

doi:10.3788/gzxb20164506.0614004

凝视光电成像系统猫眼回波特性的理论与实验研究

雷鹏, 孙可, 张玉发, 李峰, 聂劲松, 孙晓泉

(电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

摘 要:以惠更斯-菲涅尔衍射公式为基础, 推导了猫眼系统的回波光场, 并以二维光栅作为凝视光电成像系统的焦平面器件进行理论计算和实验验证. 分析了光阑孔径对回波图像与焦平面器件调制之间相关性及其空间截止频率对猫眼回波的影响. 结果表明:随着光阑孔径的减小, 回波图像信息减少, 与焦平面上光斑的相关性降低;随着光阑孔径的增大, 光栅干涉形成的次级光斑逐渐出现在回波图像中, 回波图像也由于各级光斑的干涉变得复杂, 对应的空间频谱变化反映了各级光斑的交叠情况. 该研究对利用回波特征用于凝视光电成像侦察设备实施激光主动探测具有实际应用价值.

关键词:激光技术;猫眼回波;波动光学;二维光栅;光阑孔径;空间频谱

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)06-0614004-7

Cat's Eye Echo-wave Characteristics of Staring Photoelectric Imaging System

LEI Peng, SUN Ke, ZHANG Yu-fa, LI Feng, NIE Jin-song, SUN Xiao-quan

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

Abstract: The echo-wave was deduced based on the Huygens-Fresnel diffraction formula. The numerical results with the two-dimensional grating as focal plane device of staring photoelectric imaging system were verified experimentally. The impact of aperture size on the correlation between the echo image and the modulation of focal plane device was analyzed, and the influence of the cut-off frequency on the echo-wave was also discussed. With the size of aperture decreasing, the information of echo wave decreases, and the correlation also decreases. What's more, with the aperture size increasing, more and more diffraction spots from the grating appear in the echo-wave image which shows complex pattern because of the interference between the spots. The spatial frequency of the pattern reflects the overlapping of the diffraction spot. The study of echo characteristics has practical application value for laser active detection on photoelectric reconnaissance equipment.

Key words: Laser technology; Cat's eye echo-wave; Wave optics; Two-dimensional grating; Aperture size; Spatial frequency

OCIS Codes: 140.3490; 050.1950; 070.6120; 100.2960

0 引言

透镜与其焦平面反射物可以构成一种后向反射器,称为猫眼后向反射器.该后向反射器具有不改变反射光偏振状态的优点,最初被用于光谱分析设备中^[1].该效应普遍存在于光学观察仪器和光电成像设备中,可以对侦察设备进行激光主动探测^[2],最典型的例子是用于对狙击手进行激光搜索定位^[3-4].在复杂背景下,对猫眼后向反射回波的目标识别^[5-6]需考虑器件反

射率^[7]、离焦量、大气透过率^[8]等因素对激光回波功率的影响.基于广义衍射积分和矩阵光学的物理光学法可以分析猫眼回波反射特性机理^[9],以及分析在大气湍流条件下猫眼后向反射回波图像的特征^[10]等,加强该效应在实际应用中的可行性.然而这些研究大多将焦平面反射物简化为平面,但是,实际侦察设备中处于焦平面的反射物却不为平面,如光电侦察设备中的凝视成像焦平面器件就是大量像元构成的二维阵列^[11-12].由于猫眼反射器的回波特征对焦平面反射物

基金项目:脉冲功率激光技术国家重点实验室基金(No. SKL2014ZR06)资助

第一作者:雷鹏(1987-),男,博士研究生,主要研究方向为激光应用技术. Email:leipeng0214@sina.com

导师(通讯作者):孙晓泉(1962-),男,研究员,博导,主要研究方向为光学技术. Email:sun_xq@vip.163.com

收稿日期:2015-12-23;录用日期:2016-02-03

<http://www.photon.ac.cn>

的特性非常敏感,而焦平面反射物的结构会对回波产生影响,因此研究带有二维阵列结构的猫眼反射器的回波特征,对于利用该特征对光电侦察设备实施激光主动探测具有实际应用价值.

凝视成像焦平面器件具有复杂的结构,像元单元主要由微透镜、遮光铝膜和光敏层构成,但器件整体结构可以等效为二维光栅^[13],为研究其回波特征提供了便利.本文从衍射公式出发推导猫眼系统的回波光场,并以二维光栅简化焦平面器件,对影响猫眼回波的因

素进行分析.在猫眼光学镜头前放置可变光阑,研究光阑孔径变化对猫眼回波图像及其对应空间频谱的影响.

