

基于矩阵光学的猫眼效应回波特性模型

武东生 刘秉琦 胡文刚 刘 杰 应家驹

机械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003

摘要 以基于猫眼效应的激光主动探测为应用背景, 针对以往几何光学分析方法研究猫眼效应回波特性中存在的不足, 从矩阵光学入手, 提出了光学窗口映射的光束传输分析方法, 建立了光学系统离焦和光束斜入射条件下猫眼效应回波的形状和能量模型, 解决了传统公式中发散角物理意义不正确和无法准确预知回波空间范围的问题。通过搭建模拟的理想猫眼光学系统对模型进行了实验验证, 实验结果与模型计算结果符合得很好。该模型及相关结论对于基于猫眼效应的激光主动探测及其防护技术研究具有重要的参考价值。

关键词 几何光学; 矩阵光学; 猫眼效应; 回波形状; 回波能量

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0608001

Echo Characteristics Model of Cat-Eye Effect Based on Matrix Optics

Wu Dongsheng Liu Bingqi Hu Wengang Liu Jie Ying jiaju

Department of Electronic and Optics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China

Abstract The active laser detection based on cat-eye effect is used as the application background, according to the defect of usual analytical method to research the cat-eye effect echo characteristics. The analytical method of optical window mapping is proposed to analyze beam transformation via matrix optics, and the model of echo shape and energy is built on the condition that the reflecting element is defocused and the incident beam is not normal incidence. It resolves the problem that the physical significance of echo divergence angle is wrong and the echo spatial dimension cannot be figured out. The theoretical model is certificated by experiment through setting the ideal cat-eye optical system. The calculation results are in good agreement with the experimental results. The proposed model and related results are very important to develop active laser detection and anti-detection technology based on cat-eye effect.

Key words geometric optics; matrix optics; cat-eye effect; echo shape; echo energy

OCIS codes 080.2730; 110.2960; 140.7300

1 引 言

由于光电装备结构的限制, 当用强光对其进行照射时, 会产生指向光源方向, 且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^[1]。猫眼效应的典型应用是在战场上对光电系统的激光主动探测, 国外已有多种成熟的装备^[2-3]。

猫眼效应的回波特性是应用猫眼效应的基础, 目前研究方法有两种: 1) 基于物理光学的衍射积分方法; 2) 从激光雷达方程出发的几何光学方法。物理光学衍射积分方法通过将光学窗口函数展开为有限项复高斯函数之和, 利用 Collins 衍射积分得到猫眼效应回波复振幅的解析表达式^[4-5], 此种方法计算结果较为精确, 但表达式繁琐, 给应用带来了不便。在一般猫眼效应的应用中, 以几何光学表示的光束传输及计算方法即可解决绝大部分的回波特性问题, 其基本方法是从激光雷达功率模型出发, 通过求解猫眼效应回波发散角得到猫眼效应回波特性模型。考虑的因素包括离焦、有限口径衍射、像差等^[6-10], 存在的问题是在斜入射情况下反射光束为非圆对称光斑, 探测方程中的回波发散角已失去本来的物理含义, 相应的回波空间可探测范围则无法确定。猫眼效应的回波范围、回波能量大小及其随入射角和离焦量的变化情况, 是应用猫眼效应进行光电系统直接探测时需要掌握的关键性技术参数。本文利用矩阵光学方法, 建立了猫眼效应回波特性模型, 解

收稿日期: 2015-11-16; **收到修改稿日期:** 2016-02-26

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

决了以上所描述的问题,并通过实验对模型进行了验证。

2 理论模型

2.1 适用条件分析

利用猫眼效应进行光电系统探测的光束传输过程可分 4 个部分:从激光发射到光学系统入射窗、光学系统内部的传输、从光学系统出射窗到探测系统、探测系统内的传输。

从激光发射到光学系统入射窗这个过程为激光的自由空间传输,传输过程可由激光束的空间传输公式描述。在光学系统内部的传输过程,根据菲涅耳数公式 $F \gg 1$,所以衍射效应可以忽略。在探测系统内部的传输与此过程类似。从光学系统出射窗到探测系统的光束传输过程为菲涅耳衍射或夫琅禾费衍射。考虑光学系统最小孔径 20 mm,光波波长 1.06 μm 根据圆孔衍射公式,可计算夫琅禾费衍射角 0.061 mrad。实际应用中根据光学系统孔径可计算夫琅禾费衍射角,只要光学系统猫眼效应的出射光束发散角远大于夫琅禾费衍射角,衍射效应即可忽略。实际光学系统由于安装误差、调焦、以及大离焦状态反射面(如倒像棱镜、分光棱镜等)的存在,猫眼效应出射光束发散角远大于夫琅禾费衍射角的条件在绝大多数条件下是可以满足的。

