

畸变猫眼效应反射光束的回程传输特性

赵延仲 孙华燕 张来线 郑勇辉

(装备指挥技术学院, 北京 101416)

摘要 运用 Collins 衍射积分公式以及将硬边光阑窗口函数展开为有限个复高斯函数之和的方法, 推导了倾斜探测光束通过有中心遮挡和探测器倾斜的猫眼光学镜头的三维解析传输公式。通过数值计算分析了畸变反射光束的回程传输特性。研究表明, 入射角和探测器倾斜角的存在导致反射光束产生不对称畸变, 且反射光中心相对原路返回位置存在偏差。中心遮挡和入射角的存在导致反射光束成为扭曲的空心光束。随着回程传输距离的增大, 畸变的反射光束逐渐演变为实心单峰光束。

关键词 激光光学; 猫眼效应; 畸变光束; 光学镜头; 回程传输特性

中图分类号 TN012 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0702015

Backwards Propagation Characteristics of Distorted Reflected Beams with Cat-Eye Effect

Zhao Yanzhong Sun Huayan Zhang Laixian Zheng Yonghui

(Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

Abstract Based on the generalized Collins diffraction integral and the method of expanding the aperture function into a finite sum of complex Gaussian functions, an approximate three-dimensional analytical formula for oblique detected laser beam passing through a cat-eye optical lens with center shelter and oblique detector is derived. Propagation characteristics of the distorted reflected beam are performed by numerical calculation. The results show that the incident angle and the oblique angle of the detector create unsymmetrical distortions of the distribution and a certain departure from the return centre. The reflected beam will become a distorted hollow beam because of the existent of the incident angle and the center shelter. The reflected beam gradually evolves into a solid single peak beam with the increase of the propagation distance.

Key words laser optics; cat-eye effect; distorted beam; optical lens; backwards propagation characteristics

OCIS codes 040.1880; 050.1960; 140.3295; 260.1960

1 引言

猫眼逆反射器的反射光可以严格按照入射光路原路返回, 并具有很好的特性规律, 这是因为猫眼逆反射器在设计时已经考虑了衍射极限、加工误差等。因此, 猫眼逆反射器作为可控的合作目标, 广泛地应用在空间光通信^[1]、免调谐激光器^[2,3]和跟踪测量^[4,5]等领域, 其反射光的特性规律研究也较为成熟。而大部分成像探测或非成像探测所用的普通光学镜头, 也具有与猫眼逆反射器一样的猫眼效应反

射原理^[6~9]。应用该原理的激光主动探测系统已经在战场上得到应用。但是与猫眼逆反射器相比, 普通光学镜头的猫眼效应反射光分布特性较为复杂, 难以进行精确定量描述, 使得现有的激光主动探测技术发展受限。这是因为普通光学镜头在设计时只考虑其成像或探测用途, 其反射特性如何不在设计任务之内。在不影响光学镜头成像质量的前提下, 镜头某些轴系的失调及其与探测光束的不协调等都会使反射光束的分布形态发生畸变。这些畸变特征

收稿日期: 2011-02-24; **收到修改稿日期**: 2011-03-28

基金项目: 国防预研基金(TY7131008)和“十一五”国防预研基金(513210902)资助课题。

作者简介: 赵延仲(1984-), 男, 博士研究生, 主要从事激光主动探测、光电信息处理等方面的研究。

E-mail: zhaoyan198@tom.com(中国光学学会会员号: SO40421128A)。

导师简介: 孙华燕(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事激光主动探测、光电信息处理等方面的研究。

E-mail: shy221528@vip.sina.com

对反射光的回程传输特性和远场光束质量有着决定性的影响,也影响着探测系统的性能。

在激光主动探测的光传输过程中,目标光学镜头如同一个调制变换器,将经其调制变换后的光束称为猫眼效应反射光束,目标光学镜头的姿态和结构参数决定着反射光束的分布形态和传输特性。因此,在描述猫眼效应反射光束的解析表达式中,需要包含有导致反射光分布发生畸变的目标光学镜头姿态和结构参数,这样才能为激光主动探测系统定量分析奠定理论基础。我们对猫眼效应反射光的解析分布已进行了一些研究^[10~13],但都局限为比较理想的情况。对多种失调情况下畸变猫眼效应反射光束的回程传输特性及远场光束质量的研究还较少。因此,本文针对导致猫眼效应反射光束发生畸变的探测激光斜入射、探测器倾斜、中心遮挡和离焦4种因素,建立了更为全面的猫眼效应反射模型,推导了更具一般性的猫眼效应反射光束的三维光强分布解析表达式,并通过数值计算分析了反射光束的回程传输特性。

2 理论推导

2.1 猫眼效应反射模型

与普通光束不同,猫眼效应反射光束是被目标光学镜头在激光器腔外调制而产生的。目标光学镜头属于非合作目标,它不能像激光器腔镜一样被精确调节,因此猫眼效应反射光束不具有一般激光束所固有的分布模式,它融合了由于角失调和线失调形成的扭曲光束、光阑限制形成的空心光束以及离焦像散光束等多种特性。下面首先分析影响这些分布特征的因素。一般情况下,目标光学镜头距离较远,此时可以认为进入目标光学镜头的光束已经是平行光,加上光学镜头本身在设计时考虑了成像质量要求,光学系统像差对反射光束的畸变影响很小。因此反射光束的畸变分布特征将主要受光学镜头结构的失调及其与探测激光之间的角度不匹配的影响。影响因素主要有入射角、探测器倾斜角度、中心遮挡和探测器离焦4个。