1 理论研究

1.1 理论推导

将高斯光束通过猫眼系统的光学传输过程展开为 $4f$ 系统,如图1.设透镜表面入射光复振幅分布为 $u(x_0, y_0)$,经过透镜后到达焦平面上的光场为 $u_p(\xi, \eta)$ ^[14]

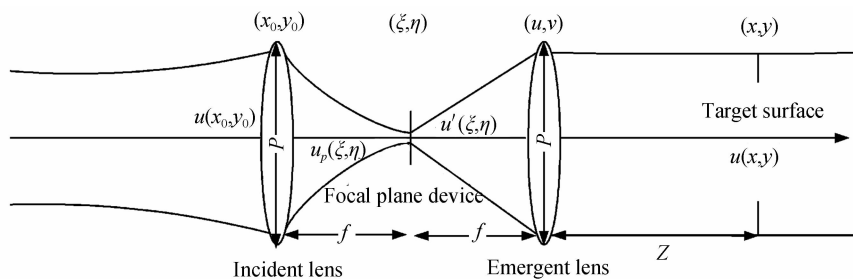


图1 猫眼系统的光学传输等效图

Fig. 1 The optical equivalent picture of cat's eye system

$$u_p(\xi, \eta) = \frac{\exp(ikf)}{i\lambda f} \exp\left[\frac{ik}{2f}(\xi^2 + \eta^2)\right] \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x_0, y_0) p(x_0, y_0) \exp\left[-\frac{i2\pi}{\lambda f}(\xi x_0 + \eta y_0)\right] dx_0 dy_0 \quad (1)$$

式中, λ 为入射波长(波数 $k = 2\pi/\lambda$), f 为透镜焦距, $p(x_0, y_0)$ 为透镜的孔径函数.

如果在透镜焦平面上放置光调制器,其透过率函数为 $t(\xi, \eta)$,经过光调制器后的光场经由一次菲涅尔衍射到达出射透镜表面,经过透镜变换后,再经过菲涅尔衍射到达距离 z 的观察平面,将公式整理可得

$$u(x, y) = -\frac{\exp[jk(z+f)]}{\lambda^2 z f} \exp\left(\frac{j\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)\right) \times \iint u_p(\xi, \eta) t(\xi, \eta) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda f}(\xi^2 + \eta^2)\right] d\xi d\eta \times \iint p(u, v) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda f}(u^2 + v^2)\right] \exp\left\{-j2\pi\left[\left(\frac{x}{\lambda z} + \frac{\xi}{\lambda f}\right)u + \left(\frac{y}{\lambda z} + \frac{\eta}{\lambda f}\right)v\right]\right\} dudv \quad (2)$$

令

$$h(x, y; \xi, \eta) = -\frac{\exp[jk(z+f)]}{\lambda^2 z f} \exp\left(\frac{j\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)\right) \times \iint p(u, v) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda f}(u^2 + v^2)\right] \exp\left\{-j2\pi\left[\left(\frac{x}{\lambda z} + \frac{\xi}{\lambda f}\right)u + \left(\frac{y}{\lambda z} + \frac{\eta}{\lambda f}\right)v\right]\right\} dudv \quad (3)$$

将积分前的常量项记为 C ,并记 $M = -z/f, \xi' = M\xi$ 和 $\eta' = M\eta$,则

$$h(x, y; \xi, \eta) = C \iint p(u, v) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda f}(u^2 + v^2)\right] \exp\left\{-\frac{j2\pi}{\lambda z}[(x - \xi')u + (y - \eta')v]\right\} dudv = h(x - \xi', y - \eta') \quad (4)$$

式(4)说明,考虑透镜孔径的限制,在理想情况下,该系统是空间线性不变系统.将式(4)带入式(2),得到

$$u(x, y) = \left[\frac{1}{M^2} u_p\left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right) t\left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right) \exp\left\{\frac{j\pi}{\lambda z}[(x)^2 + (y)^2]\right\}\right] \otimes h(x, y) \quad (5)$$

式(5)即是光学镜头猫眼回波的解析传输公式,进行数值仿真计算时,光强分布是 $u(x, y)$ 与它共轭函数的乘积.

1.2 数值仿真

式(5)表明,激光波长一定时,回波光场复振幅分布与入射光场、焦平面上器件的调制、回波探测距离有关外,并受光学镜头孔径的影响.为便于理论研究,将焦平面器件简化为二维矩孔光栅^[15],结构参量与验证实验所用器件参量相对应,矩孔不透光,矩孔之间的间隙透光.