2.2 传输矩阵

复杂光学系统可以简化为一个透镜和一个反射面的组合。按照光线的传输方向,将光路按反射面对称展开,得到双透镜的光路传输模型^[11],如图 1 所示。 z 轴取为猫眼光学系统的光轴,坐标原点取在光学系统入射窗的中心, y 轴竖直向上, x 轴满足右手定则。光源、光学系统入射窗、光学系统出射窗、接收端坐标系依次为 x_0y_0z 、 x_1y_1z 、 x_2y_2z 、 x_3y_3z 。 f' 为入射窗(或出射窗)透镜的焦距, δ 为反射面相对透镜的离焦量, L 为探测系统到猫眼光学系统的轴上距离。由于探测系统与猫眼光学系统的距离要远大于猫眼光学系统的孔径直径,所以猫眼光学系统内的入射光可近似认为是能量均匀分布的平行光。

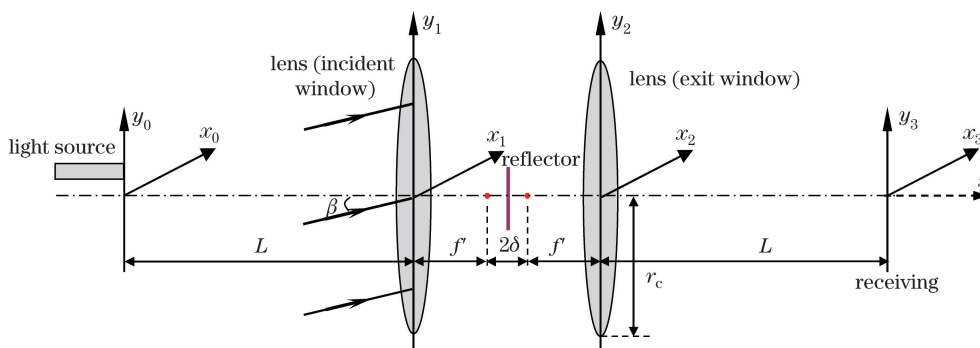


图 1 猫眼效应光学传输模型等效光路

Fig. 1 Equivalent optical transmission model of cat-eye effect

对于传输矩阵元素为 A 、 B 、 C 、 D 的轴对称光学系统,光线矢量在其中的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} x' \\ \alpha' \\ y' \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & 0 & 0 \\ C & D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A & B \\ 0 & 0 & C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \alpha \\ y \\ \beta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 x 、 y 为入射面坐标, α 、 β 分别为 x 、 y 坐标点光线传输矢量在 xoz 和 $yo z$ 平面内的投影与 z 轴的夹角。 x' 、 y' 为出射面坐标, α' 、 β' 分别为 x' 、 y' 坐标点光线传输矢量在 $x'o'z'$ 和 $y'o'z'$ 平面内的投影与 z' 轴的夹角。

光学系统入射窗透镜、入射窗出射到反射元件、反射元件、反射元件到出射窗、出射窗透镜、出射窗出射到接收端(或光源到入射窗)的传输矩阵设分别为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 ,可表示为

$$T_1 = T_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{bmatrix}, T_2 = T_4 = \begin{bmatrix} 1 & f' + \delta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, T_6 = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

入射窗到出射窗的传输矩阵为

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_5 \cdot \mathbf{T}_4 \cdot \mathbf{T}_3 \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(f' + 2\delta)}{f'} & 2(f' + \delta) \\ \frac{2\delta}{f'^2} & -\frac{f' + 2\delta}{f'} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

入射窗到接收端的传输矩阵为

$$\mathbf{T}' = \mathbf{T}_6 \cdot \mathbf{T} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2\delta \cdot L - f'(f' + 2\delta)}{f'^2} & \frac{2f'(f' + \delta) - L(f' + 2\delta)}{f'} \\ \frac{2\delta}{f'^2} & -\frac{f' + 2\delta}{f'} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

