

影响逆向调制反射光特性的因素分析

孙艳荣¹, 柯熙政², 李元虎²

- (1. 北华航天工业学院 材料工程学院, 河北 廊坊 100065;
2. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了研究逆向调制器结构参数及接收距离对系统反射光特性的影响, 通过建立“猫眼”目标离焦结构等效模型, 采用几何光学方法对该模型进行理论分析, 推导出表达反射光特性(发散半角、反射光斑半径、反射光功率密度)的相应计算公式并进行数值计算和实测实验。理论分析与实验结果表明: 逆向调制器结构参数及接收距离对调制系统反射光斑半径和功率密度的影响明显且呈规律变化, 减小透镜焦距、增大透镜口径、增大接收距离可以加快反射功率随离焦量变化速度, 有助于改善调制效果。且一般情况下, 正离焦的反射光发散半角小于负离焦的反射光发散半角。

关键词: 光通信; 逆向调制; 离焦量; 反射功率

中图分类号: TN929.12 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0122002

Analysis of influence factors of retro-reflect modulation reflected optical characteristics

Sun Yanrong¹, Ke Xizheng², Li Yuanhu²

- (1. Faculty of Material Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 100065, China;
2. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The influence of retro-reflect modulation reflected optical characteristics on the retro-reflect modulation structure parameters and receiving distance were studied by establishing off-focus structure equivalent model of retro-reflect modulation, and the theory of retro-reflect modulation model with geometrical optics method was analyzed. Some expressions related to the structure was given, numerical calculation and experiment were completed. Results show that the retro-reflect modulation structure parameters and receiving distance affect the variations of modulation system reflection power obviously and regularly. Moreover, reducing the lens focal length, increasing the lens aperture and increasing the receiving distance can increase the rate of change, and make contribution to improve the modulation effect. And under normal circumstances, the divergence of the reflected beams is much smaller when the mirror in the focal plane moves forward out of focus.

Key words: optical communications; retro-reflect modulation; off-focus value; reflection power

收稿日期: 2015-05-11; 修订日期: 2015-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(61377080, 60977054); 陕西省“13115”科技统筹计划(2011KTCQ01-31);

陕西省教育厅产业化培育基金(2010JC17); 西安市科技成果转化基金(CX12165);

陕西省自然科学基金基础研究计划(2013JQ8011); 陕西省教育厅科研计划(2013JK1104);

江苏省省级前瞻性研究专项资金(第三批)项目(BE2013088)

作者简介: 孙艳荣(1973-), 女, 教授, 主要从事材料科学方面的研究。Email: 809695720@qq.com

0 引言

自由空间光通信 (Free Space Optical Communication, FSO) 链路需要两端都装载激光发射/接收系统和复杂的自动对准系统(Acquisition Tracking and Pointing, ATP),使得系统的重量、体积、功耗和技术复杂度增加,成为制约 FSO 应用的重要因素^[1-2]。应用基于逆向调制器 (Modulating Retro-reflector, MRR) 的 FSO 技术可以免去对准复杂的应用限制。该技术在国外已成为研究热点问题,已从调制器、逆向反射器、通信系统等方面进行了深入研究^[3-4]。

光电设备对入射光有较强的按原光路返回的特性,相比漫反射目标而言,光电设备的回波功率要高出 $10^2 \sim 10^4$ 倍,此即光学目标的“猫眼”效应^[5-6]。在探测激光指标一定的情况下,“猫眼”目标回波功率^[7-8]主要是由目标结构参数决定的,尤其是目标结构的离焦量^[9]对回波功率具有决定性的影响。

近年来,国内研究人员也开始关注逆向调制技术:赵延伸、张博分析了离焦结构对“猫眼”效应回波的不利影响,并且正负离焦时有所差别^[10-11]。卞学丽引入了 β 因数来表达理想“猫眼”目标的回波功率,利用光线追迹法推导出其表达式^[12-13]。张创新利用 ABCD 光学矩阵描述高斯光束的传输与变换,研究了离焦量与接收面内回波平均功率密度的关系^[14-15]。