在进行数值计算时,入射激光波长为 532 nm,束腰半径为 0.4 mm,焦平面上二维光栅周期为 $7.2 \mu\text{m}$ (水平) $\times 4.7 \mu\text{m}$ (竖直),透光宽度为 $2.4 \mu\text{m}$ (水平) $\times 1.2 \mu\text{m}$ (竖直).

激光器和接收靶面距离猫眼光学镜头均为 20 m,镜头焦距为 50mm,不同 F 数条件下,回波图像与对应的焦平面光斑分布如图2.当 F 数为 1.8 时,回波阵列光斑的周期与焦平面主光斑的周期相同,随着 F 数的增大,回波光斑逐渐由阵列结构向圆斑转化.同时,计

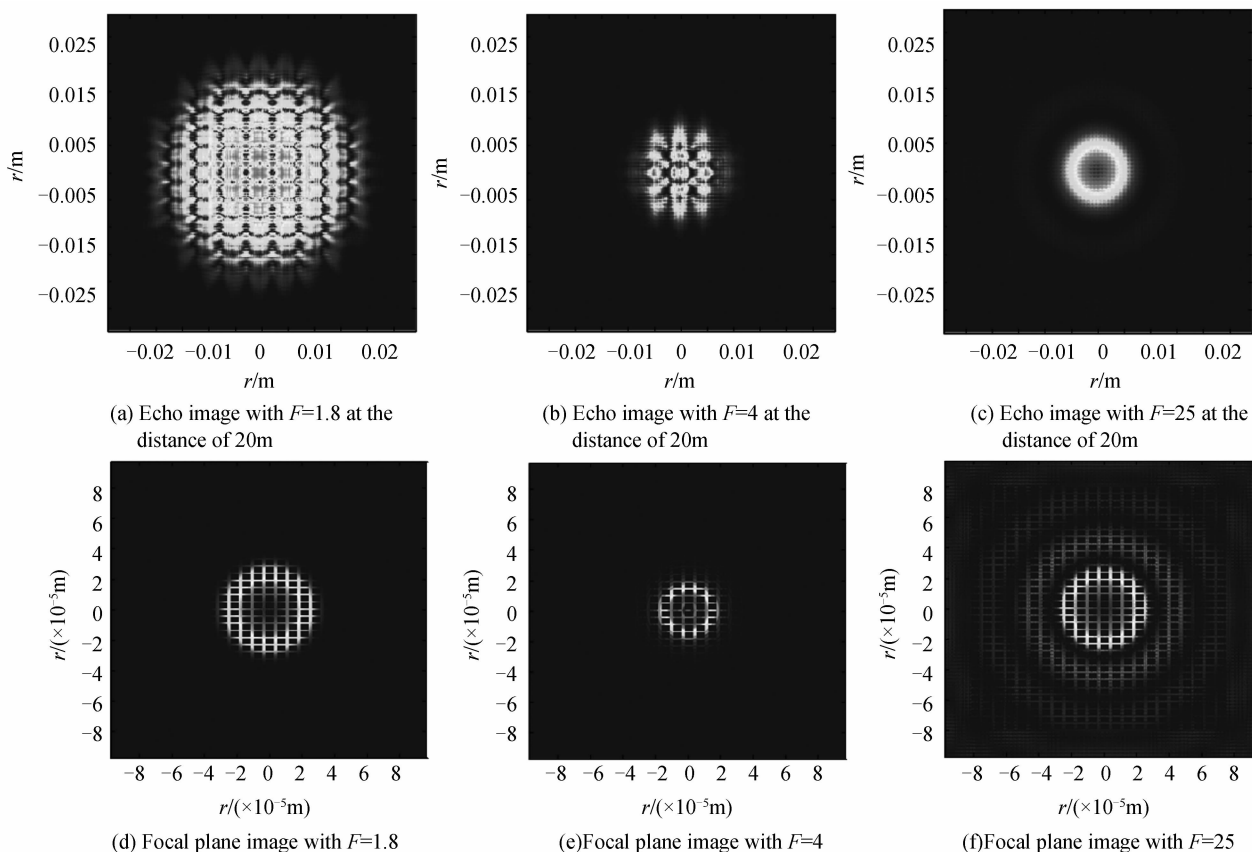


图 2 不同镜头 F 数的二维光栅猫眼回波仿真计算 ($z=20\text{ m}$)

Fig. 2 The cat's eye echo simulation of two dimensional grating under different lens F number ($z=20\text{ m}$)

算发现焦平面光栅位置的移动对回波图像光斑的影响也随着 F 数的增大而减小,当 F 数为 25 时,焦平面光栅的移动对回波图像没有影响.