倾斜探测光束通过探测器倾斜且有中心遮挡的猫眼效应反射模型的传输过程如图1所示,猫眼效应反射模型可以简化为两个透镜和一个探测器的组合。由于光电装备上的光学镜头常采取反射式,存在一定中心遮挡,因此两个透镜和探测器前可以等效为放置了两个环形光阑和一个矩形光阑(根据探

测器类型的不同,或为圆形光阑,本文假设其为矩形光阑)。激光束在 $x'y'z'$ 坐标系下传播,为方便分析,图中只画出了 y' 方向, x' 方向各参数的含义与 y' 方向相同。设 z' 为光学镜头光轴方向,探测激光束方向与 z' 轴在 x' 和 y' 方向的夹角分别为 θ_x 和 θ_y ,探测器在 x' 和 y' 方向的倾斜角分别为 φ_x 和 φ_y 。以探测器作为对称平面,将反射光路展开,即以探测器和 z' 轴的交点 G 作为旋转点,将 $x'y'z'$ 坐标系分别在 $x'z'$ 平面和 $y'z'$ 平面内顺时针旋转 $2\varphi_x$ 和 $2\varphi_y$ 角度,成为 xyz 坐标系。则透镜1的光轴 z' 和透镜2的光轴 z 在 x 和 y 方向的夹角分别为 $2\varphi_x$ 和 $2\varphi_y$,从 G 点后激光束在 xyz 坐标系下传播。设 O 点为输入参考面 RP_{in} 上的发射点, O' 点为输出参考面 RP_{out} 上的原路返回点。按照几何光线的传播原理,受透镜1和透镜2的孔径限制,从 A 点和 B 点发出的边界光线可以通过猫眼效应反射模型,传输到达 A' 和 B' 点。 Δx 和 Δy 分别为入射光束沿 x' 和 y' 方向到 z' 轴的距离, L_1 为 RP_{in} 到透镜1的距离, L_2 为透镜2到 RP_{out} 的距离, $f+\delta$ 为 G 点到透镜1和透镜2的距离。图中未标出的参数: ϵ 为中心遮挡比, D 为透镜1和透镜2的口径, d_x 和 d_y 为探测器在 x 和 y 方向的边长。

为了利用衍射积分公式来计算光束通过含有两个环形光阑和一个矩形光阑的猫眼效应反射模型的传输,需要将该系统分为4个矩阵分解区:输入参考面到透镜1前镜面、透镜1前镜面到平面1、平面2到透镜2后镜面、透镜2后镜面到输出参考面,其传输矩阵分别为

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\delta/f & f+\delta \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} a_3 & b_3 \\ c_3 & d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f+\delta \\ -1/f & -\delta/f \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} a_4 & b_4 \\ c_4 & d_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

透镜1和透镜2前的等效环形光阑窗口函数可以表示为

$$C(x, y) = \begin{cases} 1, & \epsilon^2 D^2/4 \leq x^2 + y^2 \leq D^2/4 \\ 0, & \text{other} \end{cases}, \quad (5)$$

将其外环和内环分别展开为复高斯函数之和^[14~16]

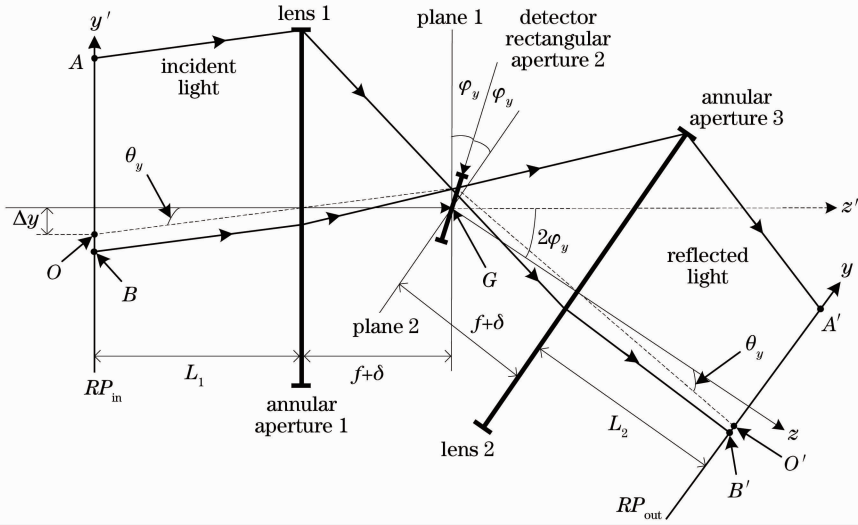


图 1 倾斜探测光束通过探测器倾斜且有中心遮挡的猫眼效应反射模型的传输过程

Fig. 1 Propagation for oblique detected laser beam through the cat-eye effect reflected model with center shelter and oblique detector

$$C_l(x, y) = \sum_{j_l=1}^M F_{j_l} \exp\left[-\frac{4G_{j_l}}{D^2}(x^2 + y^2)\right], \quad C_s(x, y) = \sum_{j_s=1}^M F_{j_s} \exp\left[-\frac{4G_{j_s}}{\epsilon^2 D^2}(x^2 + y^2)\right], \quad (6)$$

式中 F_{j_l} , F_{j_s} 和 G_{j_l} , G_{j_s} 分别为展开系数和复高斯函数系数。

同理, 探测器前的等效矩形光阑函数可以写为

$$R(x, y) = \sum_{j_{2x}=1}^M F_{j_{2x}} \exp\left(-\frac{4G_{j_{2x}}x^2}{d_x^2}\right) \sum_{j_{2y}=1}^M F_{j_{2y}} \exp\left(-\frac{4G_{j_{2y}}y^2}{d_y^2}\right). \quad (7)$$

