

文章编号: 0258-7025(2008)08-1149-07

卡塞格伦镜头的猫眼效应激光反射特性

赵延仲¹ 宋丰华² 孙华燕² 张曦¹ 郭惠超¹ 许嘉纹¹

(装备指挥技术学院¹ 研究生管理大队,² 光电装备系, 北京 101416)

摘要 卡塞格伦(Cassegrain)及类卡塞格伦式光学镜头在光电装备中应用广泛。为了研究具备卡塞格伦式光学镜头的光电装备所特有的猫眼效应特性,采用 ZEMAX 光学设计分析软件建立了卡塞格伦镜头反射模型,利用物理光学传输方法仿真分析了其猫眼效应反射特性,并得出了猫眼效应可探测入射角范围。对一特定卡塞格伦镜头进行了激光辐照实验,得到了猫眼效应反射光斑图像,测试了猫眼效应绝对反射率以及反射光发散角。结果表明,当发射系统位于该卡塞格伦镜头的视场内时,可以探测到猫眼效应反射光,中心遮挡造成原路返回处光强分布中心能量降低,猫眼效应绝对反射率为 11.48%,反射光发散角为 3.3 mrad,按照假设条件可以满足 30 km 内激光主动探测的需要。

关键词 激光光学;猫眼效应;卡塞格伦镜头;反射特性

中图分类号 TN 249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083508.1149

Laser Reflection Characteristics of Cat Eye Effect of Cassegrain Lens

Zhao Yanzhong¹ Song Fenghua² Sun Huayan² Zhang Xi¹ Guo Huichao¹ Xu Jiawen¹

(¹Company of Postgraduate Management, ²Department of Photoelectric Equipment, Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

Abstract Cassegrain and similar Cassegrain optical lenses are widely used in photoelectric equipment. In order to study the special laser reflection characteristics of cat eye effect of photoelectric equipment with Cassegrain optical lens, reflection model of Cassegrain lens is established using the ZEMAX software. By the method of physical optics propagation, the reflection characteristics of cat eye effect are simulated and analyzed, and the range of incidence angle in which cat eye effect could be detected is obtained. In the experiment, a Cassegrain lens is irradiated by laser, the images of cat eye effect reflection light are obtained, and the absolute reflectivity of cat eye effect and the divergence angle of the reflection light are tested. The results show that the reflection light of cat eye effect can be detected when the expanding system is placed in the field-view of the Cassegrain lens. The center shelter leads to the decrease of the center energy at the return place. The absolute reflectivity of cat eye effect is 11.48%, the divergence angle of the reflection light is 3.3 mrad, so a detection with distance of 30 km can be easily achieved.

Key words laser optics; cat eye effect; Cassegrain lens; reflection characteristics

1 引 言

猫眼逆反射器具有将任意角度入射的光线按原向返回的特性,应用于干涉测量、目标跟踪等领域时可以提高测量精度^[1~3];应用于激光器谐振腔时可以提高激光器的稳定性^[4~6];应用于纳米激光器测尺时可以提高测量范围^[7]。而大多数成像探测或非

成像探测所用光学镜头的焦平面处都安装有反射或半反射元件,与猫眼逆反射器一样,在受到激光束辐照时能够产生原路返回的准直回光,这就是光学镜头的“猫眼效应”。利用被探测目标携带光学镜头的猫眼效应进行激光主动探测,可以大大提高探测距离和定位精度^[8,9]。在这些应用中,猫眼逆反射器