镜头 F 数为 1.8 时,计算结果如图 3. 回波图像呈竖直方向的长椭圆分布,而焦平面光斑能量也主要集中在竖直方向.

激光器与接收靶面距离猫眼光学镜头均为 200 m,

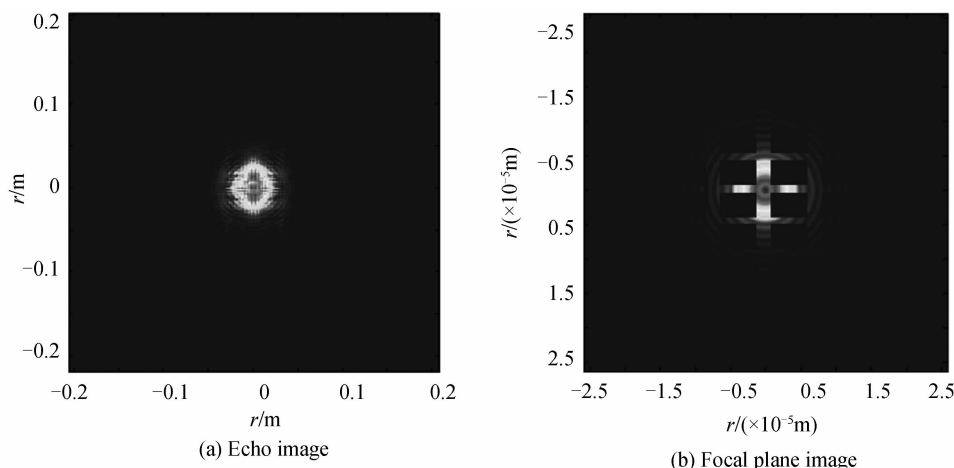


图 3 光栅结构的猫眼回波仿真计算 ($z=200\text{ m}$, F 数为 1.8)

Fig. 3 The cat's eye echo simulation of two dimensional grating ($z=200\text{ m}$, $F=1.8$)

与图 3 的计算距离相同,当光学镜头 F 数为 4 时,计算结果如图 4,回波图像由圆斑和外环组成.当焦平面上光斑具有原点对称或轴对称分布时,其回波图像

的外环也具有相同的分布.对于 F 数为 25 的光学镜头,其回波图像同图 2(c) 相似,只是由于远距离以及衍射角的原因,图像尺寸增大,不再赘述.