2.2 三维解析传输公式

定义斜入射光束的倾斜系数为 $C_x = \tan \theta_x$, $C_y = \tan \theta_y$ 。则其倾斜相位因子可以表示为^[11]

$$\varphi(x, y) = \exp[-ik(C_x x + C_y y)], \quad (8)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长。为具一般性, 设探测光束为高斯光束, 其束腰位置位于输入参考面, 束腰半径分别为 w_{0x} 和 w_{0y} , 则在 $x'y'z'$ 坐标系下输入参考面上的光场分布为

$$E'_0(x'_0, y'_0) = \exp\left[-\frac{(x'_0 - \Delta x)^2}{w_{0x}^2} - \frac{(y'_0 - \Delta y)^2}{w_{0y}^2}\right] \varphi(x'_0, y'_0), \quad (9)$$

式中 $\Delta x = -C_x L_1$, $\Delta y = -C_y L_1$ 称为该光束在 x 方向和 y 方向的离轴量。

根据 Collins 衍射积分公式^[17, 18], 该高斯光束在自由空间中通过 $\begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix}$ 区间后到达透镜 1 前的光场

分布为

$$E'_1(x'_1, y'_1) = \frac{ik}{2\pi b_1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E'_0(x'_0, y'_0) \exp\left\{-\frac{ik}{2b_1} [a_1(x'^2_0 + y'^2_0) - 2(x'_0 x'_1 + y'_0 y'_1) + d_1(x'^2_1 + y'^2_1)]\right\} dx'_0 dy'_0. \quad (10)$$

将(8), (9)式代入(10)式, 并利用积分公式

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp[-(P^2 x^2 + Qx)] dx = \frac{\sqrt{\pi}}{P} \exp\left(\frac{Q^2}{4P^2}\right), \quad (11)$$

得到

$$E'_1(x'_1, y'_1) = \frac{ik}{2b_1 P_{1x} P_{1y}} \exp\left[-\frac{\Delta x^2}{w_{0x}^2} - \frac{\Delta y^2}{w_{0y}^2} - \frac{ikd_1(x'^2_1 + y'^2_1)}{2b_1}\right] \exp\left[-\frac{k^2(x'_1 - Q_{1x})^2}{4b_1^2 P_{1x}^2} - \frac{k^2(y'_1 - Q_{1y})^2}{4b_1^2 P_{1y}^2}\right], \quad (12)$$

式中

$$Q_{1x} = b_1 C_x + \frac{2ib_1 \Delta x}{k\omega_{0x}^2}, \quad Q_{1y} = b_1 C_y + \frac{2ib_1 \Delta y}{k\omega_{0y}^2}, \quad (13)$$

$$P_{1x}^2 = \frac{1}{\omega_{0x}^2} + \frac{ika_1}{2b_1}, \quad P_{1y}^2 = \frac{1}{\omega_{0y}^2} + \frac{ika_1}{2b_1}. \quad (14)$$

然后,利用(6)式,(11)~(14)式和 Collins 积分公式,得到该高斯光束通过第一个环形光阑限制的

$\begin{bmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{bmatrix}$ 光学系统后到达平面 1 的光场分布为

$$E'_2(x'_2, y'_2) = \frac{ik}{2\pi b_2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E'_1(x'_1, y'_1) [C_l(x'_1, y'_1) - C_s(x'_1, y'_1)] \times \exp\left\{-\frac{ik}{2b_2} [a_2(x_1'^2 + y_1'^2) - 2(x_2'x_1' + y_2'y_1') + d_2(x_2'^2 + y_2'^2)]\right\} dx_1' dy_1'. \quad (15)$$

经过推导可得

$$E'_2(x'_2, y'_2) = \frac{ik}{2b_1 P_{1x} P_{1y}} \frac{ik}{2b_2} \exp\left[-\frac{\Delta x^2}{\omega_{0x}^2} - \frac{\Delta y^2}{\omega_{0y}^2} - \frac{k^2 Q_{1x}^2}{4b_1^2 P_{1x}^2} - \frac{k^2 Q_{1y}^2}{4b_1^2 P_{1y}^2} - \frac{ikd_2(x_2'^2 + y_2'^2)}{2b_2}\right] \times \sum_{j_{1A}=1}^{A=l, s} \sum_{j_{2A}=1}^M \frac{(-1)^\sigma F_{j_{1A}}}{P_{2xA} P_{2yA}} \exp\left[-\frac{k^2(x_2' - Q_{2x})^2}{4b_2^2 P_{2xA}^2} - \frac{k^2(y_2' - Q_{2y})^2}{4b_2^2 P_{2yA}^2}\right], \quad (16)$$

式中下标 1 表示第一个光阑, $A = l$ 表示外环(此时 $\sigma = 0$), $A = s$ 表示内环(此时 $\sigma = 1$), 其他参数表达式为

$$Q_{2x} = \frac{ib_2 k Q_{1x}}{2b_1^2 P_{1x}^2}, \quad Q_{2y} = \frac{ib_2 k Q_{1y}}{2b_1^2 P_{1y}^2}, \quad (17)$$

$$P_{2xl}^2 = \frac{ika_2}{2b_2} + \frac{ikd_1}{2b_1} + \frac{k^2}{4b_1^2 P_{1x}^2} + \frac{4G_{j_{1l}}}{D^2}, \quad P_{2yl}^2 = \frac{ika_2}{2b_2} + \frac{ikd_1}{2b_1} + \frac{k^2}{4b_1^2 P_{1y}^2} + \frac{4G_{j_{1l}}}{D^2}, \quad (18)$$

$$P_{2xs}^2 = \frac{ika_2}{2b_2} + \frac{ikd_1}{2b_1} + \frac{k^2}{4b_1^2 P_{1x}^2} + \frac{4G_{j_{1s}}}{\epsilon^2 D^2}, \quad P_{2ys}^2 = \frac{ika_2}{2b_2} + \frac{ikd_1}{2b_1} + \frac{k^2}{4b_1^2 P_{1y}^2} + \frac{4G_{j_{1s}}}{\epsilon^2 D^2}. \quad (19)$$

