光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021090301

猫眼光学系统的硬边光阑效应研究

张玉发[1*]，孟祥逢[2]，童忠诚[1]，李建强[1]

（1. 国防科技大学 电子对抗学院，合肥 230037；2. 中国人民解放军 95865 部队，北京 102200）

摘　要： 采用矩阵分解以及将硬边光阑窗口函数展开为复高斯函数叠加的方法，研究了高斯光束猫眼光学系统后的光阑效应；通过数值计算，分析了激光的反射规律。研究表明，入射光束束腰距离猫眼光学系统越远，光学系统的光阑效应越大；调整合适的正离焦量，可以使猫眼光学系统回波光强更高。理论分析和数值计算对猫眼系统的研究具有一定的参考意义。

关键词： 猫眼效应；高斯光束；硬边光阑；光强分布

中图分类号： O435　**文章编号：** 1001－5868(2021)06－0919－04

Research on Hard Edge Aperture Effect of Cat's Eye Optical System

ZHANG Yufa[1], MENG Xiangfeng[2], TONG Zhongcheng[1], LI Jianqiang[1]

(1. College of Electronic Countermeasure, National University of Defense Technology, Hefei 230037, CHN; 2. PLA 95865, Beijing 102200, CHN)

Abstract: The hard edge aperture effect of cat's eye optical system is studied by matrix decomposition and the hard edge aperture window function is expanded into the superposition of complex Gaussian functions. The reflection law of laser is analyzed by numerical calculation. The study reveals that the farther the waist of the incident beam is from the cat's eye optical system, the greater the aperture effect of the optical system. Meanwhile, adjusting the proper amount of positive defocus can make the echo light intensity of cat's eye optical system higher. Theoretical analysis and numerical calculation have certain reference significance for the study of cat's eye system.

Key words: cat eye effect; Gaussian beam; hard edge aperture; intensity distribution

0　引言

当光电装备的光学系统受到强光照射时，处于焦平面的原件会将入射光按原路返回，且回波能量比漫反射目标的强 2～4 个数量级，这就是猫眼效应，其典型应用是激光主动探测、成像等领域[1-4]。

目前，对猫眼效应探测大多采用几何分析法来研究焦平面反射器离焦对回波功率的影响。但是关于猫眼效应的反射机理、光束传输规律的理论及其解析表达方法的研究较少。因此，需要研究猫眼效应中光束通过光学镜头的传输变换规律。当激光束传输到猫眼光学镜头时，其光束尺寸将大于镜头的尺寸，此时光束通过入射窗口和出射窗口等价于通过两个硬边光阑，将出现明显的衍射现象。另外，通常在焦平面附近设置光阑，光束经过反射面时，相当于通过小孔光阑[5-7]。因此，本文以高斯光束为对象，采用矩阵光学原理，并将硬边光阑窗口函数展开为复高斯函数求和的方法，来研究高斯光束通过猫眼光学系统的传输公式，并采用数值仿真的方式分析入射距离、离焦量等参数对猫眼效应回波光强的分布规律，扩展猫眼效应的研究方法。

收稿日期：2021－09－03.

* **通信作者：**张玉发

1　理论分析

1.1　光路分解

高斯光束通过光学系统并返回，整个传输过程

可以展开为一个 $4f$ 系统[8]。如图 1 所示，该系统由三个等效光阑和两个薄透镜组成。入射参考面在光束束腰的位置，其中，ω_0 是束腰半径，D 为透镜的有效口径，f 为焦距，d 为探测器等效光阑的大小，入射光束束腰到透镜前表面的距离为 L_1，透镜后表面到输出参考面的距离为 L_2。δ 为离焦量(探测器远离透镜 1 的焦平面为正离焦)。