收稿日期:2007-09-11;收到修改稿日期:2008-01-03

基金项目:“十一五”国防预研基金(513210902)资助课题。

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

E-mail: zhaoyan198@tom.com

导师简介:孙华燕(1963—),女,山东人,教授,博士生导师,主要从事图像处理和光电测量的研究与开发。

E-mail: shy221528@vip.sina.com

作为合作目标,具有较好的反射光特性和较大的接收角;而光学镜头作为非合作目标,其猫眼效应反射光特性较差。

虽然猫眼效应已经在激光主动探测领域得到应用,但其本身的理论以及实验研究还不成熟。对于同轴透射式光学镜头,只要探测激光入射角小于其视场角,产生的猫眼效应原路返回光即具有较好的规律性^[10]。对于离轴反射式光学镜头,能够产生猫眼效应反射光的探测激光入射角范围小于镜头的视场角范围,且反射光束畸变较大^[11]。透射式光学系统造价高、测试困难、存在色差,离轴式光学系统造价也较高,而卡塞格伦(Cassegrain)系统则具有消球差、筒长短、无实际光线汇聚点等优点。因此,在光电装备中应用最为广泛的是卡塞格伦式或经过改进的卡塞格伦式光学系统。本文对卡塞格伦式镜头的猫眼效应反射特性进行了仿真和实验研究,测试了猫眼效应反射光的发散角及反射率等关键数据,弄清了针对此类目标进行主动探测的可行性。

2 猫眼效应的基本原理

卡塞格伦式光学系统有很多结构形式,包括双反式、折反式等。经典的卡塞格伦系统主镜为抛物面,次镜为双曲面,这是次镜对有限距离物体成像时满足系统消球差应具有的面形,其他的形式大多是在此基础上改进的。图 1 所示为卡塞格伦系统的猫眼效应原理示意图。设此时的像面探测器反射为镜面反射,反射率为 1(反射率将在实验中测定)。根据图 1 的光线追迹过程可以看出,当入射光线为近轴光线且入射角小于镜头的视场角时,从探测器反射的光线将按照入射光的对称光路反向传输。根据几何光学原理可知两束平行的入射光会聚于焦平面同一点。因此从光学系统外观察时,便可以发现反射光与入射光完全平行。当入射光束宽度较大,全部覆盖镜头窗口时,反射光束将沿着入射光束的光路原路返回,这就是卡塞格伦镜头的“猫眼效应”原理。

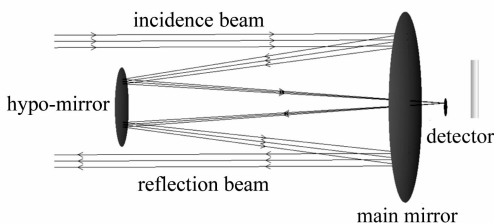


图 1 卡塞格伦镜头的猫眼效应原理示意图

Fig. 1 Cat eye effect of Cassegrain lens

3 仿真分析

3.1 模型建立

为使仿真真实,并在实验中进行验证,利用 ZEMAX 光学设计软件设计了带有遮光罩的卡塞格伦式镜头如图 2 所示。其口径为 100 mm,系统焦距为 320 mm,前遮光罩长度为 80 mm,中心遮挡比为 1:5,探测器光敏面直径为 2.8 mm,视场角为 $\pm 0.25^\circ$ 。

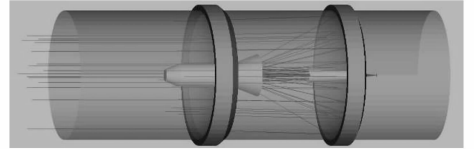


图 2 带有遮光罩的卡塞格伦式镜头模型

Fig. 2 Model of Cassegrain lens with hood

3.2 仿真原理

利用 ZEMAX 的物理光学传输原理进行仿真分析,光束建模使用数值阵列。入射高斯光束的数学表达式为^[12]

$$E(x, y) = \begin{cases} E_0 e^{-\left[\left(\frac{x-dx}{w_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{y-dy}{w_{0y}}\right)^2\right]}, \\ \text{当 } \left(\frac{x-dx}{w_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{y-dy}{w_{0y}}\right)^2 \leq 1, \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中 E_0 为初始最高能量, w_{0x} 和 w_{0y} 为 x 和 y 方向的束腰半径。

初始建立的光束波前被分成点阵后,在 ZEMAX 镜头建模中进入第一个面,然后依次穿过整个系统。光束在两个光学面之间的传播通过衍射来计算,并根据菲涅耳数确定传播应符合菲涅耳衍射还是夫朗禾费衍射规律。菲涅耳数的表达式为^[12]

$$F_n = \frac{2}{\lambda} [\sqrt{Z^2 + w^2} - Z], \quad (2)$$

式中 λ 为激光波长, w 为初始位置的光束半径, Z 为初始位置到观察点的距离(即传播距离)。当 $Z \gg w$ 时, (2) 式可简化为^[13]

$$F_n = \frac{w^2}{\lambda Z}. \quad (3)$$

随着距离的增大,菲涅耳数逐渐减小。当菲涅耳数小于 1 时,相对于初始点,观察点处的光束是远场的,反之则认为是近场的。近场时光束传输遵循菲涅耳衍射,其电场分布表达式为^[12]

$$E(x_2, y_2, z_2) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda\Delta z} q(w_2, \Delta z) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x_1, y_1, z_1) \times q(w_1, \Delta z) e^{-\frac{i2\pi}{\lambda\Delta z}(x_1 x_2 + y_1 y_2)} dx_1 dy_1, \quad (4)$$