设 $T_x = \tan(2\varphi_x)$, $T_y = \tan(2\varphi_y)$, $K_x = \cos(2\varphi_x)$, $K_y = \cos(2\varphi_y)$, 则在 $xy\epsilon$ 坐标系下, 平面 2 上的光场分布可以表示为

$$E_2(x_2, y_2) = E'_2(K_x x_2, K_y y_2) \exp[-ik(T_x x_2 + T_y y_2)]. \quad (20)$$

同理,利用(7)式,(16)~(20)式和 Collins 积分公式,该高斯光束通过矩形光阑限制的 $\begin{bmatrix} a_3 & b_3 \\ c_3 & d_3 \end{bmatrix}$ 光学系

统后到达透镜 2 后的光场分布为

$$E_3(x_3, y_3) = \frac{ik}{2\pi b_3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_2(x_2, y_2) R(x_2, y_2) \exp\left\{-\frac{ik}{2b_3} [a_3(x_2^2 + y_2^2) - 2(x_2 x_3 + y_2 y_3) + d_3(x_3^2 + y_3^2)]\right\} dx_2 dy_2. \quad (21)$$

经过推导可得

$$E_3(x_3, y_3) = \frac{ik}{2b_1 P_{1x} P_{1y}} \frac{ik}{2b_2} \frac{ik}{2b_3} \exp\left[-\frac{\Delta x^2}{\omega_{0x}^2} - \frac{\Delta y^2}{\omega_{0y}^2} - \frac{k^2 Q_{1x}^2}{4b_1^2 P_{1x}^2} - \frac{k^2 Q_{1y}^2}{4b_1^2 P_{1y}^2} - \frac{ikd_3(x_3^2 + y_3^2)}{2b_3}\right] \times \sum_{j_{1A}=1}^{A=l, s} \sum_{j_{2A}=1}^M \sum_{j_{3A}=1}^M \frac{(-1)^\sigma F_{j_{1A}} F_{j_{2x}} F_{j_{2y}}}{P_{2xA} P_{2yA} P_{3xA} P_{3yA}} \times \exp\left[-\frac{k^2 Q_{2xA}^2}{4b_2^2 P_{2xA}^2} - \frac{k^2 Q_{2yA}^2}{4b_2^2 P_{2yA}^2} - \frac{k^2(x_3 - Q_{3xA})^2}{4b_3^2 P_{3xA}^2} - \frac{k^2(y_3 - Q_{3yA})^2}{4b_3^2 P_{3yA}^2}\right], \quad (22)$$

式中

$$Q_{3xA} = b_3 T_x + \frac{ib_3 k K_x Q_{2x}}{2b_2^2 P_{2xA}^2}, \quad Q_{3yA} = b_3 T_y + \frac{ib_3 k K_y Q_{2y}}{2b_2^2 P_{2yA}^2}, \quad (23)$$

$$P_{3xA}^2 = \frac{ika_3}{2b_3} + \frac{ikK_x d_2}{2b_2} + \frac{k^2 K_x^2}{4b_2^2 P_{2xA}^2} + \frac{4G_{j_{2x}}}{d_x^2}, \quad P_{3yA}^2 = \frac{ika_3}{2b_3} + \frac{ikK_y d_2}{2b_2} + \frac{k^2 K_y^2}{4b_2^2 P_{2yA}^2} + \frac{4G_{j_{2y}}}{d_y^2}. \quad (24)$$

设 $\Delta x' = -C_x L_2$, $\Delta y' = -C_y L_2$, 利用(6)式, (22)~(24)式和 Collins 积分公式, 并以输出参考面上的 O' 点作为 xy 平面的坐标原点。最后经过复杂推导, 可以得到该高斯光束通过第二个环形光阑限制的

$\begin{bmatrix} a_4 & b_4 \\ c_4 & d_4 \end{bmatrix}$ 光学系统后, 到达输出参考面上的光场分布为

$$E_4(x_4, y_4) = \frac{ik}{2b_1 P_{1x} P_{1y}} \frac{ik}{2b_2} \frac{ik}{2b_3} \frac{ik}{2b_4} \exp\left[-\frac{\Delta x'^2}{\omega_{0x}^2} - \frac{\Delta y'^2}{\omega_{0y}^2} - \frac{k^2 Q_{1x}^2}{4b_1^2 P_{1x}^2} - \frac{k^2 Q_{1y}^2}{4b_1^2 P_{1y}^2} - \frac{ikd_4(x_4^2 + y_4^2)}{2b_4}\right] \times \\ \sum_{A=l, s} \sum_{B=l, s} \sum_{j_{1A}=1}^M \sum_{j_{2x}=1}^M \sum_{j_{2y}=1}^M \sum_{j_{3B}=1}^M \frac{(-1)^e F_{j_{1A}} F_{j_{2x}} F_{j_{2y}} F_{j_{3B}}}{P_{2xA} P_{2yA} P_{3xA} P_{3yA} P_{4xAB} P_{4yAB}} \exp\left(-\frac{k^2 Q_{2x}^2}{4b_2^2 P_{2xA}^2} - \frac{k^2 Q_{2y}^2}{4b_2^2 P_{2yA}^2}\right) \times \\ \exp\left[-\frac{k^2 Q_{3xA}^2}{4b_3^2 P_{3xA}^2} - \frac{k^2 Q_{3yA}^2}{4b_3^2 P_{3yA}^2} - \frac{k^2 (x_4 + \Delta x' - Q_{4xA})^2}{4b_4^2 P_{4xAB}^2} - \frac{k^2 (y_4 + \Delta y' - Q_{4yA})^2}{4b_4^2 P_{4yAB}^2}\right], \quad (25)$$