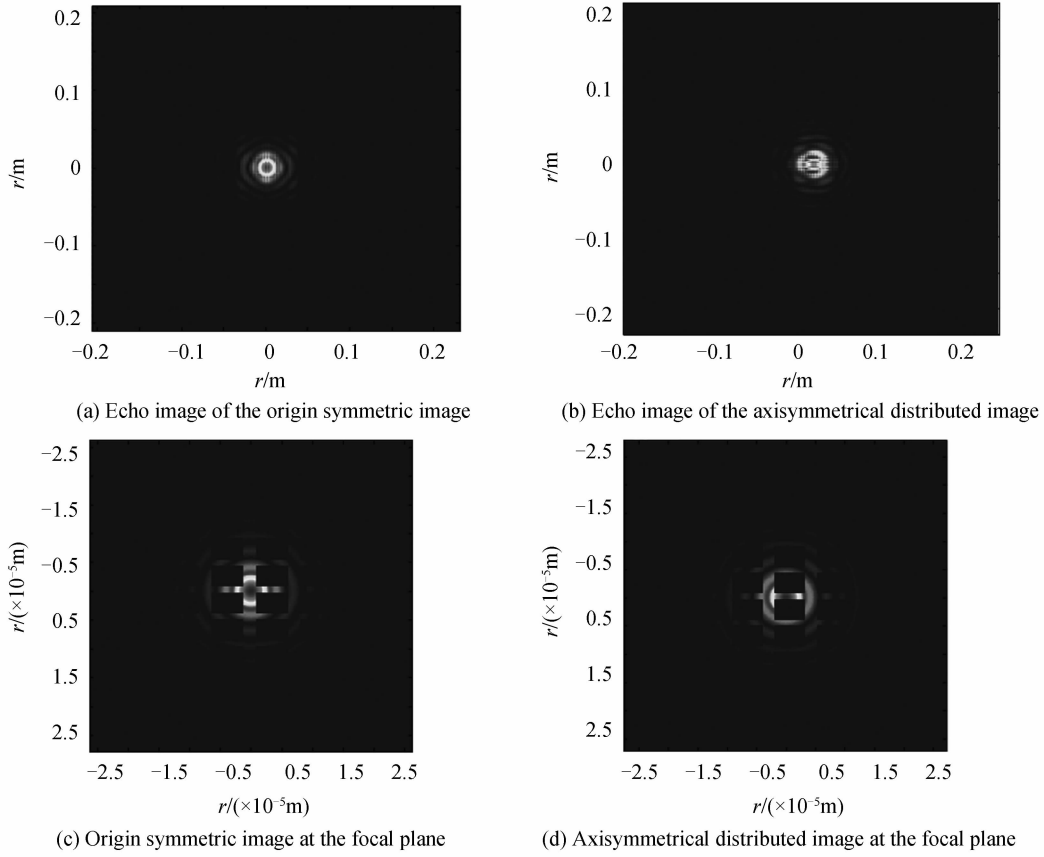


图 4 光栅结构的猫眼回波仿真计算 ($z=200\text{ m}$, F 数为 4)

Fig. 4 The cat's eye echo simulation of two dimensional grating ($z=200\text{ m}$, $F=4$)

计算结果表明,在大多数情况下,猫眼回波图像的光斑与焦平面上的光栅调制均有一定的相关性.只是随着猫眼镜头 F 数的增大,相关性逐渐降低.对此,分析回波图像的空间频谱,将式(5)作傅里叶变换,有

$$F\{u(x, y)\} = \frac{1}{M^2} \left[F\left\{u_p\left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right)\right\} \otimes F\left\{t\left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right)\right\} \otimes F\left\{\exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z}[(x)^2 + (y)^2]\right]\right\} \right] F\{h(x, y)\} \quad (6)$$

式(6)中,对图像空间频谱起主要限制作用的是最后的乘积项,即

$$F\{h(x, y)\} = C_1 p(\lambda zu, \lambda zv) \exp\left[-\frac{j\lambda z^2 \pi}{f}(u^2 + v^2)\right] = C_1 \text{circ}\left(\frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{D/(2\lambda z)}\right) \exp\left[-\frac{j\lambda z^2 \pi}{f}(u^2 + v^2)\right] \quad (7)$$

式中, C_1 为计算当中的常量项,回波图像的截止频率为

$$f_{\text{cut}} = D/(2\lambda z) \quad (8)$$

由式(8)中可知,在激光波长一定的条件下,截止频率与镜头孔径和探测距离有关.当其他条件不变,光学镜头孔径由大到小变化时,截止频率也在降低,即空间频谱宽度逐渐收窄,回波图像信息减少,结构也就逐渐模糊,与焦平面上光斑的相关性减小,最终形成与焦平面光栅调制无关的圆斑.同时,增加回波探测距离,截止频率也会下降,对于图 3 与图 4 的回波图像,在入

射激光距离不变时,20 m 远的计算结果就比 200 m 远的更能清晰反映焦平面光斑的分布.

2 实验研究

2.1 实验验证

验证实验所用仪器布局如图 5,532 nm 激光通过光学镜头到达焦平面,回波通过光学镜头原路返回,由分光棱镜分光,经反射镜后在靶面上接收,利用相机记录回波图像.

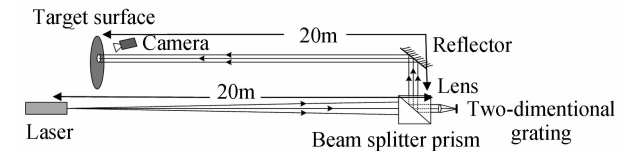


图 5 实验结构

Fig. 5 The experimental structure

焦平面上放置的器件是将 CCD 去除微透镜后留下的遮光铝膜、光敏层以及基底部分,如图 6.图 6 中的遮光铝膜网格对可见光具有高反射率,而光敏层对可见光吸收率较大,二者构成了网格光栅.光栅周期为 $7.2\ \mu\text{m}$ (水平) $\times 4.7\ \mu\text{m}$ (竖直),遮光铝膜宽度为 $2.4\ \mu\text{m}$ (水平) $\times 1.2\ \mu\text{m}$ (竖直).光学镜头焦距为 50 mm,光阑可调,在实验过程中发现光学镜头边沿具有一定像差,会对平行光入射的回波观察产生影响,为

便于观察回波图像,将光阑孔径减小,对应镜头 F 数为 4. 激光回波如图 7,回波主光斑成阵列结构,与图 2(b)的主体部分相似,图 2(b) 垂直方向的首尾副光斑在图 7 中成为乱斑,这与实验所用的光栅器件有关,说明遮光铝膜的细小结构与理想的二维光栅有一定差别.