式中 Δz 为两点间的距离, w_1 和 w_2 为两个位置处的光束半径, $q(w, \Delta z)$ 为二次相位因子, 表达式为

$$q(w, \Delta z) = e^{i\pi w^2 / \lambda \Delta z} \quad (5)$$

当 Δz 非常大时, $q(w, \Delta z)$ 可以忽略, (4) 式变为夫朗禾费衍射, 其表达式为^[12]

$$E(x_2, y_2, z_2) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda \Delta z} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x_1, y_1, z_1) e^{-\frac{i2\pi}{\lambda \Delta z}(x_1 x_2 + y_1 y_2)} dx_1 dy_1 = \text{FF}[(x_2, y_2, z_2)], \quad (6)$$

式中 $\text{FF}[\]$ 表示傅里叶变换。

3.3 近场情况

入射激光发散角为 0.5 mrad, 发射功率为 100 W, 发射距离为 25 m, 激光束在目标镜头处的直径为 20 mm。如图 3 所示为镜头出瞳处以及原路返回处的猫眼效应反射光斑图像及其 y 方向的光强分布曲线。可以看出, 入射光斑与反射光斑处于对称位置, 在出瞳处反射光光强分布衍射峰较多, 随着传输距离的增加, 衍射峰逐渐减少, 传输至原路返回处时, 只有七个衍射峰。由于入射光束直径远小于镜头口径, 在改变入射角时光斑形状变化不大, 而中心衍射峰峰值则随着入射角的增大而减小。改变入射位置时, 反射光斑与入射光斑的位置始终保持对称, 其光强分布特性不变。

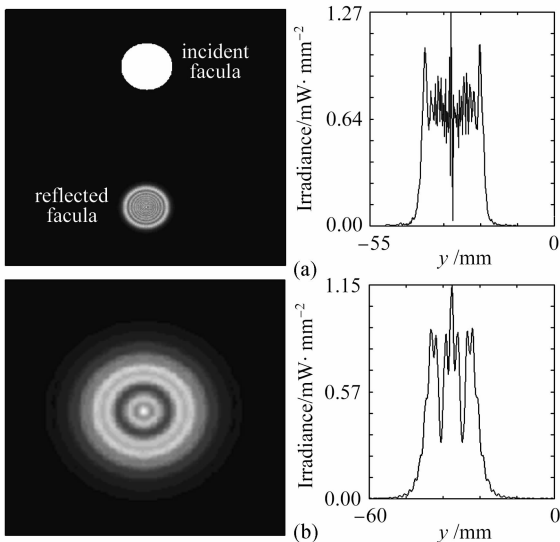


图 3 镜头出瞳处(a)以及原路返回处(b)的猫眼效应反射光斑图像及其 y 方向的光强分布曲线

Fig. 3 Cat eye effect reflection facula and its irradiance distribution curves at the position of the lens (a) and the return place (b)