2.3 回波形状模型

入射窗和出射窗边缘具有相同的表达形式,即

$$\begin{cases} x_1^2 + y_1^2 = r_c^2 \\ x_2^2 + y_2^2 = r_c^2 \end{cases}, \quad (5)$$

式中 r_c 为入射(出射)窗半径。

根据(1)、(3)、(5)式,可求得出射窗边缘光线映射到入射窗坐标系下所满足的关系,即

$$\left(x_1 + \frac{B_1}{A_1}\alpha\right)^2 + \left(y_1 + \frac{B_1}{A_1}\beta\right)^2 = \left(\frac{r_c}{A_1}\right)^2, \quad (6)$$

根据(1)、(4)、(5)式,入射窗处光线映射到接收端坐标系满足关系

$$\begin{cases} x_1 = \frac{1}{A_2}(x_3 - B_2 \cdot \alpha) \\ y_1 = \frac{1}{A_2}(y_3 - B_2 \cdot \beta) \end{cases}, \quad (7)$$

根据(5)、(6)式,入射窗、出射窗边缘光线映射到接收端坐标系分别满足方程

$$(x_3 - B_2 \cdot \alpha)^2 + (y_3 - B_2 \cdot \beta)^2 = (A_2 r_c)^2, \quad (8)$$

$$\left[x_3 - \left(B_2 - \frac{A_2 \cdot B_1}{A_1}\right) \cdot \alpha\right]^2 + \left[y_3 - \left(B_2 - \frac{A_2 \cdot B_1}{A_1}\right) \cdot \beta\right]^2 = \left(\frac{A_2 r_c}{A_1}\right)^2. \quad (9)$$

在探测器处,猫眼效应回波的形状即为(8)、(9)式所描述的两个圆方程所围的公共区域。从公式可以看出,对于固定的猫眼目标回波光斑的尺寸只与离焦量有关,而斜入射角度和离焦量共同影响回波光斑的位置。

2.4 回波能量模型

假设光学系统入射窗处激光照射光斑中心与入射窗中心重合,则入射窗接收到的激光功率为

$$P_{\text{ret}} = 2P_1 \cdot \tau_a(\lambda, L_{L_{\text{ct}}}) \left(\frac{r_{\text{ct}}}{r_{\text{in}_{\text{ct}}}}\right)^2, \quad (10)$$

式中 P_1 为激光器发射功率, τ_a 为大气透射率, λ 为激光波长, $L_{L_{\text{ct}}}$ 为激光发射系统到猫眼光学系统的距离, r_{ct} 为猫眼光学系统入射窗半径, $r_{\text{in}_{\text{ct}}}$ 为照射激光在猫眼光学系统入射窗位置的光斑半径,其大小为

$$r_{\text{in}_{\text{ct}}} = \frac{\theta_1 \cdot L_{L_{\text{ct}}}}{2}, \quad (11)$$

式中 θ_1 为激光发散角。

考虑探测系统的接收,接收端光功率密度为

$$P_{\text{rd}}(s) = P_{\text{ret}} \cdot \tau_a(\lambda, L_{r_{\text{ct}}}) \cdot \tau_{\text{ct}}^2 \frac{1}{S_{\text{in}}}, \quad (12)$$

式中 $L_{r_{\text{ct}}}$ 为探测系统到猫眼光学系统的距离, τ_{ct} 为猫眼光学系统的透射率, S_{in} 为入射窗映射到接收端坐标系的面积。

考虑到 $S_{\text{in}} = \pi(A_2 r_{\text{ct}})^2$, 并将(10)式代入(12)式得

$$P_{rd}(s) = \frac{2}{\pi} P_1 \cdot \tau_a(L_{l_{ct}}) \cdot \tau_a(L_{r_{ct}}) \cdot \tau_{ct}^2 \left(\frac{1}{A_2 r_{in_{ct}}} \right)^2 \quad (13)$$