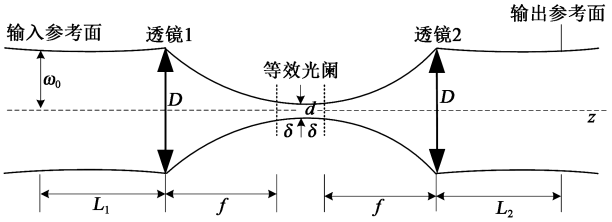


图 1 猫眼光学系统示意图

对上述光学系统用有限数量高斯函数叠加逼近硬边光阑窗函数的方法进行分解[7]，得出传输方程。根据矩阵分解，上述系统分为四个部分：输入参考面到透镜 1 前镜面、透镜 1 前镜面到成像器件所在平面、成像器件所在平面到透镜 2 后镜面、透镜 2 后镜面到输出参考面，其中后三个区间均带有硬边光阑。这四个区间的传输矩阵分别为

$$\begin{bmatrix}A_1 & B_1\\ C_1 & D_1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & L_1\\ 0 & 1\end{bmatrix},\begin{bmatrix}A_2 & B_2\\ C_2 & D_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\delta/f & f+\delta\\ -1/f & 1\end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix}A_3 & B_3\\ C_3 & D_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & f+\delta\\ -1/f & -\delta/f\end{bmatrix},\begin{bmatrix}A_4 & B_4\\ C_4 & D_4\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & L_2\\ 0 & 1\end{bmatrix} \tag{1}$$

经过上述变换，高斯光束经过猫眼光学系统的传输，等效为高斯光束通过光学系统和三个硬边光阑的传输。

1.2 光束传输方程

设高斯光束的束腰半径为 ω_0，光束横截面离光轴的距离为 r，束腰处的光场分布为

$$E_0(r,0)=\exp(-r^2/\omega_0^2) \tag{2}$$

由 Collins 衍射积分公式[9]可知，高斯光束通过 $\begin{bmatrix}A_1 & B_1\\ C_1 & D_1\end{bmatrix}$ 光学系统到达透镜 1 的前场分布为

$$E_1(r_1,z)=\sqrt{\frac{i}{\lambda B_1}}\int_{-\infty}^{\infty}E_0(r,0)\cdot \exp\left[-\frac{\mathrm{i}\pi}{\lambda B_1}(A_1r^2-2rr_1+d_1r_1^2)\right]\mathrm{d}r \tag{3}$$

式中，波数 $k=2\pi/\lambda$。根据以下积分公式：

$$\int_{-\infty}^{\infty}\exp[-(P^2x^2+Qx)]\mathrm{d}x=\frac{\sqrt{\pi}}{P}\exp\left[-\left(\frac{Q}{2P}\right)^2\right] \tag{4}$$

透镜 1 的光场分布为

$$E_1(r_1,z)=\sqrt{\frac{\mathrm{i}}{\lambda B_1}}\exp(-\mathrm{i}kD_1r_1^2/(2B_1))\frac{\sqrt{\pi}}{P_1}\times \exp(-k^2r_1^2/(4B_1^2P_1^2)) \tag{5}$$

其中 $P_1^2=\dfrac{1}{\omega_0^2}+\mathrm{i}k\dfrac{A_1}{2B_1}$。

半径为 a 的硬边光阑窗口函数为

$$H(r)=\begin{cases}1, & r\leqslant a\\ 0, & r>a\end{cases} \tag{6}$$

上式表示的圆孔函数展开为复高斯函数叠加[7]：

$$H(r)=\sum_{j=1}^{M}F_j\exp\left(-\frac{G_jx^2}{a^2}\right) \tag{7}$$

其中，展开系数 F_j 和复高斯函数系数 G_j 可由计算机优化得到，当 $M=10$ 时，取值见文献[7]。同理，利用 Collins 公式得到该高斯光束通过 $\begin{bmatrix}A_2 & B_2\\ C_2 & D_2\end{bmatrix}$ 光学系统后到达焦平面前的光场分布为

$$E_2(r_2,z)=\sqrt{\frac{\mathrm{i}}{\lambda B_2}}\exp(-\mathrm{i}kD_2r_2^2/(2B_2))\times \int_{-a}^{a}E_1(r_1,z)\exp\left[-\frac{\mathrm{i}\pi}{\lambda B_2}(A_2r_1^2-2r_2r_1)\right]\mathrm{d}r_1 \tag{8}$$

利用积分公式得到：

$$E_2(r_2,z)=\sqrt{\frac{\mathrm{i}}{\lambda B_1}}\sqrt{\frac{\mathrm{i}}{\lambda B_2}}\frac{\sqrt{\pi}}{P_1}\exp(-\mathrm{i}kD_2r_2^2/(2B_2))\times\sum_{j1=1}^{10}F_{j1}\frac{\sqrt{\pi}}{P_2}\exp(-k^2r_2^2/(4B_2^2P_2^2)) \tag{9}$$