图 4 所示为入射角等于镜头的临界视场角时, 镜头出瞳处以及原路返回处的猫眼效应反射光斑图

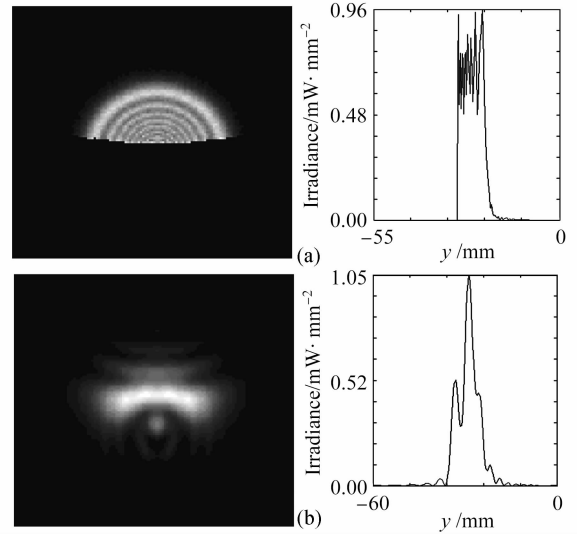


图 4 入射角等于临界视场角时, 镜头出瞳处(a)以及原路返回处(b)的猫眼效应反射光斑图像及其 y 方向的光强分布曲线

Fig. 4 Cat eye effect reflection facula and its irradiance distribution curves at the position of the lens (a) and the return place (b) when the incidence angle is equal to the critical field-view angle

像及其 y 方向的光强分布曲线。可以看出, 入射角等于临界视场角时, 出瞳处的反射光斑被遮挡一半, 随着传输距离的增加衍射峰逐渐汇合在一起, 原路返回处的光强分布出现畸变, 说明探测器边缘的衍射影响较大。

3.4 远场情况

近距离时的情况说明了猫眼效应的存在性及其原路返回性, 但主动探测应用的是远场情况, 此时镜头将被全部覆盖, 镜头上的光束分布也趋于均匀。设发射距离为 30 km, 其他参数不变。图 5 所示为入射角不同时, 距离镜头出瞳 25 m 处的猫眼效应反射光光强分布图。可以看出, 其中心缺口是两个圆孔的交汇, 这两个圆孔分别是入射光束在进入镜头和从镜头出射时受到的遮挡, 它们的尺寸是入射角的函数; 衍射级数与入射角无关。

图 6 所示为入射角不同时原路返回处的猫眼效应反射光光强分布图。可以看出, 在远场情况下, 猫眼效应反射光光强分布随着入射角的增大而逐渐畸变, 且光强迅速降低。

猫眼效应反射光特性数据如表 1 所示。其中 1 m PIB(桶中功率)定义为在 1 m 直径的“桶”中围住的激光功率占总功率的份额, 即 1 m 环围功率与总功率的比值, 在物理上用于表征光束的可聚焦能力。从表中可见, 反射光总功率与入射角成反比并

保持线性关系;入射角小于 0.15° 时,环围功率及环围功率比与入射角成反比并保持线性;入射角大于 0.15° 时,由于反射光光强分布受衍射影响随着入射

角的增大而加强,环围功率比突增;反射光发散角与入射光发散角相差不多,仅是随着入射角的增大远场光斑等效直径减小导致发散角减小。

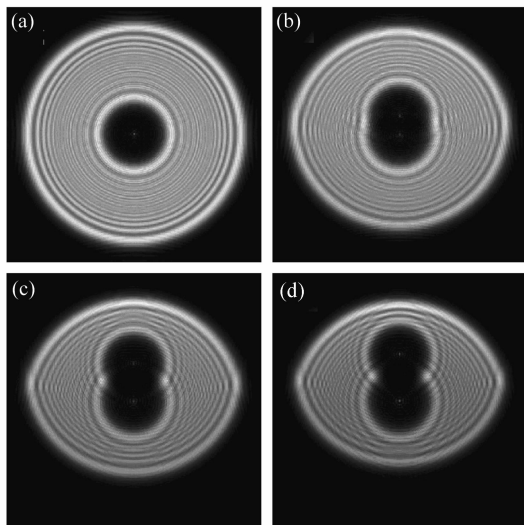


图5 入射角为 0° (a), 0.1° (b), 0.2° (c)和 0.25° (d)时距离镜头出瞳25 m处的猫眼效应反射光光强分布图

Fig. 5 Distributions of cat eye effect reflection light at the distance of 25 m from the lens when the incidence angles are 0° (a), 0.1° (b), 0.2° (c) and 0.25° (d), respectively