文中通过建立“猫眼”目标等效结构,利用几何光学方法分析了正负离焦“猫眼”目标等效结构中结构参数、接收距离等因素对逆向反射光特性(发散半角、反射光斑半径、反射光功率密度)的影响。

1 “猫眼”目标等效模型

为了通过几何光学方法对“猫眼”目标进行分析,建立了由透镜和反射面组成的离焦结构等效模型^[11-12],如图 1 所示。图 1 中 Lens 是具有聚焦响应的

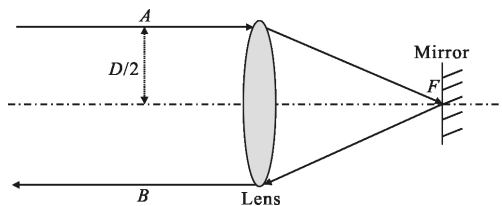


图 1 “猫眼”目标的等效结构

Fig.1 Equivalent structure of "cat eye" target

透镜,代替猫眼结构晶状体, D 为透镜口径;反射面具有反射作用,代替猫眼结构视网膜。平行正入射的光线 A 经过 Lens 作用,汇聚于 Lens 焦点 F 处,受到焦平面处反射面的作用。根据反射定律及镜面的反射特性,等效于反射光线经过通过 Lens 出射,光线 B 即为入射光线 A 经过“猫眼”目标后的出射光线。

2 理论分析

“猫眼”逆向调制器是通过改变焦平面处反射面的离焦量来调制反射光功率的^[9,14],离焦量通过改变逆向调制器的反射光发散角,影响着反射光功率的大小。因此,对离焦情况下“猫眼”目标的结构进行分析计算是非常有必要的^[13]。

2.1 正离焦情况下理论分析

正向离焦“猫眼”目标等效结构如图 2 所示。设结构中透镜半径为 $r_2 = D/2$, 焦距为 f , F 为透镜焦点位置。反射面离焦量为 d ($d > 0$), 离焦情况下的有效入射孔径为 r_1 , 回波发散半角为 θ 。为正离焦反射光路存在的一个聚焦点 G 到“猫眼”目标透镜的距离, L 为探测器实际接收位置到“猫眼”目标透镜的距离, R 为探测器位置平面反射光斑半径。

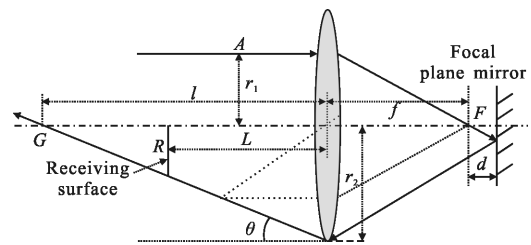


图 2 正向离焦“猫眼”目标等效结构

Fig.2 Forward out-of-focus equivalent structure of "cat eye" target

由图 2 中入射孔径和出射孔径所在的相似三角形,可得离焦情况下“猫眼”目标的有效入射孔径 r_1 和透镜半径 r_2 的关系为:

$$r_1 = \frac{fr_2}{(f+2d)} = \frac{fD}{2(f+2d)} \quad (r_2 = D/2, d > 0) \quad (1)$$

“猫眼”目标的反射光发散半角 θ 满足:

$$\tan\theta = \frac{r_2 - r_1}{f} = \frac{2dr_1}{f^2} \left(r_1 = \frac{fD}{2(f+2d)} \right) \quad (2)$$

