

线性阵列逆向调制器反射光强测试实验研究

张来线¹, 任建迎^{1,2}, 孙华燕¹, 刘瑞丰^{1,2}, 赵延仲¹

(1. 中国人民解放军战略支援部队航天工程大学电子与光学工程系, 北京 101416;

2. 中国人民解放军战略支援部队航天工程大学研究生院, 北京 101416)

摘要: 为了分析逆向调制器的反射光场和反射光强的变化规律, 利用 532 nm 激光照射逆向调制器阵列, 测试得到了离焦量、入射角变化时的逆向调制器的反射光场和反射光强, 得到了阵列调制器反射光强与单个逆向调制器反射光强关系。测试结果表明, 一定范围的正离焦使反射光束发散角变小, 反射光能量聚焦度好, 负离焦相反。入射角使反射光场发生畸变, 反射光强与入射角成反比。离焦量为 0 或负离焦时, 阵列调制器的反射光强是单个调制器反射光强的线性叠加。

关键词: 逆向调制; 线性阵列; 光场分布; 光强分布; 离焦量; 入射角

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.06.009

Experimental research on measurement of reflected light intensity of array retro-reflected modulator

ZHANG Lai-xian¹, REN Jian-ying^{1,2}, SUN Hua-yan¹, LIU Rui-feng^{1,2}, ZHAO Yan-zhong¹

(1. Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University,

PLA Strategic Support Force, Beijing 101416, China; 2. Graduate School, Space

Engineering University, PLA Strategic Support Force, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to analyze the variation of the reflected light field and the reflected light intensity of the retro-reflected modulator, the array retro-reflected modulator is illuminated by a 532 nm laser. The reflected light field and reflected light intensity value are obtained when the amount of defocus and the incident angle are changed. The reflected light intensity relationship between the array modulator and a single modulator is obtained. The test results show that the positive defocus in a certain range makes the divergence angle of the reflected beam smaller, the energy of the reflected light is better, and the negative defocus is opposite. The incident angle is the distortion of the reflected light field, and the reflected light intensity is inversely proportional to the incident angle. When no-defocusing or negative defocusing, the reflected light intensity of the array modulator is a linear superposition of the reflected light intensity of single modulator.

Keywords: retro-reflected modulation; linear array; optical field distribution; optical intensity distribution; defocus amount; angle of incidence

作者简介: 张来线(1986-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为光电信息获取与处理。E-mail: zhanglaixian@126.com

通讯作者: 任建迎(1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为空间光学测量。E-mail: rjyfly@126.com

收稿日期: 2020-08-09; **修订日期:** 2020-08-28

1 引言

猫眼逆向调制激光通信技术具有体积小、重量轻、功耗小等优点,可应用小载荷空间平台上进行组网、通信识别,国内外已开展了相关理论和实验研究^[1-3]。受双程传输和反射率的影响逆向调制技术的作用距离受到限制,虽然文献[4]~[6]对猫眼效应的反射率进行了研究分析,但对反射光强缺乏定量分析。文献[7]~[10]利用几何光学法和 Collins 公式法分解逆向调制光束的传输过程,从理论上分析了光学逆向调制器反射光强与入射角、离焦量关系。文献[13]、[14]提出了阵列光束抑制大气湍流增加探测光强的方法。

本文对单个逆向调制器和三个逆向调制器分别进行了激光照射实验,得到了逆向调制器的反射光斑,并测量得到了单个和阵列调制器的反射光强值及其规律。测量得到的规律对光学逆向调制器具有普适性,对逆向调制技术的应用具有实际意义。

2 逆向调制技术原理及实验测试方案

根据猫眼效应原理,入射到猫眼镜头的反射光束与入射光束完全重合。逆向调制技术是在猫眼光学镜头的焦平面处放置了光学逆向调制器,把需要传输的信息加载在入射光束上并使其原路返回,在激光发射端接收反射光解调出所需要的信息。逆向调制反射光强除受距离、光学口径影响外,还受调制器位置、光束入射角的影响。反射光与入射角、离焦量的关系文献^[4-5,7-8]已进行了理论分析。本文从实验上对阵列逆向调制反射光场和光强进行分析,分析阵列反射光强与单个调制器光强关系。