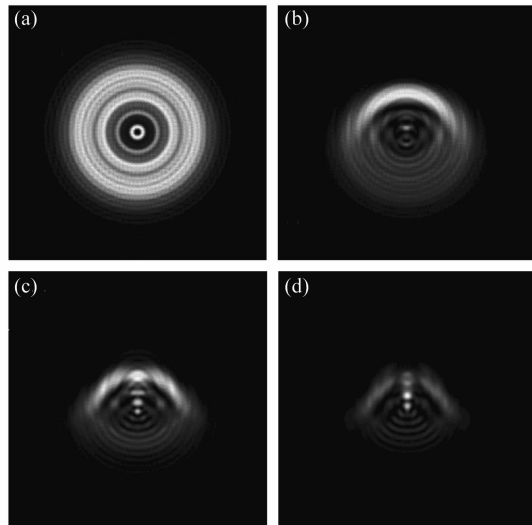


图6 入射角为 0° (a), 0.1° (b), 0.2° (c)和 0.25° (d)时原路返回处的猫眼效应反射光光强分布图

Fig. 6 Distributions of cat eye effect reflection light at the return place when the incidence angles are 0° (a), 0.1° (b), 0.2° (c) and 0.25° (d), respectively

表1 猫眼效应反射光特性数据表

Table 1 Data of the reflection characteristics of cat eye effect

Incidence angle / $^\circ$	Total power /W	Encircled power in diameter of 1 m/mW	1 m PIB	Divergence angle /mrad
0	1.0313	10.300	0.9990	0.5305
0.01	1.0258	10.158	0.9903	0.5304
0.03	0.9996	9.1746	0.9178	0.5297
0.05	0.9733	7.3083	0.7509	0.5285
0.10	0.9060	6.7665	0.7469	0.5229
0.14	0.8514	5.1015	0.5992	0.5152
0.15	0.8379	6.3230	0.7546	0.5135
0.16	0.8241	8.8380	1.0724	0.5112
0.18	0.7972	16.073	2.0162	0.5061
0.20	0.7704	22.808	2.9605	0.5005
0.25	0.7052	50.241	7.1244	0.4841

3.5 中心遮挡的影响

从3.4节可见,远场情况下猫眼效应反射光光强分布畸变较大,导致了反射光特性与入射角的非线性关系,其中最重要的影响因素是中心遮挡。空心的猫眼效应反射光束更容易受到入射角、遮光罩等因素的影响,使得在不同发射距离时原路返回处的猫眼效应反射光具有不同的光强分布。仿真得到了在该系统遮挡比下,几个不同量级发射距离时原

路返回处的猫眼效应反射光光强分布,如图7所示。从图中可见,在距离小于3 km时,光斑半径小于1 m,中心能量可聚焦度较高;距离大于30 km之后,峰值不再位于中心位置,中心能量可聚焦度迅速降低。因此,远场情况下中心遮挡将引起反射光中心能量的丢失,从而影响可探测距离。针对该系统,探测距离小于30 km时,原路返回处的猫眼效应反射光环围功率可以满足探测要求。

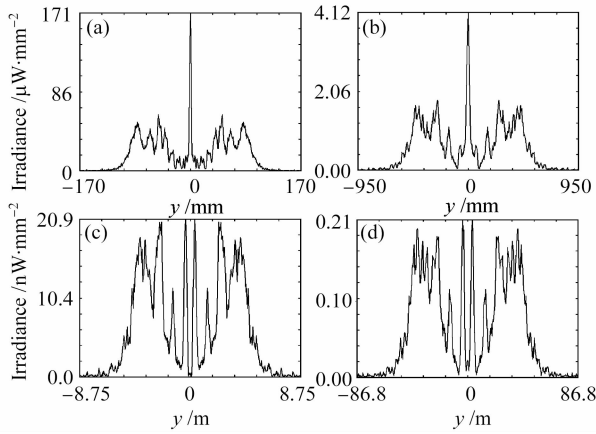


图 7 距离为 0.3 km(a), 3 km(b), 30 km(c) 和 300 km (d) 时原路返回处的猫眼效应反射光光强分布曲线
 Fig. 7 Distribution curves of cat eye effect reflection light at the return place when the distances are 0.3 km (a), 3 km (b), 30 km (c) and 300 km (d), respectively

