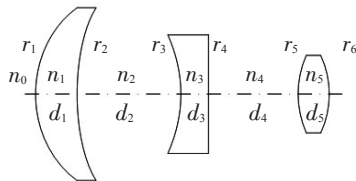


图2 光学镜头的结构示意图

其中,  $r_i$  为光学表面的曲率半径;  $d_i$  为相邻光学表面的顶点距离;  $n_i$  为光学介质的折射率。

以图2所示的光学镜头为例,根据矩阵光学理论<sup>[8]</sup>,光线的矩阵表达形式为

$$L = \begin{bmatrix} y_i \\ n_i \theta_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $y_i$  为光线离光轴的高度;  $\theta_i$  为光线与光轴的夹角;  $n_i$  为光学介质的折射率。

光线经过球面折射的传输矩阵为

$$R_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_{i-1} - n_i}{r_i} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

光线在同种介质中直线传播的传输矩阵为

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & d_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

则整个光学镜头的传输矩阵  $M$  为

$$M = R_6 T_5 R_5 T_4 R_4 T_3 R_3 T_2 R_2 T_1 R_1 \quad (4)$$

假设入射光线矩阵为  $L_i$ , 经过光学镜头后传输到距离  $l$  处与光轴相交, 则交点处光线的矩阵  $L$  为

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} M L_i \quad (5)$$

由于光线在交点处离轴高度为零, 所以有

$$L_{0,0} = 0 \quad (6)$$

对于一个确定的光学镜头, 其结构参数  $r_i$  和  $d_i$  是确定的。只有其光学介质的折射率是随波长变化而变化的。假设光学系统工作波段的主波长为  $\lambda_c$ , 在各光学介质中的折射率为  $n_{ci}$ 。探测激光的波长为  $\lambda$ , 在各光学介质中的折射率为  $n_{si}$ 。在实际应用中光学玻璃对不同波长的折射率可以通过 Schott 色散公式<sup>[9]</sup>进行计算

$$n^2 = a_0 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda^{-2} + a_3 \lambda^{-4} + a_4 \lambda^{-6} + a_5 \lambda^{-8} \quad (7)$$

其中的常数  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 、 $a_5$  可以在大部分的玻璃手册中查到。分别代入波长  $\lambda_c$ 、 $\lambda$ , 计算出相应的折射率  $n_{ci}$ 、 $n_{si}$ 。于是得出光学镜头对相应波长的传输矩阵  $M_c$ 、 $M_s$ 。当光线平行正入射到光学镜头时, 由式(5)、式(6)可以求出波长  $\lambda_c$  和  $\lambda$  的光在光学系统中对应的焦距  $f_c$  和  $f_s$ 。所以光学系统中探测激光的焦点偏移  $\delta$  为

$$\delta = f_s - f_c \quad (8)$$

## 1.3 焦点偏移对猫眼回波的影响

由以上分析知道, 用波长为  $\lambda$  的激光对主工作波长为  $\lambda_c$  的光学系统进行探测时, 会产生  $\delta$  的离焦。假设光学系统的口径为  $D$ , 焦距为  $f$ , 探测激光发散角为  $\theta_i$ , 从  $\theta$  角度入射到猫眼系统, 则猫眼系统的有效口径  $D'$  和回波发散角  $\theta_r$  分别为<sup>[5]</sup>

$$D' = (D - 2f \tan \theta) \frac{f + \delta}{f + 2\delta} \quad (9)$$

$$\theta_r = \theta_i + \frac{2\delta}{f^2} (D - 2f \tan \theta) \frac{f + \delta}{f + 2\delta} \quad (10)$$

## 2 实验测量

### 2.1 实验设计

实验采用红外激光对目视光学系统进行探测,考察由探测激光波长与猫眼系统工作波段不匹配所带来的焦点偏移对回波接收功率的影响程度。实验原理如图3所示,激光器发出的激光经过准直扩束后,透过半透半反镜正入射到较远处的猫眼系统中。反射回波经半透半反镜反射后,经一个透镜汇聚到功率计的探头上。