当 $f < L$ 时,反射光斑半径 R 公式为:

$$R = |r_2 - \tan\theta \times L| \quad (3)$$

将公式(1)、(2)代入公式(3)得:

$$R = \left| \frac{D}{2} - \frac{DdL}{f(f+2d)} \right| \quad (d > 0) \quad (4)$$

同时,由图 2 可知反射光汇聚点 G 距“猫眼”目标透镜的距离 l 为:

$$l = \frac{f(f+2d)}{2d} \quad (5)$$

将公式(4)、(5)联立,在 G 点位置($L=l$)时,可得反射光光斑半径:

$$R=0 \quad (6)$$

光斑半径 $R=0$, 即 G 点位置处反射光斑面积为 0,若在 G 点位置做接收,则接收到光功率密度达到最大值。

2.2 负离焦情况下理论分析

在负离焦情况下,“猫眼”目标等效模型如图 3 所示,设离焦情况下的有效入射孔径为 r_1 等于透镜半径($r_1=D/2$),焦距为 f , F 为透镜焦点位置,反射面离焦量为 $d(d<0)$,反射光发散角半角为 θ 。 L 为探测器实际接收位置到“猫眼”目标透镜的距离, R 为探测器位置平面反射光斑半径。

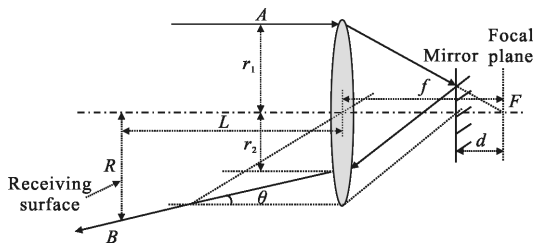


图 3 负向离焦“猫眼”目标等效结构

Fig.3 Backward out-of-focus equivalent structure of "cat eye" target

由图 3 中入射孔径和出射孔径所在的相似三角形,可以求出离焦情况下“猫眼”目标的有效入射孔径 r_1 和出射孔径 r_2 的关系:

$$r_2 = \left(\frac{f+2d}{f} \right) r_1 \quad (r_1 = D/2, d < 0) \quad (7)$$

“猫眼”目标的反射光发散半角 θ 满足:

$$\tan\theta = \frac{r_1 - r_2}{f} = -\frac{2dr_1}{f} \quad (r_1 = D/2) \quad (8)$$

当 $L > f$ 时,反射光斑半径 R 为:

$$R = r_2 + \tan\theta \times L \quad (9)$$

将公式(7)、(8)代入公式(9),得:

$$R = \frac{D}{2} + \frac{(f-L)Dd}{f^2} \quad (d < 0) \quad (10)$$

对比正向离焦理论分析可以发现:负向离焦和

正向离焦的光学特性非常相似,但又有所不同。在“猫眼”目标结构参数一致的条件下,将公式(1)和(7)式对比可以发现:正向离焦的有效入射孔径小于负向离焦的有效入射孔径。将公式(2)与公式(8)对比可知:正向离焦的反射光发散角 θ 小于负向离焦的反射光发散角 θ 。公式(4)和公式(10)对比可以看出:正向离焦的反射光光斑半径 R 要大于负向离焦反射光光斑半径 R ,且正向离焦反射光光斑半径先减小后增大,而负向离焦反射光光斑半径则持续增大。

3 数值计算分析

设数值计算初始条件为:“猫眼”目标结构透镜口径 $D=50$ mm,离焦量最大值 $d_{\max}=0.1$ mm,激光器功率 $P=1$ W。

图 4 为根据正负离焦有效入射孔径公式(1)和(7)得到在不同焦距 f 情况下,有效入射孔径 r_1 随离焦量 d 的变化规律曲线。从图 4 可以看出:在透镜口径 D 相同的条件下,负向离焦的有效入射孔径 r_1 大于正向离焦的有效入射孔径 r_1 ,随着离焦量 d 增大,正向离焦有效入射孔径 r_1 减小。且在透镜口径 D 相同条件下,有效入射孔径 r_1 随透镜焦距 f 变化的影响比较明显,透镜焦距 f 越小,有效入射孔径 r_1 随离焦量 d 变化影响越大。