4 实验

4.1 装置及方法

猫眼效应测试实验装置如图 8 所示。发射激光经小分束镜后分成两路，一路由探测器 1 接收进行入射能量测试，一路经反射镜转出后进入猫眼镜头。原路返回的猫眼效应反射光经大分束镜反射后，经接收光学系统聚焦后由探测器 2 接收进行能量测试；放置接收靶板 1 于接收光学系统之前，利用 CCD 摄像机采集靶板上的猫眼效应反射光斑，进行空间分布测试；撤去大分束镜，放置中心开有小孔的接收靶板 2 于发射端，使发射激光从其中心开孔经过，同样利用 CCD 摄像机采集接收靶板 2 上的猫眼效应反射光斑，进行空间分布测试。装置中的两个反射镜是为了在实验室内转折并延长光路，根据实际情况可以去除。实验中的主要仪器参数为：532 nm 半导体激光器发射功率为 115 mW，调制频

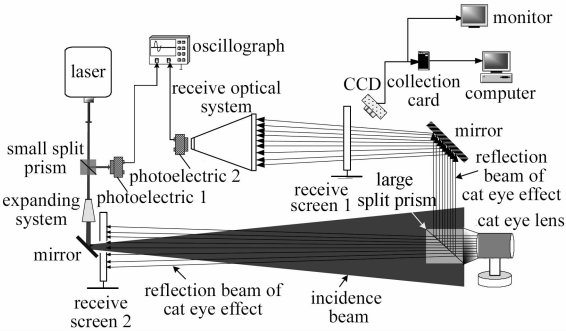


图 8 猫眼效应测试实验装置示意图

Fig. 8 Experimental setup of cat eye effect measurement

率为 10 Hz，扩束后全发散角为 4.3 mrad，光电探测器最小可探测功率为 2×10^{-7} W。实验所用卡塞格伦镜头的主要参数与仿真建立的模型参数相同，不同的是该镜头具有保护窗口，如图 9 所示。

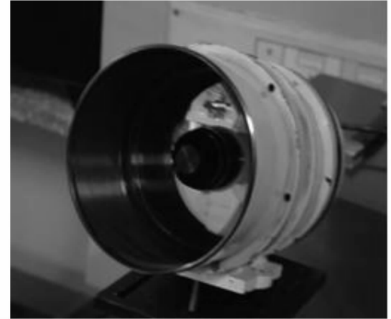


图 9 实验中所用的卡塞格伦镜头

Fig. 9 Cassegrain lens used in experiment

4.2 结果和讨论

定义猫眼效应反射光功率与进入镜头的光功率之比为猫眼效应绝对反射率，在入射角为 0° 时，它是镜头焦平面探测器反射率与光学系统透过率平方的乘积。测试绝对反射率的意义在于它仅与镜头的参数有关，而与探测距离无关，因此可以直接用于主动探测的作用距离公式。在近距离测试该镜头的猫眼效应绝对反射率，此时入射光全部进入目标镜头，反射光不受镜头结构的影响。实验现象如图 10 所示，可以看出，猫眼效应反射光与入射光保持平行，窗口玻璃反射光与入射光具有一定夹角，不具有原路返回性。此时入射光与反射光不重合，直接利用功率计对反射光进行测试，测得的猫眼效应反射光功率为 13.2 mW，可得绝对反射率为 11.48%。

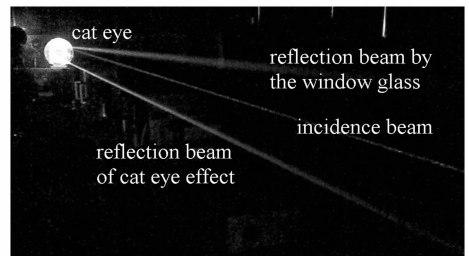


图 10 猫眼效应反射光与窗口玻璃反射光

Fig. 10 Reflection beam of cat eye effect and reflection beam by the window glass

按照图 8 布置光路，设发射距离 L 为 60 m。调节卡塞格伦镜头的俯仰角和水平角使其反射光斑达到最佳，在近距离的接收靶板 1 上接收到的反射光斑图像如图 11(a) 所示，此时猫眼效应反射光斑与窗口玻璃的反射光斑重合在一起。微调卡塞格伦镜头的水平角即入射角，得到反射光斑的变化情况如