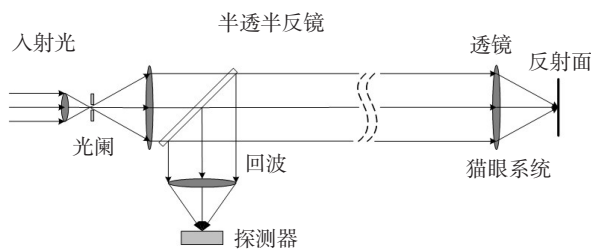


图3 实验原理图

实验中猫眼系统由单透镜与反射镜组成,反射镜到透镜的距离可以调节。实验使用波长为532 nm的绿色激光,准直扩束后正入射到猫眼系统,调节猫眼系统的反射镜的前后距离,使回波光束基本平行,此时反射镜恰好处于532 nm波长对应的焦平面处,以此模拟光学系统中的目视装置。记录反射镜的位置。将532 nm波长的激光器替换为980 nm波长的激光器,测量入射光功率和回波接收功率。再调节猫眼反射面的位置,使回波光束基本平行,此时反射镜处于980 nm激光对应的焦平面处。再记录反射镜的位置,并测量此时的入射光功率和回波接收功率。

实验中控制入射光的直径为20 mm。激光发射端距猫眼系统的距离 $R$ 为8 m。半透半反镜的直径 $D$ 为30 mm。猫眼镜头为前后表面曲率半径 $r$ 均为155 mm的双凸透镜,中心厚度 $d$ 为6 mm、焦距 $f$ 为150 mm,材料为BK7玻璃。

### 2.2 数值计算

BK7玻璃的Schott色散公式中的常数为<sup>[9]</sup>: $a_0=2.270\ 455$ ;  $a_1=-9.974\ 833 \times 10^{-3}$ ;  $a_2=1.046\ 838 \times 10^{-2}$ ;  $a_3=2.270\ 455 \times 10^{-4}$ ;  $a_4=-2.170\ 602 \times 10^{-5}$ ;  $a_5=1.426\ 570 \times 10^{-6}$ 。由Schott色散公式可以计算出: $n_c=1.519\ 005\ 2$ ;  $n_s=1.507\ 334$ 。按1.2节中所阐述的方法,求出焦点偏移 $\delta$ 为3.43 mm。

由于实验中激光准直得较好,发散角很小,再加上测试距离较近,所以目标处的光斑直径比猫眼镜头的口径小很多,猫眼反射面反射的光线可以全部通过镜头,因此猫眼镜头的有效口径 $D$ 应该为20 mm。回波到达猫眼透镜处的光斑直径 $D_{\text{cat}}$ 由式(9)计算得20.45 mm,回波发散角 $\theta_r$ 由式(10)计算得5.96 mrad。则回波在半透半反镜处的光斑面积 $S_{\text{cat}}$ 为

$$S_{\text{cat}} = \frac{\pi}{4} (D_{\text{cat}} + \theta_r R)^2 \quad (11)$$

代入数值计算得 $S_{\text{cat}}$ 为3 646 mm<sup>2</sup>。由于半透半反镜倾斜45°放置,所以它能用于接收回波的有效面积 $S_r$ 为

$$S_r = \frac{1}{4} \pi D_r^2 \cos 45^\circ \quad (12)$$

代入数值计算的 $S_r$ 为500 mm<sup>2</sup>。所以对目视光学系统探测的回波接收功率 $P_r$ 为

$$P_r = P_i \eta \rho \frac{S_r}{S_{\text{cat}}} \quad (13)$$

其中, $\eta$ 为接收光学系统的收集系数; $\rho$ 为猫眼系统反射面的反射率。

当调节猫眼反射镜到980 nm的焦平面时,回波光束基本保持平行,半透半反镜基本将回波全部接收,所以此时的回波接收功率 $P_{rs}$ 为

$$P_{rs} = P_i \eta \rho \quad (14)$$

用目视光学系统的回波接收功率 $P_r$ 与猫眼系统反射面调整到980 nm焦平面时的回波接收功率 $P_{rs}$ 之比 $\epsilon$ ,来衡量由探测激光波长与猫眼系统工作波段不匹配所带来的焦点偏移对回波接收功率的影响程度