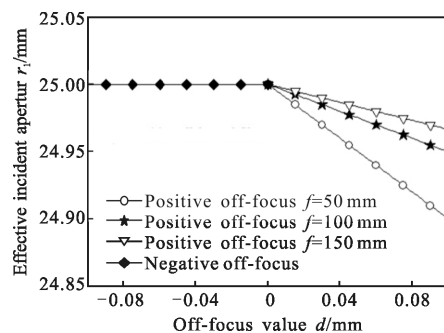
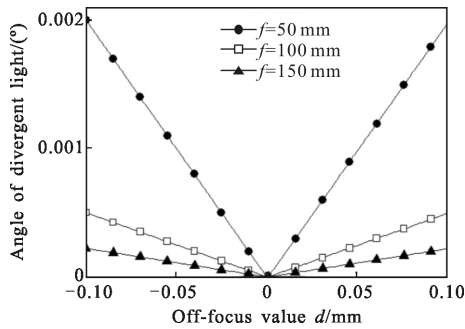


图 4 不同焦距 f 下有效入射孔径随离焦量变化曲线

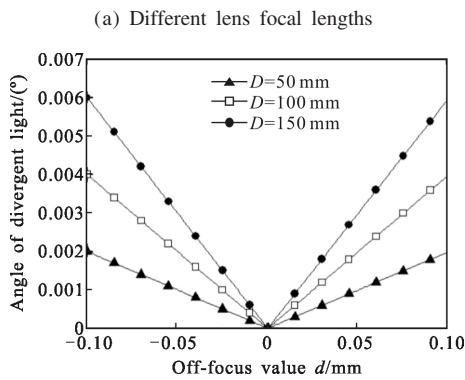
Fig.4 Effective incident aperture varies with off-focus value with different f

在计算“猫眼”目标的反射光发散半角 θ 时,可以将公式(2)、公式(8)里的有效入射孔径 r_1 分别用公式(1)、(7)进行替换,得到当透镜口径 D 和焦距 f 取不同值时,反射光发散半角 θ 随离焦量 d 变化曲线如图 5 所示。其中,随着焦距 f 增大反射光光斑发散角减小,随着透镜口径 D 增大反射光板发散角增

大。又因为反射光发散半角的大小直接影响接收光斑半径的大小,反射光发散角越大,接收距离越远,接收光斑半径越大,功率密度变化范围越大。因此选择大口径且小焦距的透镜作为“猫眼”目标透镜更益于改善逆向调制效果。



(a) 不同焦距



(b) 不同口径

(b) Different lens apertures

图 5 不同焦距 f 和口径 D 下反射光发散半角随离焦量变化曲线

Fig.5 Diverging angle varies with off-focus value with different focal lengths and apertures

在离焦量 $d=100\mu\text{m}$ 时,不同透镜焦距 f 和不同透镜口径 D 情况下的反射光发散半角 θ 数值如表 1 所示。

表 1 不同透镜焦距 f 和口径 D 下离焦量 $d=100\mu\text{m}$ 对应的最大反射光发散半角 θ

Tab.1 Max diverging angle θ with $d=100\mu\text{m}$ in different f and D

Fixed value /mm	Variation/mm	Diverging angle θ in positive off-focus/($^\circ$)	Diverging angle θ in negative off-focus/($^\circ$)
D=50	$f=50$	0.002	0.002
	$f=100$	0.000 49	0.000 5
	$f=150$	0.000 21	0.000 22
$f=50$	$D=50$	0.002	0.002
	$D=100$	0.004	0.004
	$D=150$	0.006	0.006

从表 1 可以得出:在透镜 D 为固定值时正向离焦的反射光发散半角小于负向离焦的反射光发散半角,在透镜焦距 f 为固定值时正负离焦反射光发散半角相同。在透镜焦距和口径相同的情况下,相同离焦量的正负离焦对反射光发散角 θ 影响差异不大。

根据公式(4)和(10)通过数值计算可以得到:焦距 $f=50\text{ mm}$ 、口径 $D=50\text{ mm}$ 时,不同接收距离 L 下反射光斑半径 R 随离焦量 d 变化关系如下图 6 所示。从图 6 可以得出:在正离焦情况下,反射光斑半径随着离焦量的增大先减小再增大,在不同接收距离情况下,接收光斑半径变化范围和斜率不同,随着接收距离增大光斑半径变化范围增大,曲线斜率增大,即接收距离越远,离焦量对反射光斑半径影响越大。