其中，$P_2^2=\dfrac{\mathrm{i}kA_2}{2B_2}+\dfrac{\mathrm{i}kD_1}{2B_1}+\dfrac{k^2}{4B_1^2P_1^2}+\dfrac{4G_{j1}}{D^2}$。

同理，得到光束通过 $\begin{bmatrix}A_3 & B_3\\ C_3 & D_3\end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix}A_4 & B_4\\ C_4 & D_4\end{bmatrix}$ 受限的光学系统后，在输出参考面上的光场为

$$E_4(r_4,z)=\sqrt{\frac{\mathrm{i}}{\lambda B_1}}\sqrt{\frac{\mathrm{i}}{\lambda B_2}}\sqrt{\frac{\mathrm{i}}{\lambda B_3}}\sqrt{\frac{\mathrm{i}}{\lambda B_3}}\frac{\sqrt{\pi}}{P_1}\cdot \exp(-\mathrm{i}kD_4r_4^2/(2B_4))\times\sum_{j1=1}^{10}F_{j1}\frac{\sqrt{\pi}}{P_2}\sum_{j2=1}^{10}F_{j2}\sum_{j3=1}^{10}\cdot F_{j3}\frac{\sqrt{\pi}}{P_4}\exp(-k^2r_4^2/(4B_4^2P_4^2)) \tag{10}$$

式中，$P_3^2=\dfrac{\mathrm{i}kA_3}{2B_3}+\dfrac{\mathrm{i}kD_2}{2B_2}+\dfrac{k^2}{4B_2^2P_2^2}+\dfrac{4G_{j2}}{d^2}$，

$P_4^2=\dfrac{\mathrm{i}kA_4}{2B_4}+\dfrac{\mathrm{i}kD_3}{2B_3}+\dfrac{k^2}{4B_3^2P_3^2}+\dfrac{4G_{j3}}{D^2}$。

式(9)给出了高斯光束经过猫眼光学系统的解析表达式，反射光束强度受到光学系统参数、等效光

阑参数、入射光束等影响。根据光强分布与光束光场分布的关系：

$$I(r,z)=E(r,z)E^{*}(r,z) \tag{11}$$

通过数值计算，分析不同情况下的反射光强分布。其中，$E^{*}(r,z)$为 $E(r,z)$的共轭。

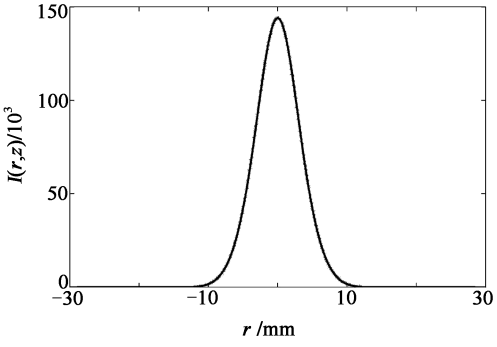
2　数值计算与分析

设入射激光波长为 1.06 μm，束腰半径为 1 mm，透镜焦距为 200 mm，口径为 40 mm，成像器件直径为 5 mm，且成像器件安装在焦平面上。

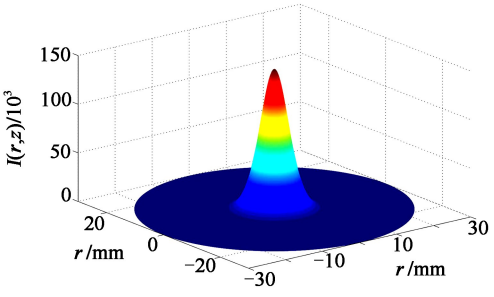
2.1　入射光束束腰位置与猫眼光学镜头距离对反射光强分布的影响

数值分析入射光束束腰到镜头 1 前表面的距离对反射回波的影响。仿真结果如图 2～4 所示。仿真过程中，仅改变 L_1 的大小，其他参数不变。

数值仿真结果表明，当 $L_1=10$ m 时回波光强如图 2 所示，光束仍为高斯光束，未出现明显变化，说明近距时，离镜头的光阑效应可以忽略。当 $L_1=50$ m 时，出射处的回波光强如图 3 所示，可以明显看到光束发生畸变，并且回波能量降低。当 $L_1=100$ m 时，出射处的回波光强如图 4 所示，透镜的光阑效应明显，反射光光强分布的空间高频分量逐渐增加，并且回波能量降低。