由于逆向调制器的角度对反射光有较大影响,为提高实验过程中的精度,实验前要调节阵列逆向调制器,确保其光轴相互平行。由于逆向调制器的猫眼效应,原路返回的反射光束与入射光束是完全重合的,因此在实验测量反射光束时必须解决入射光束与反射光束相互干扰的问题。鉴于以上问题,本文采用如图 1 所示的实验方案。激光器经过准直扩束后照射到逆向调制镜头,其反射光在近场采用靶板 1 接收,接收靶板 1 距离光轴 1 m。反射光到达发射端经分束镜进入接收靶板 2,接收靶板 2 距离光轴 1 m。当反射光的发散角较大时,反射光斑

远大于分束镜时使用靶板 3 接收反射光斑,接收靶板 3 距离激光器 5 m。测量光强时探测器接收分束镜 2 分出一束反射光,分束镜中心距离到探测器距离与到准直扩束镜距离相等。为了更加精确的调节入射角和离焦量,把阵列逆向调制器固定在方位角可微调的转台上,镜头焦点位置的调制器固定在了精密位移平台上,用来调节离焦量,如图 2 逆向调制阵列场景图。

实验中的场景图如图 2 所示,实验仪器的主要参数:532 nm 半导体激光器,功率为 25 mW,光束发散角为 4.3 mrad,分束镜口径为 300 mm,分束比为 1:1,逆向调制镜头口径为 50 mm,视场角为 30°,焦距为 24 mm,逆向镜头阵列中心间距 7 cm。主动端距离逆向调制阵列 60 m,接收镜头 75 mm。

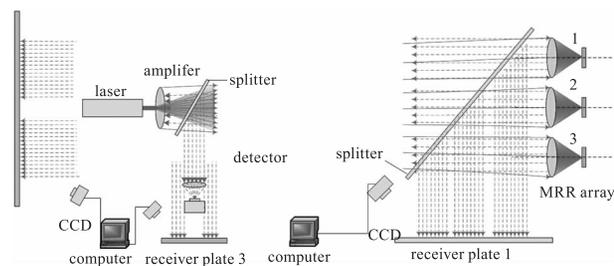


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental device schematic

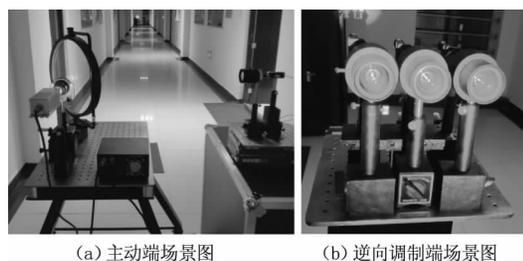


图 2 逆向调制实验场景

Fig. 2 Retro-reflected modulation experiment scene

3 实验结果分析

3.1 阵列逆向调制反射光斑

根据几何光学原理,当带有发散角的人射光束经过镜头会聚在焦点处,调制器表面会使会聚光束发生反射,反射光束在发射点处会聚。实验中激光器发射的点光源经准直扩束后的光束发散角为 10 mrad。为了能够较清楚的比较反射光斑尺寸,实验中使用了带有刻度标志的接收板,每格代表 1 cm,接收板的位置保持不变,通过精密位移平台调节猫眼镜头焦点处的调制器前后位置,即离焦量的变化。

接收靶板 1 接收到的阵列逆向调制器正离焦时的反射光场如图 3(a)、(c)、(e)、(g) 所示,近场位置反射光斑间隔与镜头间隔保持一致,反射光斑尺寸随着正离焦量的增大先缩小为一个点然后增大,且呈现为发散光斑,如图 3(g) 所示,发射端接收靶板 2 或 3 接收到的反射光斑如图 3(b)、(d)、(f)、(h) 所示,图 3(b) 和 (d) 中心阴影是由准直扩束镜和激光器的遮挡造成的,由结果可以看出阵列反射光斑在发射端重合。为了完整的展现离焦量对反射光场分布影响,其中图 3(g) 和 (h) 中的三个逆向调制器的离焦量并不一致,左侧光斑离焦量 $\delta = 30 \mu\text{m}$,中心光斑 $\delta = 40 \mu\text{m}$,右侧光斑 $\delta = 50 \mu\text{m}$,由实验结果可以看出随着离焦量继续增大反射光斑呈现发散状。负离焦时反射光斑尺寸快速变大,光斑边缘轮廓较明显,如图 4 所示。