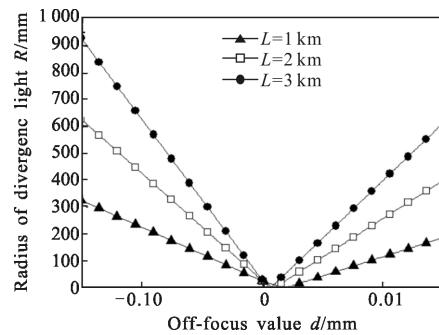
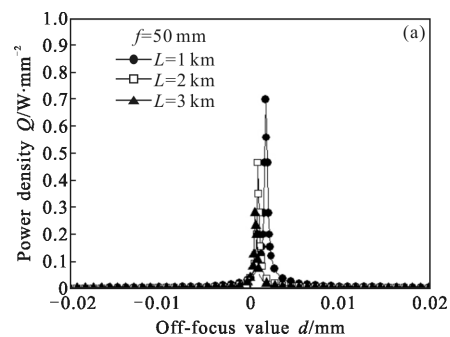


图 6 不同接收距离 L 下反射光斑半径随离焦量变化曲线

Fig.6 Radius of divergence light varies with off-focus value with different L

在不考虑透镜透过率、反射镜反射率和大气衰减率等非结构因素的前提下,回波功率密度 $Q=P/S=1/\pi R^2$,可以得出:不同接收距离 L 和不同焦距 f 下回波功率密度 Q 随离焦量 d 变化趋势如图 7 所示,图 7 中正向离焦反射光功率先增大后减小,在正向离焦量 d 增大的过程中,存在一个光斑聚焦位置,在光斑聚焦位置反射光功率密度最大。调整透镜口径和焦距,在反射功率密度最大光斑聚焦位置附近接



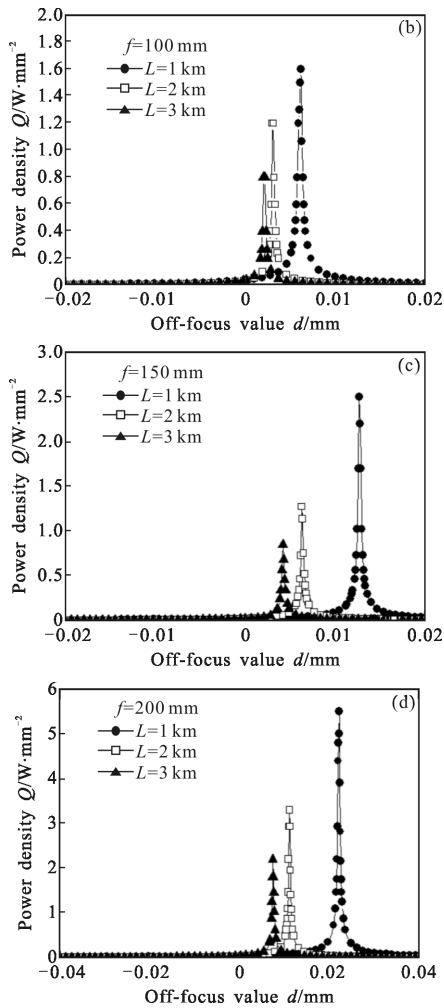


图 7 不同焦距 f 和接收距离 L 下反射光功率密度随离焦量变化曲线

Fig.7 Power density varies with off-focus value with different f and L

收效果更佳。随着接收距离 L 的增大和焦距 f 的减小,光斑聚焦点位置左移且离焦量-功率密度曲线主峰变窄,功率密度受离焦量改变速度加快。即同样离焦量变化范围下,功率密度变化范围增大,有助于改善调制效果。

4 实验

为了进一步研究“猫眼”结构参数对逆向反射功率造成的影响,对不同接收距离 L 和离焦量 d 情况下反射光斑半径 R 和反射光功率密度 Q 进行测量。实验原理如图 8 所示,激光通过透镜进行准直,准直后光斑通过半反镜到达“猫眼”目标,反射光通过半反镜到达接收平面或探测器,其中接收距离 $L=L_1+L_2$ 。图 8(a)为反射光斑半径测量示意图,主要通过测