式中

$$\rho = \begin{cases} 0, & A - B = 0 \\ 1, & A - B \neq 0 \end{cases}, \quad (26)$$

$$Q_{4xA} = \frac{ib_4 k Q_{3xA}}{2L_3^2 P_{3xA}^2}, \quad Q_{4yA} = \frac{ib_4 k Q_{3yA}}{2b_3^2 P_{3yA}^2}, \quad (27)$$

$$P_{4xA}^2 = \frac{ika_4}{2b_4} + \frac{ikd_3}{2b_3} + \frac{k^2}{4b_3^2 P_{3xA}^2} + \frac{4G_{j_{3l}}}{D^2}, \quad P_{4yA}^2 = \frac{ika_4}{2b_4} + \frac{ikd_3}{2b_3} + \frac{k^2}{4b_3^2 P_{3yA}^2} + \frac{4G_{j_{3l}}}{D^2}, \quad (28)$$

$$P_{4xA_s}^2 = \frac{ika_4}{2b_4} + \frac{ikd_3}{2b_3} + \frac{k^2}{4b_3^2 P_{3xA}^2} + \frac{4G_{j_{3s}}}{\epsilon^2 D^2}, \quad P_{4yA_s}^2 = \frac{ika_4}{2b_4} + \frac{ikd_3}{2b_3} + \frac{k^2}{4b_3^2 P_{3yA}^2} + \frac{4G_{j_{3s}}}{\epsilon^2 D^2}. \quad (29)$$

(25)式即为倾斜高斯光束通过探测器倾斜和有中心遮挡猫眼光学镜头的三维解析传输公式。当 $\theta_x = \theta_y = \varphi_x = \varphi_y = \epsilon = 0$ 时, 该式简化为文献[10]中的(15)式; 当 $\varphi_x = \varphi_y = \epsilon = 0$ 时, 该式简化为文献[11]中的(17)式; 当 $\theta_x = \theta_y = \varphi_x = \varphi_y = 0$ 时, 该式简化为文献[12]中的(12)式。为使(25)式更具一般性, (9)式使用的探测光束模型为高斯光束, 去掉(13)和(14)式中的 ω_{0x} 和 ω_{0y} 项, 即可得到平面波通过该系统的解析传输公式。在进行数值计算时, 使用的光强分布为 $I_4(x_4, y_4) = E_4(x_4, y_4) E_4^*(x_4, y_4)$ 。

3 数值分析与讨论

猫眼效应反射光束的形态分布畸变主要是由于入射光束和目标光学镜头的不匹配造成的, 因此入射角和探测器倾斜角会使反射光束发生扭曲, 而中心遮挡会使反射光束进一步成为扭曲的空心光束。而从以前的研究可知^[8, 10], 离焦量主要造成反射光束的扩展, 对反射光束的特征分布不起主要作用。因此主要考虑理想正入射、斜入射且探测器倾斜、斜入射且有中心遮挡3种情况下, 猫眼效应反射光束分布形态在回程传输中的变化情况。初始值设 $f = 500$ mm, $D = 100$ mm, $L_1 = 10$ km, $d_x = d_y = 20$ mm, $\delta = 0$ 。

图2为理想正入射情况下, $L_2 = 100$ m, 500 m, 2 km, 10 km 处的猫眼效应反射光三维光强分布图

和光斑图, 此时 $\theta_x = \theta_y = \varphi_x = \varphi_y = \epsilon = 0$ 。从图2(a)可以看出, $L_2 = 100$ m 处的猫眼效应反射光光强分布呈现多层衍射圆环, 最外层圆环峰值最强, 且光斑最外侧边缘较为陡峭。随着回程传输距离 L_2 的增大, 最外层圆环峰值逐渐降低, 内层圆环峰值逐渐增大, 各层圆环之间的光强对比度逐渐增大, 光斑最外侧边缘逐渐平缓, 如图2(b)所示。 L_2 继续增大, 中心衍射峰峰值逐渐达到最大, 衍射圆环的层数逐渐减小, 光束主要能量都集中于中心衍射峰和外侧的两个衍射环内, 如图2(c)所示。直到反射光传输到原路返回处即 $L_2 = 10$ km 时, 反射光束才基本上成为实心单峰分布形态, 主要能量都集中于中心峰之内, 但仍有旁瓣存在, 如图2(d)所示。

图3为斜入射且探测器倾斜情况下, $L_2 = 100$ m, 500 m, 2 km, 10 km 处的猫眼效应反射光三维光强分布图和光斑图, 此时 $\theta_x = -1^\circ$, $\theta_y = 1^\circ$, $\varphi_x = \varphi_y = 0.5^\circ$, $\epsilon = 0$ 。从图3(a)可以看出, $L_2 = 100$ m 处的光强分布轮廓呈双圆交汇状, 即猫眼效应反射模型的入瞳和出瞳的交汇形状。随着 L_2 的增大, 光强分布轮廓逐渐模糊, 在 $L_2 = 500$ m 处, 除了外层双圆交汇形状的衍射环依然保持闭合外, 内部的衍射峰开始离散分布, 不再构成封闭的衍射环, 如图3(b)所示。 L_2 继续增大, 光强分布逐渐变为4个峰值, 如图3(c)所示, 沿图3(a)所示的双圆交汇形状短轴方向的两