设接收端探测器接收窗边缘方程为

$$(x_3 - x_d)^2 + (y_3 - y_d)^2 = r_d^2, \quad (14)$$

式中 r_d 为探测器接收窗半径, (x_d, y_d, z_d) 为探测器接收窗所在位置坐标。

根据(8)、(9)、(14)式,通过解析几何方法可求出猫眼光学系统入射窗、出射窗映射到接收端坐标系的圆方程与探测器接收窗圆方程的相交面积 S_3 ,则探测系统所接收到的回波功率可表示

$$P_{rd} = P_{rd}(s) \cdot S_3. \quad (15)$$

3 实验方案

实验装置如图 2 所示,采用氦氖激光器,激光功率为 40 mW,功率稳定性小于 5%,经扩束准直后发散角为 0.13 mrad。模拟猫眼目标由一个透镜(直径为 40 mm、焦距为 120 mm)和一个平面反射镜组成,距离激光器 8.7 m。接收屏距离模拟猫眼目标 6.24 m。测量过程中通过旋转台带动载物台上的透镜和反射镜一起转动,改变探测光斜入射角,角度范围为 $0^\circ \sim 8^\circ$,精度为 $\pm 10'$,旋转台与透镜两者旋转轴重合。反射镜安装在载物台上的平移台上,通过平移台的移动改变反射镜相对透镜的离焦量,移动距离为焦点附近 $-15 \sim 15$ mm,精度为 0.001 mm。摄像头 1 用于采集接收屏上的模拟猫眼反射光斑。摄像头 2 与激光器近似构成一个发射、接收探测系统,摄像头 2 可直接接收模拟猫眼反射的回波,其焦距为 15 mm,对焦无穷远,接收孔径直径为 24 mm,与准直镜同一高度并与其前端对齐,摄像头 2 光轴与激光出射光轴平行,二者距离为 130 mm。

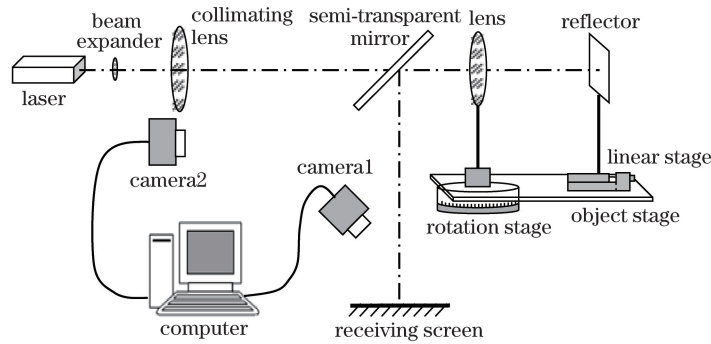


图 2 实验装置原理图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

4 结果与比较

为检验理论模型的正确性,利用图 2 的实验装置,对理论模型进行了实验验证,仿真分析的边界条件与图 2 实验完全一致。

图 3 为正入射离焦情况下,摄像头 1 采集到的光斑图样和利用(8)、(9)式计算得到的预测图形,离焦量从左到右分别为 $-3.8, -2.3, -0.8, 0.7, 1, 1.3, 1.6, 2.7, 4.2, 5.7$ 。可看出光斑最小时对应的离焦量并非 0,经计算此时成像面、接收屏相对透镜近似共轭关系。正入射时 $\alpha = 0, \beta = 0$, (8)、(9)式描述圆心在接收端坐标系原点的 2 个圆,所以回波光斑为圆形。

图 4、图 5 描述的是正入射离焦情况下,回波功率与功率密度随离焦量的变化情况,实线为理论曲线,圆

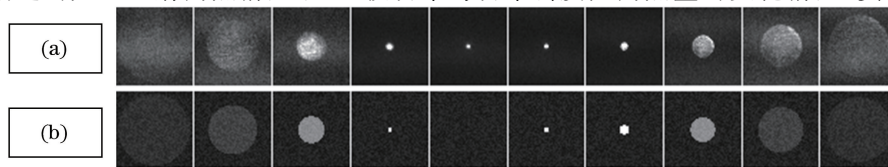


图 3 正入射(a)猫眼回波图样和(b)模拟图样

Fig. 3 (a) Cat-eye echo pattern and (b) analog pattern in normal incidence

圈是实验数据点。根据(3)、(4)式,当 $\delta > 0$ 时, $|A_1| > 1$, $|A_2 r_c| > |A_2 r_c / A_1|$,映射到接收端坐标系时猫眼光学系统入射窗边缘光线孔径大于出射窗边缘光线孔径,即入射的光束能量只有在出射窗边缘光线孔径里才能完全通过,能量有所损失,且随着 δ 增大 $|A_1|$ 越大,能量损失越严重; $0.7 \text{ mm} \leq \delta \leq 1.7 \text{ mm}$ 时,摄像机图像已饱和,没有计算意义,故舍去数据点;当 $\delta < 0$ 时, $|A_1| < 1$,猫眼光学系统入射窗边缘光线总能通过出射窗,所以能量没有损失,保持为常量。图4归一化功率密度随离焦量变化曲线不存在左右对称的对称轴。图4、图5中实验数据与理论数据相关系数分别为0.99、0.96。