量接收面上的光斑半径进行测量;图 8(b)为反射光功率密度测量示意图,主要通过 PC 控制采集卡接收探测器输出数据记录功率密度曲线。

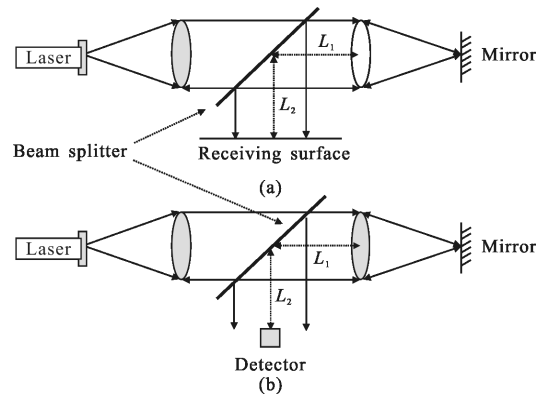


图 8 光斑半径和功率密度测量实验示意图

Fig.8 Measuring experiment of spot radius and power density

实验实物图 9 中,激光器采用功率 $P=100\text{ mW}$ 、波长 650 nm 的红光激光器,采用口径 $D=50\text{ mm}$,焦距 $f=50\text{ mm}$ 的正透镜和平面反射镜模拟“猫眼”结构,离焦量通过反射镜底座上的平移台调节。探测器采用 THORLABS 的固定增益硅探测器,型号为 PDA10A-EC,光谱范围 $200\sim 1100\text{ nm}$ 。采集卡采用北京阿尔泰 PCI 系列采集卡,型号 PCI8001。

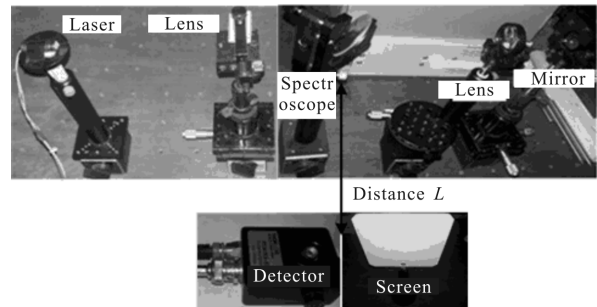
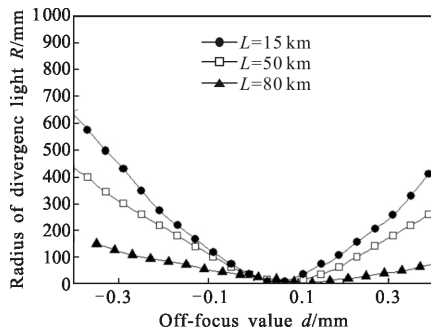


图 9 光斑半径和功率密度测量实验实物图

Fig.9 Measuring experiment object pictures of spot radius and power density

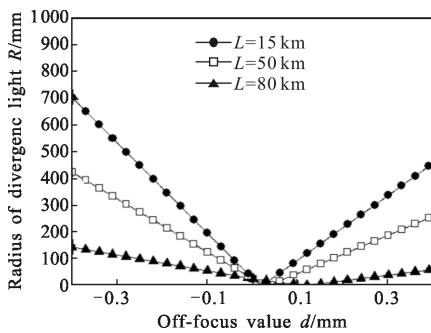
图 10(a)为离焦量 $d_{\max}=0.4\text{ mm}$ 时,不同接收距离 L 情况下实验测得光斑半径 R 随离焦量 d 变化数据的拟合曲线。在与实验条件相同的情况下,通过对公式(4)和公式(10)进行数值计算,得到不同 L 时的光斑半径随离焦量的变化关系为图 10(b)。对比实测曲线(a)和仿真曲线(b)可以发现反射光斑半径实测曲线变化趋势与数值计算曲线变化趋势一致,即随着接收距离的增大,光斑半径变化范围增大,曲线曲