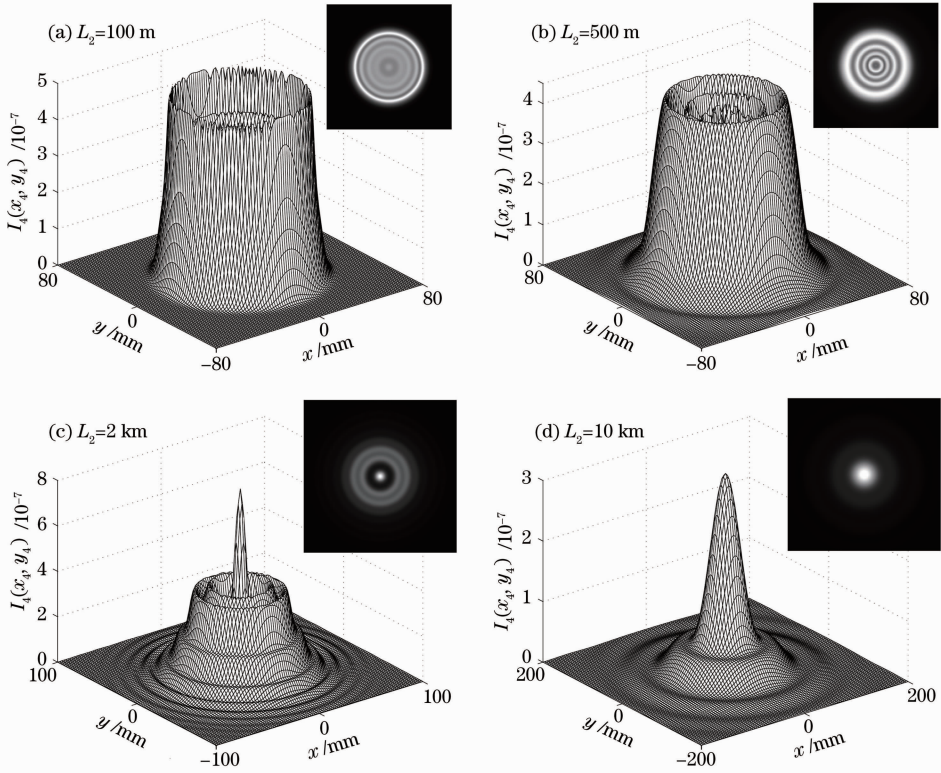


图 2 理想正入射情况下的猫眼效应反射光三维光强分布图和光斑图

Fig. 2 Three-dimensional intensity distributions and faculas of the cat-eye reflected light under normal incidence conditions

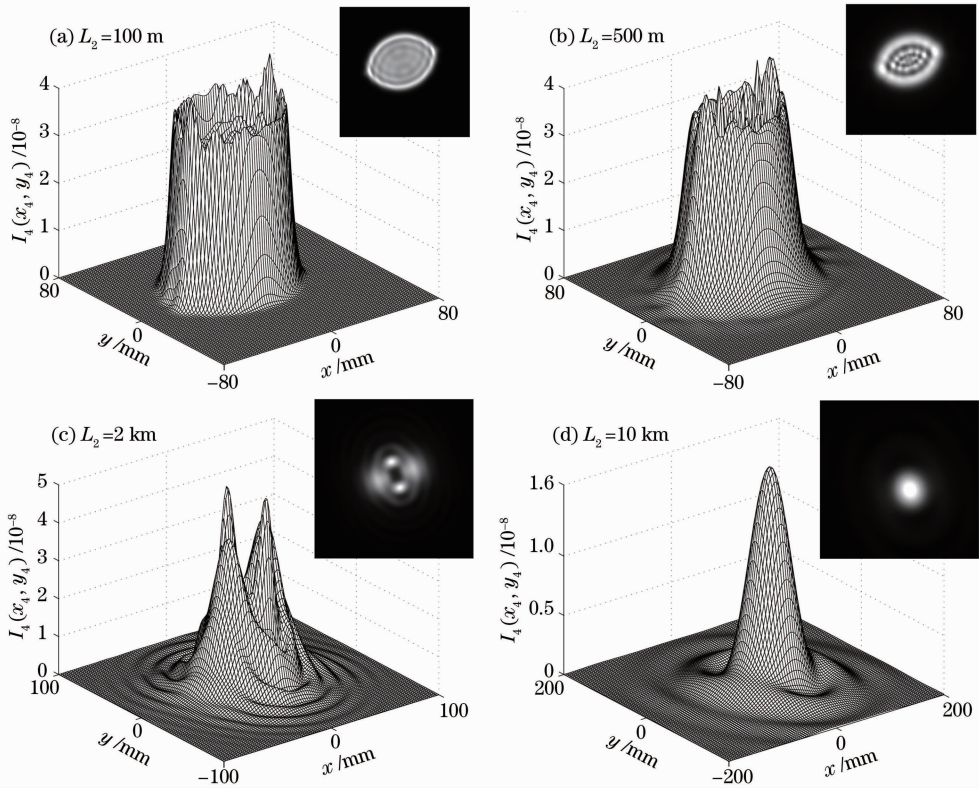


图 3 斜入射且探测器倾斜情况下的猫眼效应反射光三维光强分布图和光斑图

Fig. 3 Three-dimensional intensity distributions and faculas of the cat-eye reflected light under oblique incidence and oblique detector conditions