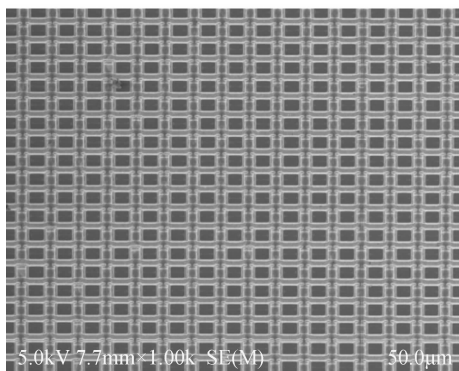


图 6 遮光铝膜电镜扫描图像

Fig. 6 The microscope image of two dimensional grating

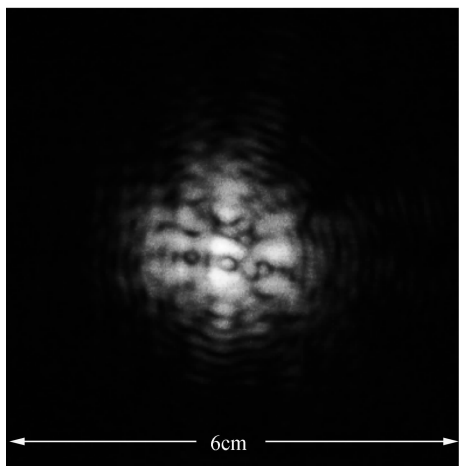


图 7 遮光铝膜的猫眼回波图像

Fig. 7 The cat's eye echo image of two dimensional grating

2.2 结果分析

理论计算与实验验证结果表明了焦平面上器件的

调制和光学镜头的孔径对回波图像的影响. 实验条件下,光学镜头的截止频率为 233 lp/mm,而遮光铝膜的周期性结构频率为(水平)139 lp/mm 和(垂直)212 lp/mm,因此,实验条件下在回波图像中有零级频谱以外的光斑.

图 8 是改变放置在镜头前的可变光阑孔径(数据如表 1)得到在 20 m 远接收靶面处的图像. 光阑孔径为 2 mm 时,回波图像由中心圆斑和外围圆环组成,这与图 2 中 F 数为 25 的回波图像计算结果相同. 随着光阑孔径的增加,回波图像主光斑逐渐分裂,演变成阵列光斑. 最终,将孔径光阑完全打开,出现如图 7 的回波图像.

表 1 是光阑孔径与相应的截止频率. 在 3.6 mm 时,截止频率是焦平面光栅水平方向频率的 0.5 倍,即零级频谱和一级频谱即将交叠. 5.6 mm 则是焦平面光栅垂直方向频率的 0.5 倍. 8 mm 时,截止频率略大于水平方向光栅频率,此时,零级频谱与二级频谱刚好交叠.

表 1 孔径光阑与相应的镜头截止频率
Table 1 The lens aperture and the corresponding cut-off frequency

Aperture/mm	2	3.6	5.6	8	12.5
Cut-off frequency/(lp · mm ⁻¹)	37	67	105	150	233

依次对图 8(a)~(d)以及图 7 做傅里叶变换,分析 20 m 远处回波图像的空间频谱随着光阑孔径的变化,如图 9. 随着光阑孔径的不断增大,高频部分在增多,总的有效频谱区域面积也在增大. 零频周围逐渐出现一级和二级频谱旁瓣,这与表 1 中光阑截止频率的变化是一致的. 此外,杂乱的频谱分量也在增多,一定程度上降低了频谱旁瓣的辨识度. 这是由于实验所用器件并不是理想的光栅,随着光阑孔径的增大,不规则的高频细节出现在了回波图像中.