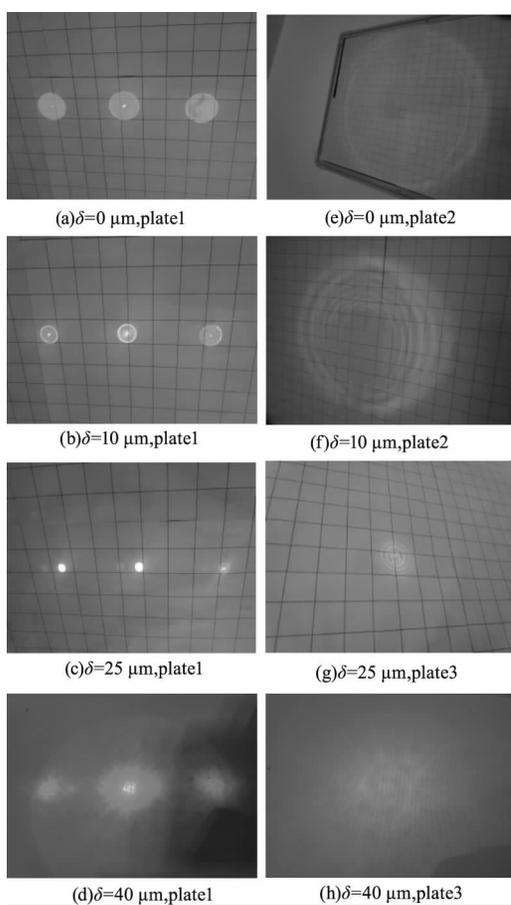


图 3 正离焦时的反射光场分布

Fig. 3 Reflected optical field division on receiver plate

图 5 是离焦量 $\delta = 15 \mu\text{m}$ 和入射角 $\theta = 10^\circ$ 时的反射光场分布,图 5(a) 是接收靶板 1 接收到的光斑,图 5(b) 是接收靶板 3 接收到的阵列反射光束的

叠加光斑,图 5(b) 中光斑不完整是由半透半反镜接收反射光斑不完整造成的,由实验结果看出入射角的存在改变反射光斑的形状。

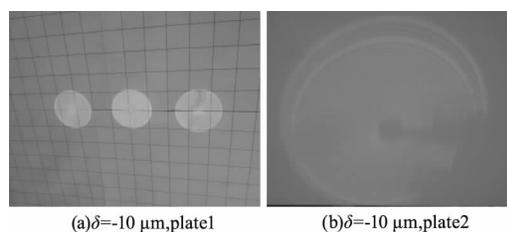


图 4 负离焦时反射光场分布

Fig. 4 Reflected light field distribution at negative defocus

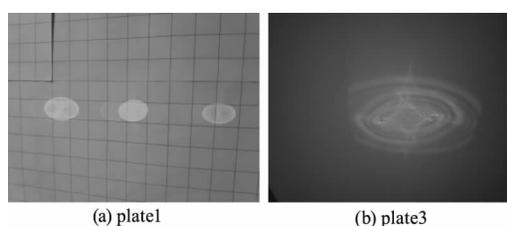


图 5 $\delta = 15 \mu\text{m}$ 和 $\theta = 10^\circ$ 时的反射光场分布

Fig. 5 The reflected light field distribution at $\delta = 15 \mu\text{m}$ and $\theta = 10^\circ$

3.2 逆向调制反射光强规律

离焦量和入射角的变化对反射光场的影响最终体现在反射光强的变化上,因此分析离焦量和入射角对反射光强变化规律十分必要。在前面光场测试的实验基础之上,在接收靶板 3 位置处放置接收镜头和探测器,测量过程中调节精密位移平台和方位平台角度改变离焦量和入射角,通过镜头盖遮挡方法分别测量每个逆向调制器的反射光强和三个调制器的反射光合成光强值。