率增大。



(a) 实测曲线

(a) Measured curve



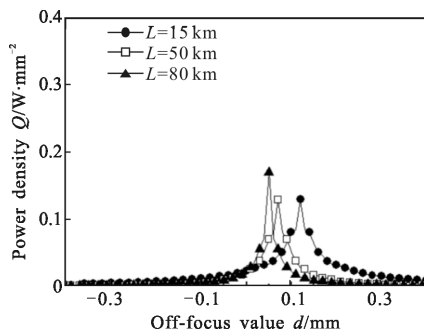
(b) 仿真曲线

(b) Simulation curve

图 10 不同接收距离 L 下随离焦量变化的反射光斑半径曲线

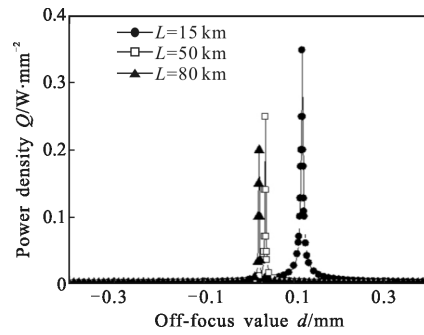
Fig.10 Radius of divergence light varies with off-focus value with different L

图 11(a)为离焦量 $d_{max}=0.4\text{ mm}$ 条件下,接收距离 L 取不同值时实测反射功率密度随离焦量 d 变化的数据拟合曲线。图 11(b)为与同样实验条件下利用公式(4)和(10)结合回波功率密度公式 $Q=P/S=0.1/\pi R^2$ 进行数值计算得到的不接收距离 L 时的光功率密度图。通过实验数据图 11(a)与仿真曲线 11(b)对比发现:反射光功率密度实测曲线与数值计算曲线



(a) 实测曲线

(a) Measured curve



(b) 仿真曲线

(b) Simulation curve

图 11 不同接收距离 L 下随离焦量变化的反射光功率密度曲线

Fig.11 Power density with varying off-focus value with different L

变化趋势一致,随着接收距离增大,峰值左移且变窄,符合理论分析的变化规律。实测数据在幅度上较低是因为激光功率受到信道衰减、透镜透过率和反射膜反射率等非结构因素的影响而衰减。

5 结论

文中通过建立“猫眼”目标等效模型,利用几何光学法推导出正负离焦情况下有效入射孔径、反射光发散半角以及反射光接收光斑半径等公式,利用公式进行数值计算得到“猫眼”结构参数和反射光功率密度等变量关系图,并在不同接收距离下试验测量了随离焦量变化的反射光斑半径和反射光功率密度,得出其拟合曲线,结果表明:

(1) 在透镜口径相同条件下,负离焦有效入射孔径不变,正离焦有效入射孔径随着离焦量增大而减小,且透镜焦距越小离焦量对有效入射孔径的影响越大;

(2) 正离焦的反射光发散半角小于负离焦的反射光发散半角,反射光发散半角随着透镜焦距的减小而增大,随着透镜口径的增大而增大,小焦距、大口径的“猫眼”结构更益于逆向调制;

(3) 在正离焦情况下,反射光斑半径随着离焦量的增大先减小再增大,在不同接收距离情况下,接收光斑半径变化范围和曲率不同,随着接收距离增大,光斑半径变化范围增大,曲线曲率增大,即接收距离越远,离焦量对反射光斑半径影响越大;

(4) 接收面处回波光斑半径的最小值和回波功率密度的最大值重合且出现在离焦量零点的右侧,随着接收距离 L 的增大和焦距 f 的减小,光斑聚焦

点位置左移且离焦量-功率密度曲线主峰变窄, 功率密度受离焦量改变速度加快。即同样离焦量变化范围内, 功率密度变化范围增大, 有助于改善调制效果。

参考文献:

- [1] Gilbreath G C, Rabinovich W, Mahon R, et al. Modulating retro-reflector architecture using multiple quantum wells for free space optical communications [C]//SPIE, 1998, 3491: 581-586.
- [2] Li Fei, Hou Zaihong, Wu Yi. Error performance for free space optical communication systems in real turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0906003-1-0906003-2. (in Chinese)
李菲, 侯再红, 吴毅. 实际大气中无线光通信的系统差错性能[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0906003-1-0906003-2.
- [3] William S Rabinovich, Rita Mahon, James L Murphy, et al. Modulating retro-reflector lasercom systems for small unmanned vehicles [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(5): 986-992.
- [4] Zhang Junling. Based on magnetostrictive materials, a preliminary study on the optical reverse modulator [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2008: 9-15. (in Chinese)
张俊玲. 基于超磁致伸缩材料的光学逆向调制器初步研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008: 9-15.
- [5] Stephane Junique, Daniel Agren, Qin Wang, et al. A modulating retro-reflector for free-space optical communication [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(1): 85-87.
- [6] Jiang Hailin, Zou Jiwei, Nie Jinsong. Conception of detecting system for locating stealth aircraft based on cat eye effect[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 846-848. (in Chinese)
姜海林, 邹继伟, 聂劲松. 基于“猫眼”效应探测隐身飞机的系统构想[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 846-848.
- [7] Wu Dongsheng, Bai Tingzhu, Liu Bingqi. Dynamic imaging detection and target recognition for cat-eye effect echo[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0811003-1-0811003-6. (in Chinese)
武东生, 白廷柱, 刘秉琦. “猫眼”效应回波的动态成像探测与目标识别 [J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0811003-1-0811003-6.
- [8] Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Zhang Laixian. Backwards propagation characteristics of distorted reflected beams with cat-eye effect [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7): 0702015-1-0702015-8. (in Chinese)
赵延仲, 孙华燕, 张来线. 畸变猫眼效应反射光束的回程传输特性[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0702015-1-0702015-8.
- [9] Xu Zhitao, Liu Jinguo, Long Kehui. Accuracy analysis of focusing mechanism of high resolution space camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0728001-1-0728001-8. (in Chinese)
许志涛, 刘金国, 龙科慧, 等. 高分辨率空间相机调焦机构精度分析[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0728001-1-0728001-8.
- [10] Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua, et al. Effect of focal shift on reflecting character of "cat eye" effect [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 71-74. (in Chinese)
赵延仲, 孙华燕, 宋丰华, 等. 离焦量对“猫眼”效应射特性的影响[J]. 激光技术, 2008, 32(1): 71-74.
- [11] Bian Xueli. Influence of the reflected wave power in deviate focus "cat-eye" system[J]. *China Measurement Technology*, 2007, 33(2): 84-86. (in Chinese)
卞学丽. “猫眼”系统中离焦量的变化对回波功率的影响[J]. 中国测试技术, 2007, 33(2): 84-86.
- [12] He Ting, Niu Yanxiong, Zhang Peng, et al. Original analysis and influence of the focal shift on the retro-reflected power of cat's eye effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 2956-2960. (in Chinese)
和婷, 牛燕雄, 张鹏, 等. 光电系统离焦量对其“猫眼”效应回波功率的影响规律及原因分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 2956-2960.
- [13] Li Shuanggang, Cheng Yubao. Theoretical analysis on echo power of active laser reconnaissance based on "cat-eye" effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S1): 80-83. (in Chinese)
李双双, 程玉宝. 基于“猫眼”效应的激光回波功率理论分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S1): 80-83.
- [14] Zhang Chuangxin, Sun Xiaoquan. Influences of focal shift and detection beam parameters on cat-eye echo[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(1): 31-35. (in Chinese)
张创新, 孙晓泉. “猫眼”离焦量与探测光束参数对猫眼回波的影响[J]. 光电技术应用, 2011, 26(1): 31-35.
- [15] Bian Xueli. Optical lens "cat's eye" effect analysis and application in short distance information exchange [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2005: 8-10. (in Chinese)
卞学丽. 光学镜头“猫眼”效应分析及在短距离信息交换中的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2005: 8-10.