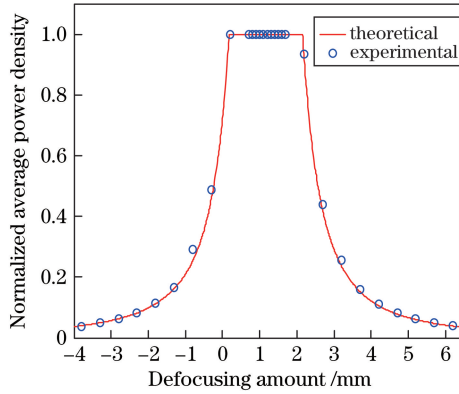


图4 归一化功率密度随离焦量变化曲线

Fig. 4 Curve of the normalized power density changing with defocusing amount

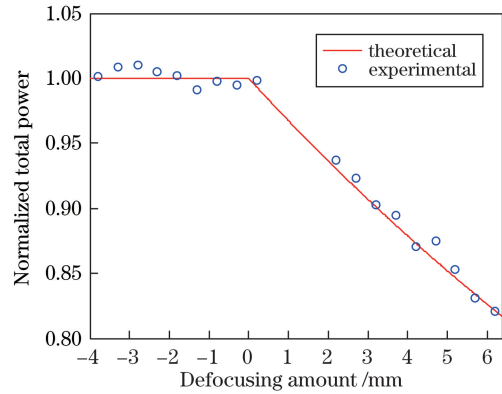


图5 归一化总功率随离焦量变化曲线

Fig. 5 Curve of the normalized total power changing with defocusing amount

图6描述的是正入射离焦情况下,回波光斑半径随离焦量的变化情况,变化曲线为非左右对称曲线,实验数据与理论数据相关系数为0.99。可看出回波光斑半径实验数据点最小值并非0,这与小孔径时光波的衍射有关。当 $\delta < 0$ 时,光斑半径为

$$r = |A_2| r_c = -\frac{2(L - f') r_c}{f'^2} \delta + r_c \quad (16)$$

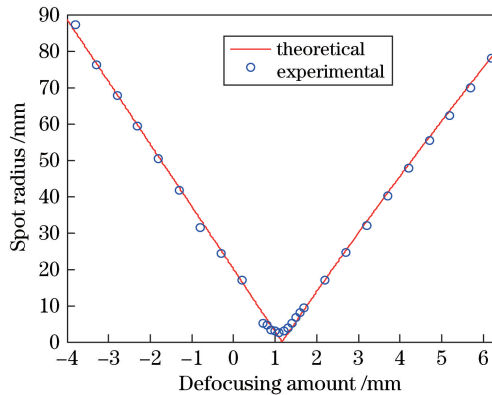


图6 光斑半径随离焦量变化曲线

Fig. 6 Curve of the spot radius changing with defocusing amount

当 $\delta > 0$ 且 $\delta \ll f'$ 时,光斑半径为

$$r = \left| \frac{A_2}{A_1} \right| r_c = \begin{cases} \frac{2L r_c}{f'^2} \delta - r_c, \delta \geq \frac{f'^2}{2L} \\ -\frac{2L r_c}{f'^2} \delta + r_c, \delta < \frac{f'^2}{2L} \end{cases} \quad (17)$$

可以看出回波半径的变化斜率只与猫眼焦距、孔径和探测距离有关。

图7描述的是正入射离焦情况下,摄像头2采集到的回波能量随离焦量的变化情况。为了更好地描述曲线的变化趋势,图中增大了离焦变化范围,减小了离焦变化步长。当 $-2.6 \text{ mm} < \delta < 4.7 \text{ mm}$ 时,反射光束尺寸很小,没有能量落在摄像头2上。当 $\delta = -2.6, 4.7 \text{ mm}$ 时,反射光束边缘正好与摄像头边缘相切。当