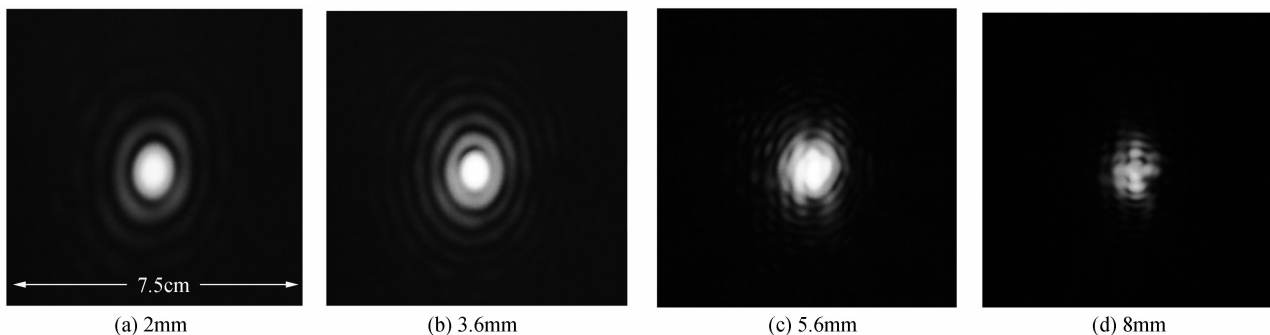


图 8 不同孔径时接收靶面处的回波图像

Fig. 8 The echo image at the distance of 20m plane under variable aperture

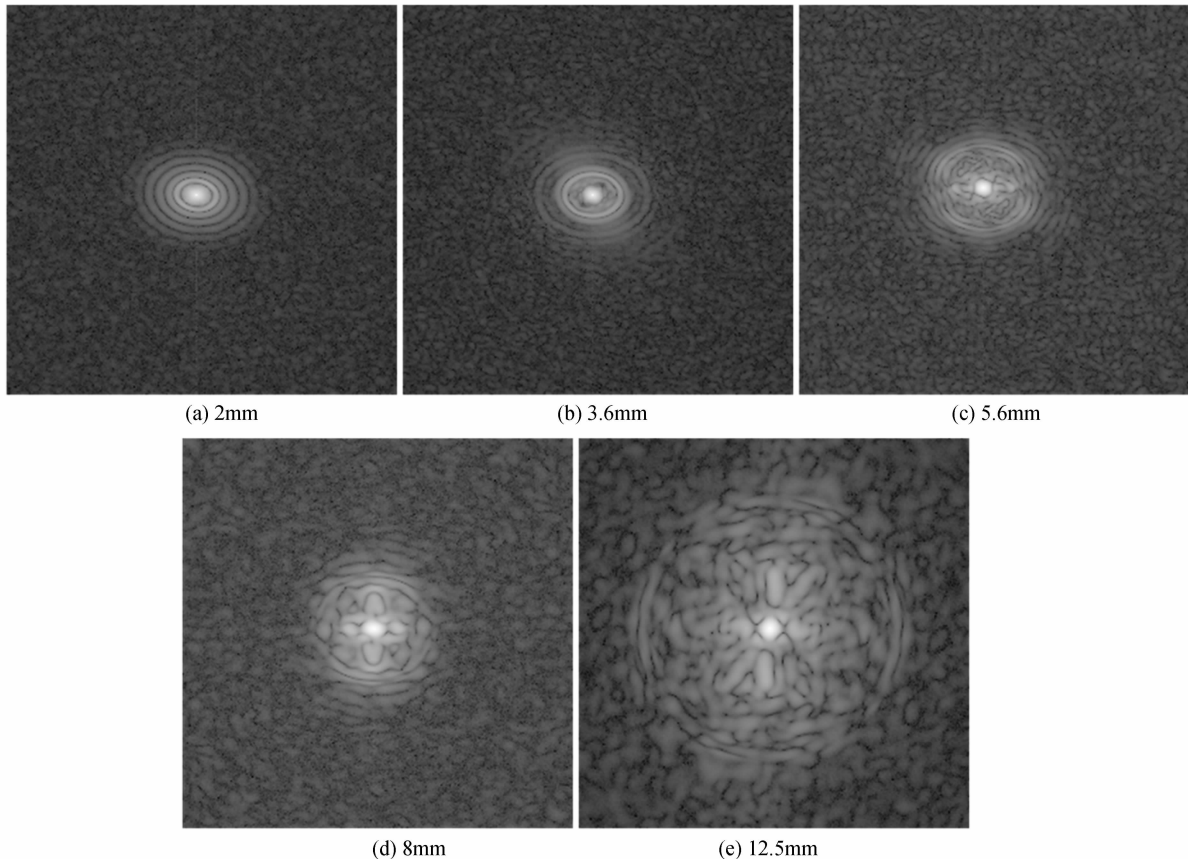


图9 不同光阑孔径回波图像的空间频谱

Fig. 9 The space frequency of echo image under the conditions of different aperture