个衍射峰峰值逐渐减小直至消失,长轴方向的两个衍射峰峰值逐渐增强并逐渐汇合成为一个近似矩形的峰。 L_2 继续增大,该矩形分布轮廓逐渐平滑,沿图 3(a)所示双圆交汇形状长轴方向的相对宽度逐渐减小,短轴方向的相对宽度逐渐增大,到 $L_2 = 10 \text{ km}$ 时,光强分布演变为近似椭圆形态,其长轴方向为双圆交汇形状的短轴方向,如图 3(d)所示。从图 3(d)还可以看出,入射角和探测器倾斜角的同时存在使光强分布中心峰位置向 $+x$ 和 $-y$ 方向发生了移动,其移动方向与入射角的符号相反,而与探测器倾斜角的符号无关。更多数值分析表明,从对反射光强形态分布的影响上来看, φ_x, φ_y 与 θ_x, θ_y 的影响规律以及程度相同,因为斜入射导致光束从猫眼效应反射模型的入瞳传输到出瞳时在 x 和 y 方向各发生了 $2f\theta_x$ 和 $2f\theta_y$ 的位移,而探测器倾斜导致从探测器传输到出瞳的光束相对于 z' 轴旋转了 $2\varphi_x$ 和 $2\varphi_y$ 的角度,因此在 x 和 y 方向同样发生了 $2f\varphi_x$ 和 $2f\varphi_y$ 的位移。入射角越大,探测器倾斜角越大,光强分布形态变成实心单峰所需的传输距离越短,这是因为入射角和探测器倾斜角的增大使得猫眼效应反射模型的有效出瞳口径变小,衍射增强。

图 4 为斜入射且中心遮挡情况下, $L_2 = 100 \text{ m}, 500 \text{ m}, 2 \text{ km}, 10 \text{ km}$ 处的猫眼效应反射光三维光强分布图和光斑图,此时 $\theta_x = 0, \theta_y = 0.5^\circ, \epsilon = 0.2, \varphi_x = \varphi_y = 0$ 。从图 4(a)可以看出,反射光束在距离目标较近时是一个中空光束,其最外层衍射环为近似椭圆形状,最内层衍射环为双圆交汇形状。当入射角为 0° 时,其分布形态类似于较为理想的中空高斯光束。随着 L_2 的增大,光强分布逐渐分为 3 层:受光阑外环交汇形状控制的外层,受光阑内环交汇形状控制的中间层和中心峰,如图 4(b)所示。光阑外环交汇形状主要受入射角控制,光阑内环交汇形状受中心遮挡比和入射角共同控制,但是外环和内环又同时影响整个光强分布形态。因此,外层和中间层的光强分布形成起伏状,各包含了 4 个峰值。随着 L_2 的增大,外层 x 方向的两个峰值逐渐减小, y 方向的两个峰值逐渐增大,中间层则刚好相反,这是因为外环交汇形状的短轴在 y 方向,而内环交汇形状的短轴在 x 方向,哪个方向的宽度越小,衍射就越强。同时,由于内环交汇形状的尺寸小于外环交汇形状的尺寸,因此内环的衍射强度整体上要大于外环,因此在 $L_2 = 1 \text{ km}$ 左右时外层和中间层逐渐

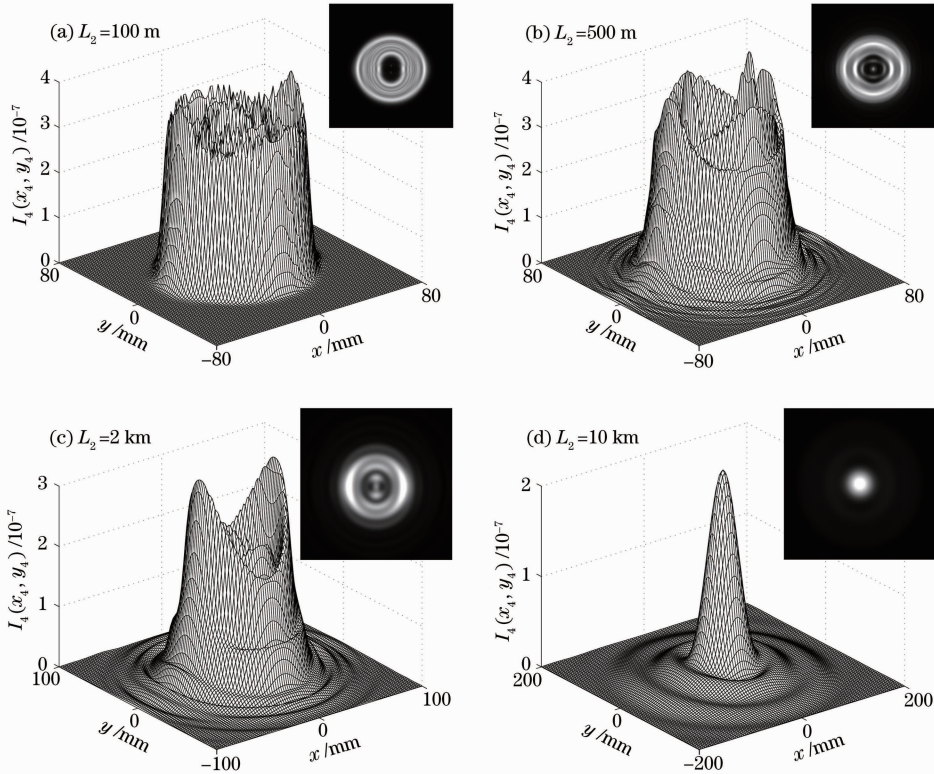


图 4 斜入射且有中心遮挡情况下的猫眼效应反射光三维光强分布图和光斑图

Fig. 4 Three-dimensional intensity distributions and faculas of the cat-eye reflected light under oblique incidence and center shelter conditions