$-3.5 \text{ mm} < \delta < -2.6 \text{ mm}$ 或 $4.7 \text{ mm} < \delta < 5.6 \text{ mm}$ 时, 光束尺寸不断变大, 有更多的能量进入摄像头视场, 因而能量迅速增大。在 $\delta = -3.5, 5.6 \text{ mm}$ 时, 能量达到最大。当 $\delta < -3.5 \text{ mm}$ 或 $\delta > 5.6 \text{ mm}$ 时, 光束尺寸进一步增大, 能量分散到更大的区域中, 因而摄像头收集到的能量逐渐降低。图 7 中实验数据与理论数据相关系数为 0.95。

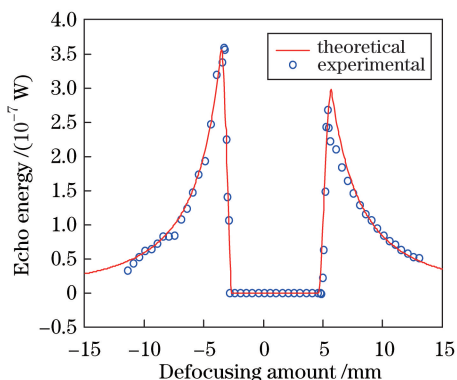


图 7 回波能量随离焦量变化曲线

Fig. 7 Curve of echo energy changing with defocusing amount

图 8 为斜入射情况下, 摄像头 1 采集到的光斑图样和利用(8)、(9)式计算预测的图形。图 9 为相同实验条件下得到的光斑横向、纵向尺寸随入射角的变化曲线, 如图 8 中箭头标识。此时离焦量 -5 mm , 斜入射角度从左到右分别为 $0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ, 6^\circ, 7^\circ$ 。可看出, 随着斜入射角度的增大, 光斑尺寸逐渐减小, 光斑外边界的两段圆弧即对应了(8)、(9)式的两个圆的方程。拍摄的猫眼回波图样发生了旋转, 原因在入射角 α 变化的同时, β 也存在一个入射角, 经计算其大小约 -0.3° 。图 9 中实验数据与理论数据相关系数为 0.99。

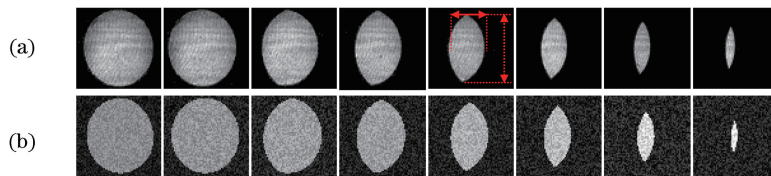


图 8 斜入射(a)猫眼回波图样和(b)模拟图样

Fig. 8 (a) Cat-eye echo pattern and (b) analog pattern in oblique incidence

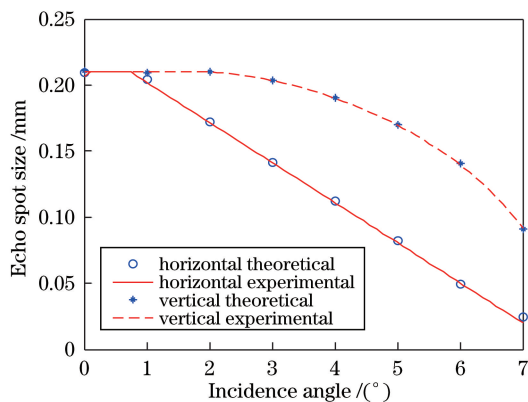


图 9 回波光斑尺寸随入射角变化曲线

Fig. 9 Curves of the echo spot size changing with incident angle

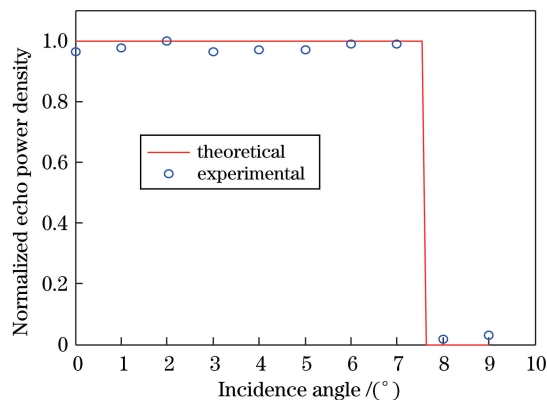


图 10 归一化回波功率密度随入射角变化曲线

Fig. 10 Curves of the normalized echo power density changing with incident angle

5 结 论

基于矩阵光学方法, 通过光学窗口映射的方法推导出光学系统猫眼效应的回波形状和能量模型, 分析了该模型的适用条件, 分析了回波形状和能量大小随离焦量和斜入射角的变化情况。利用透镜和平面反射镜