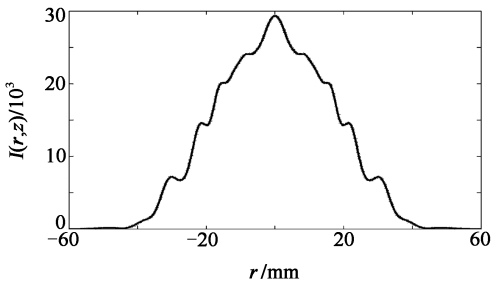


(a)　二维光强分布

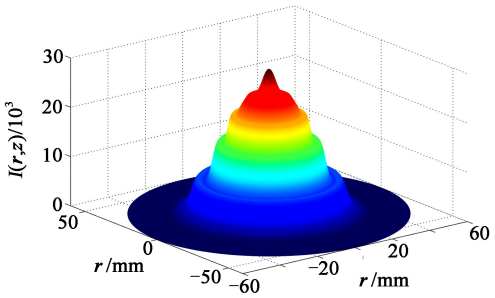


(b)　三维光强分布

图 2　$L_1=10$ m 时的光强分布

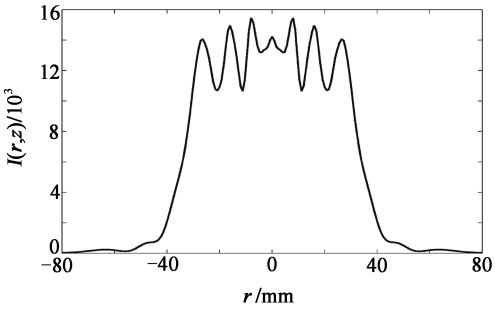


(a)　二维光强分布

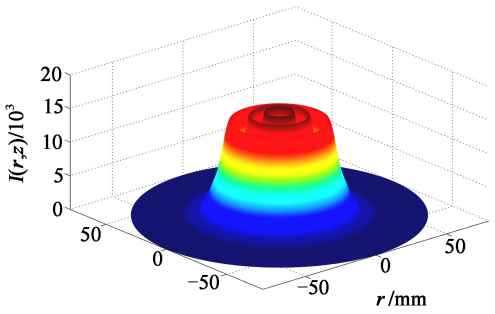


(b)　三维光强分布

图 3　$L_1=50$ m 时的光强分布



(a)　二维光强分布

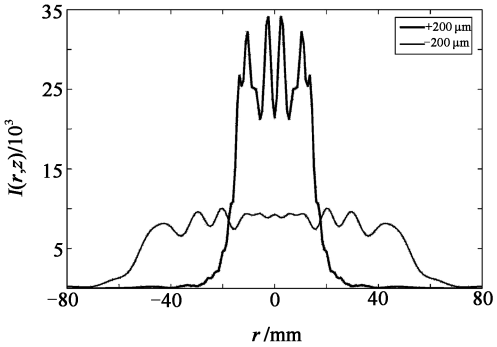


(b)　三维光强分布

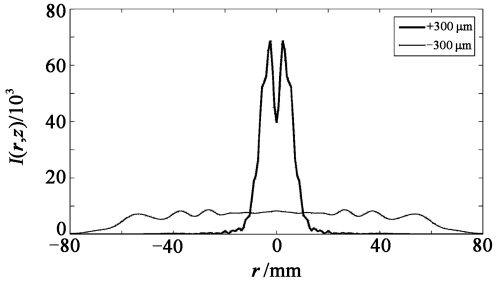
图 4　$L_1=100$ m 时的光强分布

2.2　离焦对回波的影响

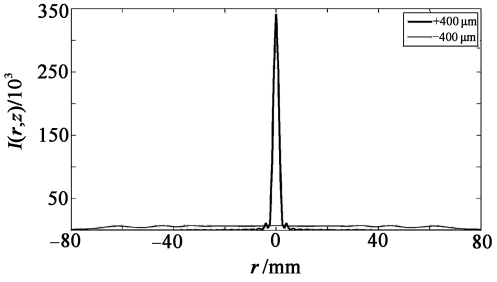
由几何光学分析可知，探测器作为反射器件，其离焦量影响激光回波能量，图 5 是离焦量逐渐增大时，回波光强的分布特性。从图中可知，随着离焦量的增大，回波光强先增大再减小；离焦相同时，正离焦的回波光强大于负离焦的光强。