汇合到一起,并随着 L_2 的增大在 x 方向逐渐形成有两个峰值的外层分布,如图 4(c)所示。 L_2 继续增大,中心衍射峰逐渐增多,峰值逐渐增大,外层峰值逐渐减小,到达原路返回处时,光强分布成为实心单峰形态,同时有两层强度较弱的旁瓣,如图 4(d)所示。更多数值分析表明,入射角越大,由于中心遮挡形成的空心光束将在更短的距离内演化为实心单峰光束。

4 结 论

为了更加准确地描述猫眼效应反射光束的光强分布形态,探究其畸变特征的影响因素,建立了倾斜探测光束通过探测器倾斜且有中心遮挡的猫眼效应反射系统的传输模型,并运用 Collins 衍射积分公式以及将硬边光阑窗口函数展开为有限个复高斯函数之和的方法,推导了畸变猫眼效应反射光束的三维解析表达式。与之前研究相比,该公式更具一般性。数值计算表明,入射角、探测器倾斜角以及中心遮挡的存在是引起反射光束畸变的最重要因素,离焦量的存在不会造成反射光束的畸变,它主要造成畸变参数的线性增大或减小。在远场条件下,畸变的猫眼效应反射光束随着传输距离的增大演变为实心光束。

参 考 文 献

- 1 P. G. Goetz, W. S. Rabinovich, S. C. Binari *et al.*. High-performance chirped electrode design for cat's eye retro-reflector modulators[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(21): 2278~2280
- 2 Jun Ruan, Jie Liu, Zhijing Du *et al.*. Robust external cavity diode laser system with high frequency stability for Cs atomic clock[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(3): 300~302
- 3 Xu Zhiguang, Zhang Shulian, Liang Dong *et al.*. Research of the laser transverse mode modulated by the cat's eye resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 86~90
徐志广, 张书练, 梁 栋等. 猫眼激光谐振腔横模选择特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 86~90
- 4 Lin Yongbing, Zhang Guoxiong, Li Zhen. An improved cat's eye retroreflector used in a laser tracking interferometer system[J]. *Measure Science & Technology*, 2003, **14**(6): 36~40
- 5 Zhang Guoxiong, Lin Yongbing, Li Xinghua *et al.*. Four-beam laser tracking interferometer system for three-dimensional coordinate measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1030~1036
张国雄, 林永兵, 李杏华等. 四路激光跟踪干涉三维坐标测量系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1030~1036
- 6 C. Lecocq, G. Deshors, O. Lado-bordowsky *et al.*. Sight laser

- detection modeling[C]. *SPIE*, 2003, **5086**: 280~286
- 7 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
赵延伸, 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
- 8 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Zhao Linfeng *et al.*. Studies on interference characteristics of cat-eye reflected light of defocused optical lens[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2537~2542
赵延伸, 孙华燕, 赵琳峰等. 离焦光学镜头的猫眼效应反射光干涉特性研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2537~2542
- 9 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
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
- 10 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua *et al.*. Research on the mechanism of reflection characteristics of laser irradiation on the cat eye optical lens[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(4): 2284~2294
赵延伸, 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
- 11 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua *et al.*. Propagation properties of oblique and off-axial Gaussian beams passing through cat-eye optical lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2552~2556
赵延伸, 孙华燕, 宋丰华等. 倾斜离轴高斯光束通过猫眼光学镜头的传输特性[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2552~2556
- 12 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua *et al.*. Propagation properties of Gaussian beams passing through cat eye optical lens with center shelter[J]. *Optik*, 2010, **121**(24): 2198~2201
- 13 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Yu Xiaqiong *et al.*. Three-dimensional analytical formula for oblique and off-axis Gaussian beams propagating through a cat-eye optical lens [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(3): 034101
- 14 Li Jinghui, Zhang Hujie, Zhou Shenlei *et al.*. Effect of smoothing by spectral dispersion considering the hole used in spacial filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 827~832
李菁辉, 张琥杰, 周申蕾等. 空间滤波器小孔对谱色散平滑使用效果的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 827~832
- 15 Zou Qihui, Zhu Hongyu, Duan Xi. Propagation properties of ultrashort pulsed Bessel-Gaussian beams diffracted by a circular aperture[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 235~239
邹其徽, 朱红宇, 段 茜. 受圆孔衍射的超短脉冲贝塞尔-高斯光束的传输特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 235~239
- 16 Chen Senhui, Zhang Tingrong, Feng Xiaofang. Propagation properties of cosh-squared-Gaussian beam through fractional Fourier transform systems[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(6): 1083~1087
- 17 Zhou Guoquan. Propagation properties of a Lorentz-Gauss beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2326~2331
周国泉. 洛伦兹-高斯光束的传输特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2326~2331
- 18 Chen Senhui, Zhang Tingrong, Feng Xiaofang. Transformation properties of Hermite-Laguerre-Gaussian beam in fractional Fourier transform plane[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 374~378
陈森会, 张廷蓉, 冯小芳. 分数傅里叶变换面上厄米-拉盖尔-高斯光束的变换特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 374~378