图 11(b)~(d) 所示。可以看出,随着入射角的增大,两个光斑逐渐分离,猫眼效应反射光斑(左侧光斑)的位置不变化,说明它的原路返回性是固有的,与入射角等参数没有关系;调节入射角时窗口玻璃反射光斑的形状变化不大;猫眼效应反射光斑与仿真中的光斑具有一定相似性,除具有中心缺孔外,还有四个小缝,由中心的次镜支撑架的遮挡所致。此时测得猫眼效应反射光功率与入射光功率之比为 1.24%,可调节入射角范围为 0.23° ,入射角为临界视场角时光斑消失。

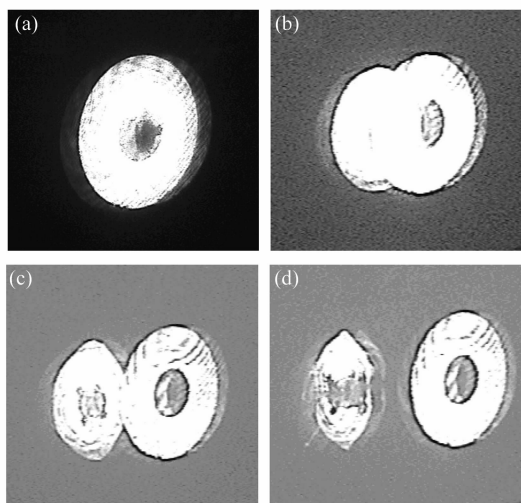


图 11 入射角为 0° (a), 0.05° (b), 0.1° (c) 和 0.2° (d) 时接收靶板 1 上的反射光斑图像

Fig. 11 Reflection faculae on receive screen 1 when the incidence angles are 0° (a), 0.05° (b), 0.1° (c) and 0.2° (d), respectively

调节入射角,在接收靶板 2 上得到的反射光斑图像如图 12 所示。可以看出,入射角为 0° 时,窗口玻璃反射光斑与猫眼效应反射光斑相重合,且保持环形形状不变,呈干涉条纹分布。猫眼效应反射光斑为正圆形,呈衍射环状条纹分布,但是该视场点对应的探测器像元由于曾受强激光辐照而有所损坏,因此光斑缺损严重;入射角增大时,猫眼效应反射光斑严格位于原路返回处,窗口玻璃的反射光斑逐渐偏离,没有利用价值;入射角为 0.05° 时反射光斑中心为两个交汇的圆孔。但随着入射角的继续增大,猫眼效应反射光斑严重畸形。这说明衍射的影响逐渐加强,也说明镜头中的任何元件,包括支架、挡光环、遮光罩等都对衍射起促进作用,尤其是非中心对称元件对猫眼效应反射光均匀性影响较大。入射角为 0° 时,原路返回处的猫眼效应反射光斑横向直径 d_2 为 298 mm,反射光从镜头处出射的宽度 d_1 为镜

头口径 100 mm,得出反射光束的全发散角

$$\theta = \frac{d_2 - d_1}{L} \quad (7)$$

为 3.3 mrad,稍小于入射激光发散角。

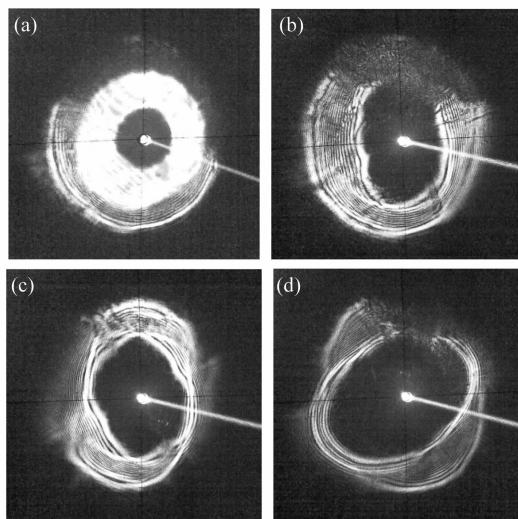


图 12 入射角为 0° (a), 0.05° (b), 0.1° (c) 和 0.2° (d) 时接收靶板 2 上的反射光斑图像

Fig. 12 Reflection faculae on receive screen 2 when the incidence angles are 0° (a), 0.05° (b), 0.1° (c) and 0.2° (d), respectively