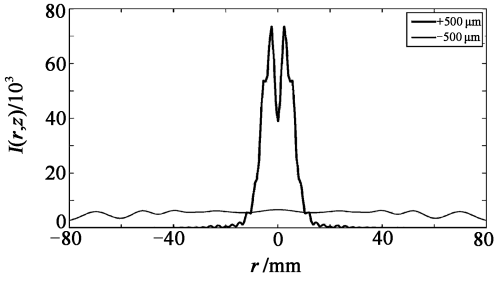
(a) 离焦量为±200 μm



(b) 离焦量为±300 μm



(c) 离焦量为±400 μm



(d) 离焦量为±500 μm

图 5 不同离焦量下的光强分布

3 结论

采用矩阵分解并将硬边光阑窗口函数展开为有限个复高斯函数叠加的方法，研究了高斯光束经猫眼光学系统传输的机理和反射特性，分析了不同距离情况下光学系统的光阑效应对猫眼回波光强分布的影响。结果表明，入射光束束腰距离镜头越远，光学系统的光阑效应越明显，回波光强的高频分量增大。反射器件离焦量对回波光束的影响较大，通过调整正离焦量的大小，可以获得更高的回波光强。因此本文的研究方法简洁、方便，可直观分析物理问题，对猫眼效应的研究有一定的参考价值。

参考文献：

[1] Mieremet Arjan L, Schleijpen Rich M A, Pouchelle P N. Modeling the detection of optical sights using retro-reflection [J]. Proc. of SPIE, 2008, 6950: 69500E1-10.

[2] Christophe L, Gilles D, Olga L B, et al. Sight laser detection modeling[J]. Proc. of SPIE, 2003, 5086: 280-286.

[3] 任建迎，孙华燕，张来线. “猫眼”逆向调制自由空间光通信技术[J]. 激光与红外，2017，47(1)：98-102.
Ren J Y, Sun H Y, Zhang L X. Free space optical communication technology based on cat-eye modulating retro-reflector[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(1): 98-102.

[4] 赵鹏浩. 基于“猫眼效应”的反光电探测系统的设计与实现[D]. 扬州：扬州大学，2020.
Zhao Penghao. Design and implementation of anti-photoelectric detection system based on “Cat-eye Effect”[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.

[5] 蔡雨轩，欧阳名钊，付跃刚. 影响激光主动探测效能的机理研究[J]. 激光与红外，2018，48(4)：451-457.
Cai Yuxuan, OuYang Mingzhao, Fu Yuegang. Research on the mechanism of laser active detection[J]. Laser and Infrared, 2018, 48(4): 451-457.

[6] 季小玲，吕百达. 厄米-高斯光束通过多个硬边光阑复杂光学系统变换的计算模拟[J]. 强激光与粒子束，2003，15(9)：845-849.
Ji Xiaoling, Lv Baida. Numerical simulation of the transformation of Hermite-Gaussian beams through a complicated optical system with multiple hard-edged apertures [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(9): 845-849.

[7] Wen J J, Breazeale M A. A diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams[J]. J. Acoust. Soc. Amer., 1988, 83(5): 1752-1756.

[8] 段帅军，樊桂花，张来线，等. 大视场猫眼镜头激光回波功率分布模型及特性分析[J]. 光学学报，2019，39(10)：1006001-1-10.
Duan Shuaijun, Fan Guihua, Zhang Laixian, et al. Laser echo power distribution model of large field cat-eye lens and characteristics analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006001-1-10.

[9] Collins S A. Lens-system diffraction integral written in terms of matrix optics[J]. J. Opt. Soc. Am., 1970, 60(7): 1168-1177.

作者简介：

张玉发(1983—)，男，安徽省桐城市人，博士，讲师，主要从事激光防御方面的研究。