组成理想猫眼模拟器,通过实验验证了猫眼回波特性模型。结果表明,无论是回波形状还是回波能量,相对于离焦量的变化不存在对称轴线,即正负离焦情况下变化规律不同;回波半径随离焦量呈线性变化趋势,斜率只与猫眼结构和探测距离有关;回波光斑尺寸与离焦量有关,如果探测窗口与光源发射窗距离较远,可能存在探测的盲点。所以为了更好地对光电系统进行探测,最好的方式是采用发射、接收共窗口的探测结构形式;斜入射只会改变回波的空间范围,在光学系统的视场内,回波的空间能量密度保持不变,在视场外能量密度迅速降为0,所以只要探测光束在被探测光学系统的视场内,斜入射角度对探测就没有影响。

该模型能够快速、准确地对猫眼回波形状及能量进行计算,对于激光主动探测系统研制具有重要的参考价值,不足之处是没有考虑大气的影响,在离焦量很小的条件下光学窗口的衍射会起主导作用,这时模型会有较大的偏差,这也是需要改进的地方。

参 考 文 献

- 1 Zhao Xunjie, Gao Zhiyun, Zhang Yingyuan. Technology of active laser reconnaissance and the application in the military [J]. *Optical Technique*, 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.
- 2 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua, *et al.*. Research and prospect of cat-eye effect used for active laser detection technique[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(10): 1028002.
赵延仲, 孙华燕, 宋丰华, 等. 猫眼效应用于激光主动探测技术的研究现状与发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(10): 1028002.
- 3 Shi Lan, Wang Hong. Foreign anti-sniper detection technology and equipment[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2010, 25(4): 16-20.
石 岚, 王 宏. 国外反狙击手光电探测技术与装备[J]. *光电技术应用*, 2010, 25(4): 16-20.
- 4 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua, *et al.*. Research on the mechanism of reflection characteristics of laser irradiation on cat eye optical lens[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(4): 2284-2294.
赵延仲, 孙华燕, 宋丰华, 等. 激光辐照猫眼光学镜头时的反射特性机理研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(4): 2284-2294.
- 5 Zhao Yanzhong, Song Fenghua, Sun Huayan, *et al.*. Laser reflection characteristics of cat eye effect of Cassegrain lens [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(8): 1149-1155.
赵延仲, 宋丰华, 孙华燕, 等. 卡塞格伦镜头的猫眼效应激光反射特性[J]. *中国激光*, 2008, 35(8): 1149-1155.
- 6 Ma Haozhou. Research on the principle of active laser detection technology[J]. *Electronic and Electro-optical Systems*, 2003, 16(3): 295-298.
马浩洲. 激光主动侦察技术的原理研究[J]. *电光系统*, 2003, 16(3): 295-298.
- 7 Zhao Mingjun, Hu Yongzhao, Zeng Xiaodong. Estimation of the operation range of the active laser surveillance [J]. *Journal of Xidian University*, 2004, 31(1): 72-75.
赵铭军, 胡永钊, 曾小东. 激光主动侦察作用距离评估[J]. *西安电子科技大学学报*, 2004, 31(1): 72-75.
- 8 Qiao Ya. A study of the laser active reconnaissance[J]. *Electro-optic Technoloty Application*, 2005, 20(3): 22-24.
乔 亚. 激光主动侦察技术研究[J]. *光电技术应用*, 2005, 20(3): 22-24.
- 9 Zhang Bo, Zhuang Chu, Wu Dongsheng, *et al.*. Anlysis of oblique angle on retro-reflected wave power in “cat-eye” target [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(10): 1046-1050.
张 博, 张 雏, 武东生, 等. 斜入射条件下“猫眼”目标回波功率分析[J]. *激光与红外*, 2009, 39(10): 1046-1050.
- 10 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Fan Pengshan, *et al.*. Laser reflection characteristics of cat-eye effect under large angle oblique incidence[J]. *Hight Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(7): 1457-1461.
赵延仲, 孙华燕, 樊鹏山, 等. 大角度斜入射情况下的猫眼效应激光反射特性[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(7): 1457-1461.
- 11 Mieremet A L, Schleijsen R M A, Pouchelle P N. Modeling the detection of optical sights using retro-reflection[C]. *SPIE*, 2008, 6950: 69500E.