5 结 论

运用 ZEMAX 光学设计软件建立了巴塞格伦式镜头仿真模型,并利用物理光学传输方法对该镜头的猫眼效应特性进行了仿真,并在近场进行了实验验证。仿真及实验结果表明,激光辐照巴塞格伦镜头时能够产生空心的猫眼效应反射光束。由于激光束通过中心遮挡体及非对称光学元件时受到的衍射影响,斜入射时产生的猫眼效应反射光在后向传输过程中畸变较大,因此可用入射角范围稍小于镜头的视场角;镜头窗口玻璃对 532 nm 激光的反射较强,其反射光在近场实验时容易与猫眼效应反射光相混淆;532 nm 激光辐照时该镜头的猫眼效应绝对反射率为 11.48%,入射角为 0° 时反射光发散角为 3.3 mrad。结合仿真中的规律,考虑到大气衰减等因素,在入射激光功率为 100 W,入射角小于目标镜头的视场角,距离为几十千米时,1 m 口径接收系统可接收的功率可达 10^{-6} W 量级。在此条件下,针对该镜头可以实施有效的激光主动探测和定位。从实验与仿真的比对可以发现,对于存在中心遮挡的巴塞格伦式光学镜头,非中心对称元件对猫眼效应反射光的畸变起重要影响。同理,镜头的非圆对称加工

误差^[14]对猫眼效应反射光的畸变也有重要影响,而猫眼效应反射光的质量是决定其能否应用的关键,因此,对猫眼效应反射光进行更为合理的数学描述和更为准确的仿真是十分必要的。

参 考 文 献

- 1 Toshiyuki Takatsuji, Mitsuo Goto, Sonko Osawa *et al.*. Whole-viewing-angle cat's eye retroreflector as a target of laser trackers [J]. *Measure Science & Technology*, 1999, **10**(7):87~90
- 2 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
- 3 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,李杏花等. 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
- 4 S. A. Dimakov, S. I. Kliment'ev, I. V. Khloponina. Cavity with a cat's-eye reflector based on elements of conical optics [J]. *J. Opt. Technol.*, 2002, **69**(8):536~540
- 5 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
- 6 Xu Zhiguang, Zhang Shulian, Du Wenhua *et al.*. Application of cat's eye resonator in long full-external He-Ne lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12):1609~1613
徐志广,张书练,杜文华等. 猫眼谐振腔在全外腔长氦氖激光器中的应用[J]. *中国激光*, 2005, **32**(12):1609~1613
- 7 Du Wenhua, Zhang Shulian, Li Yan. Optimizing design of the cat's eye cavity in a nanometer laser ruler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1305~1308
杜文华,张书练,李岩. 纳米激光器测尺中猫眼腔的优化设计[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1305~1308
- 8 C. Lecocq, G. Deshors, O. Lado-Bordowsky *et al.*. Sight laser detection modeling [C]. *SPIE*, 2003, **5086**:280~286
- 9 Jiang Zhiguo, Tan Jichun, Liang Jing *et al.*. Suitability of "Cat's eye" effect for reconnaissance by the scanning laser [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(5):549~551
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):549~551
- 10 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua. Effect of incidence angle on reflecting characteristics of cat eye effect [J]. *High Power Laser and Particles*, 2007, **19**(3):364~368
赵延伸,孙华燕,宋丰华. 探测激光入射角对猫眼效应反射特性的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(3):364~368
- 11 Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua *et al.*. Laser reflection characteristics of "cat eye effect" of photoelectric equipment [C]. *Proc. 7th International Symposium on Test and Measurement*, 2007, **4**:2991~2994
- 12 ZEMAX Development Corporation. ZEMAX Optical Design Program User's Guide [EB/OL]. <http://www.zemax.com>. 2005-2-3. 515~527
- 13 You Kaiming, Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Study on modulation property of broadband laser propagation in free space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):965~970
游开明,文双春,范滇元. 宽频带激光自由空间传输的调制特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7):965~970
- 14 Zeng Xiahui, Wu Fengtie, Xing Xiaoxue *et al.*. Influence of the manufacture error with non-circular symmetry in an axicon on the Bessel beams quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):809~813
曾夏辉,吴逢铁,邢笑雪等. 轴棱锥非圆对称加工误差对贝塞耳光束质量的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6):809~813