3 总结

本文建立了凝视光电成像系统的猫眼回波理论模型,并以二维光栅简化焦平面器件,进行理论计算与实验验证.分析了焦平面器件对光的调制与回波图像光斑分布之间的相关性,在猫眼光学镜头前放置可变光阑,进一步研究了回波图像空间频谱与镜头孔径的关系.光学镜头孔径会对相关性产生影响.随着孔径的减小,回波图像的空间截止频率降低,使图像所含的信息减少,降低了回波图像与焦平面器件调制的相关性.此外,探测距离的增加也会降低回波图像的空间截止频率.随着光阑孔径的增大,光栅干涉形成的次级光斑逐渐出现在回波图像中,回波图像由于各级光斑的干涉变得复杂,但是主光斑分布呈阵列结构.从频谱图像可知,高频分量逐渐增加,出现一级和二级频谱旁瓣,与光阑孔径的截止频率变化是一致的.

参考文献

- [1] BEER R, MARJANIENI D. Wavefronts and construction tolerances for a cat's-eye retroreflector[J]. *Applied Optics*, 1966, **5**(7): 1191-1197.
- [2] WILD N R, LEAVY P M. Optical detection system [P]. United States Patent, 6603134B1, 2003.
- [3] CILAS-SLD-500, <http://www.cilas.com/>, 2013.
- [4] LINDGREN D, BANK D, CARLSSON L, *et al.* Configurations for early sniper detection[C]. SPIE, 2011, **8186**: 81860D-1.
- [5] REN Xi-ming, LI Li. Recognizing cat-eye targets with dual criterions of shape and modulation frequency [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(4): 041101-041104.
- [6] LI Li, WANG Xing-bin, ZHANG Wei-guo. A recognition method of "cat-eye" effect target based on texture character [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 0210001. 李丽, 王兴宾, 张卫国. 基于纹理特征的“猫眼”效应目标识别方法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(2): 0210001.
- [7] GE Cheng-liang, HUANG Zhi-wei, JI Yun-song, *et al.* Target classification with 'cat-eye effect' [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(7): 632-634. 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): 632-634.
- [8] ZHANG Bo, NIU Yan-xiong, ZHANG Chu, *et al.* Analysis of influence factors for reflected wave power of 'cat-eye' target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(3): 420-423. 张博, 牛燕雄, 张雏, 等. “猫眼”目标回波功率的影响因素分析[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(3): 420-423.
- [9] ZHAO Yan-zhong, SUN Hua-yan, SONG Feng-hua, *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.
- [10] MA Yuan, JI Xiao-Ling. Average intensity of tilted and off-axis Gaussian Schell-model beams propagating through a cat-eye optical lens in atmospheric turbulence [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(9): 094214. 马媛, 季小玲. 倾斜离轴高斯-谢尔模型光束在大气湍流中通过猫眼光学镜头反射光的光强特性[J]. *物理学报*, 2013, **62**

- (9):094214.
- [11] SONG Yong, HAO Qun, WANG Yong-tian, *et al.* The comparison and the current developments of COMS image sensor and CCD[J]. *Journal of Instrument*, 2001, **22**(3): 387-389.
宋勇,郝群,王涌天,等. CMOS图像传感器与 CCD的比较及发展现状[J]. *仪器仪表学报*, 2001, **22**(3):387-389.
- [12] DENG Guang-hua, ZHOU Xu-dong, ZHANG Kun, *et al.* 256 \times 256 high frame-rate visible light CCD[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2004, **25**(4):265-264.
邓光华,周旭东,张坤,等. 256 \times 256高帧频可见光 CCD的研制[J]. *光电器件*, 2004, **25**(4):265-264.
- [13] KE S, LIANGJIN H, XIANGAI C, *et al.* Analysis and simulation of the phenomenon of second spots of the TDI CCD camera irradiated by CW laser[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(24):23901-23907.
- [14] 宋丰华. 现代空间光电信息处理技术及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [15] SUN Ji-yong, HUANG Shang-lian, ZHANG Jie, *et al.* Optical analysis and experiments of two-dimensional grating light modulator array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6):1136-1140.
孙吉勇,黄尚廉,张洁,等. 二维光栅光调制器阵列的光学分析与实验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6):1136-1140.