$$\epsilon = \frac{P_r}{P_{rs}} \quad (15)$$

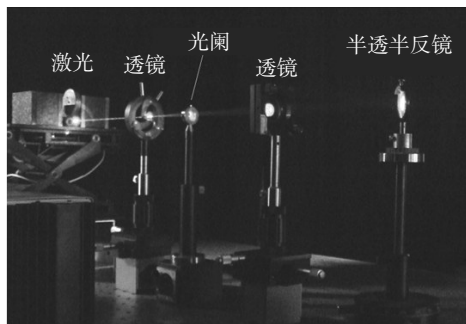
代入数值可以计算出 $\epsilon$ 为13.7%。

数值计算结果表明:980 nm的近红外探测激光在目视光学系统中会产生较大的焦点偏移,导致回波发散角显著增大,使回波接收功率明显下降。

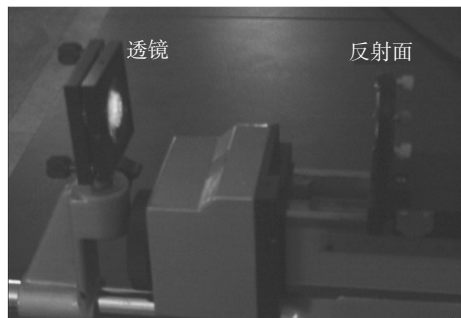
### 2.3 实验结果及分析

实验装置的照片如图4所示。实验中探测激光波长为980 nm,实验数据如表1所示。第一次测量: $\delta$ 为3.80 mm, $\epsilon$ 为8.4%;第二次测量: $\delta$ 为3.86 mm, $\epsilon$ 为8.6%。

两次测量的结果显示:实测的2个波长焦点偏移值比理论值大,实测的由焦点的偏移造成的回波



(a) 激光主动探测装置



(b) 猫眼系统装置

图4 实验装置照片

表1 实验数据

测量次序	反射面距离 $l/\text{mm}$	入射光功率 $P_i/\mu\text{W}$	回波接收功率 $P_r/\mu\text{W}$
第1次 测量	46.63	2.13	0.08
	50.43	2.13	0.95
第2次 测量	46.63	1.74	0.08
	50.49	1.74	0.93

功率衰减程度也比理论值大。经过分析认为实验误差的主要原因有:

(1) 猫镜头使用的是像差较大的双凸透镜,像差造成焦点模糊,所以在确定焦点时,会产生一定的误差。加上在猫眼反射面来回调节过程中的回程误差都会使焦点偏移的测量结果存在一定的误差。

(2) 实验中采用平行光正入射的方式照射猫眼,镜头的像差主要表现为球差。球差会导致回波发散角增大。当反射面处于焦平面时,回波能被全部接收,所以测量的 $P_r$ 值基本不受球差影响。但是当反射面处于离焦状态时,回波截面大于半透半反镜的接收截面,球差引起的回波光束发散进一步减小了回波功率密度,使得实验中测得 $R$ 的 $P_r$ 比理论值偏小。所以实验中得出的 $\epsilon$ 比理论值要小。

总体上来说实验结果与理论分析基本吻合。由实验结果可以看出,在对透射式光学系统的激光

主动探测中,如果探测激光波长与猫眼系统工作波段不匹配会产生较大的焦点偏移,导致回波发散角明显增大、回波接收功率显著降低,不利于激光主动探测。如果所探测的猫眼系统是离焦的,且离焦方向与焦点偏移方向一致,焦点偏移从某种程度上可以抵消一部分离焦量,从而减小回波发散角,增大探测功率,有利于激光主动探测。

### 3 结束语

针对激光主动探测中,探测激光波长与透射式猫眼系统工作波段不匹配对探测效果的影响进行了研究。理论分析和实验测量的结果表明,如果探测激光的波长与透射式猫眼系统工作波段不一致,探测激光在光学系统的焦点会发生较大的偏移,导致激光主动探测的回波发散角明显增大、回波接收功率显著降低。因此,在对透射式猫眼系统进行激光主动探测中,探测激光波长应与猫眼系统的工作波段相匹配。

### 参考文献

- [1] Cojan, Yves, Fertala, et al. Method and system for protecting optoelectronic search and tracking equipment from an illumination[P]. United States Patent: 6194723, 2001.
- [2] Mazerolle, Denis, Puech, et al. System for the reduction of laser equivalent surface and for optical protection[P]. United States Patent: 6097527, 2000.
- [3] 孙晓泉,吕跃广. 激光对抗原理与技术[M]. 北京: 解放军出版社, 2000: 116-117.
- [4] 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): 449-551.
- [5] 赵延仲,孙华燕,宋丰华,等. 离焦量对“猫眼效应”反射特性的影响[J]. 激光技术, 2008, 32(1): 71-74.
- [6] 葛成良,黄志伟,季云松,等. 基于“猫眼效应”的目标识别[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(7): 632.
- [7] 卿光弼,王学楷,郭勇,等. 猫眼效应的物理模型及证明[J]. 激光技术, 1995, 19(4): 244.
- [8] 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.
- [9] ZEMAX Development Corporation. ZEMAX Optical Design Program User's Guide [EB/OL]. <http://www.zemax.com>, 2005-02-03.