图 6 为测量得到的阵列镜头和阵列中单个镜头的反射光强随离焦量变化曲线,从图 6 中可以看出阵列和单个调制器的反射光强随着离焦量增加而变大,在离焦量为 $25 \mu\text{m}$ 时光强达到最大,然后快速下降,阵列反射光强表现为线性增加和线性下降。单个镜头的光强随离焦量变化曲线类似高斯曲线。当离焦量小于 $10 \mu\text{m}$ 时,阵列反射光强是三个单个镜头反射光强的线性叠加,当离焦量大于 $10 \mu\text{m}$ 时阵列光强与单个镜头光强差别不大。图 7(a)、(b) 分别是离焦量 $\delta = 0, -10, 10, 20 \mu\text{m}$ 时光强随入射角变化曲线,由图 10(a) 和 (b) 得随着入射角的增大光强变小,当入射角达到 15° 时阵列光强与单个光束光强曲线基本重合,入射角小于 15° 时阵列光强是单个反射光强的线性叠加。

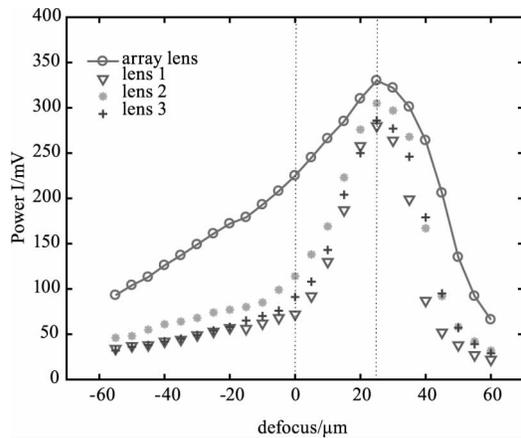


图6 光强信号随离焦量变化曲线

Fig. 6 Curve of light intensity signal with defocus amount

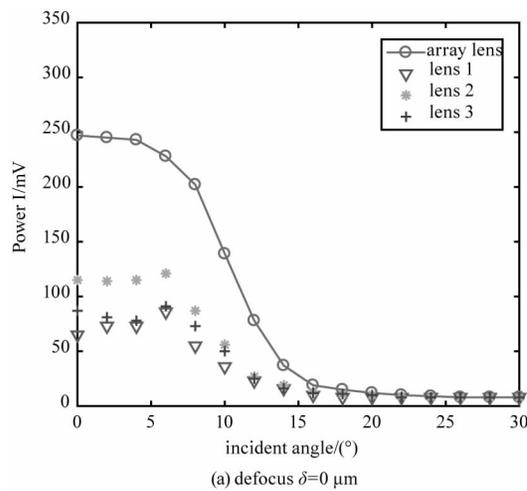
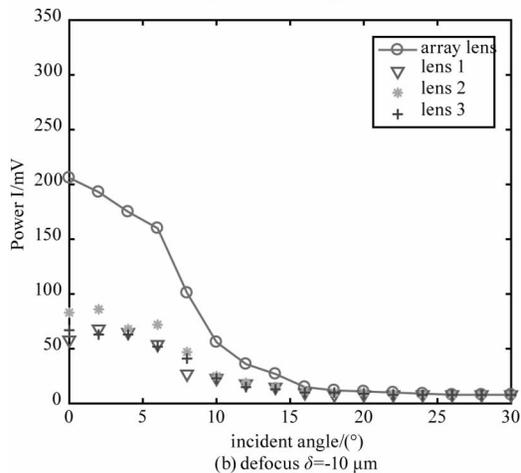
(a) defocus $\delta=0 \mu\text{m}$ (b) defocus $\delta=-10 \mu\text{m}$

图7 不同离焦量下光强随入射角变化曲线

Fig. 7 Variation curve of light intensity with incident angle under different defocus amount

4 结论

本文采用线形逆向调制阵列在室内进行了60 m反射光场和反射光强测量实验,验证了阵列逆向调制系统的原路返回特性,得到了反射光场分布和反射光强随离焦量、入射角变化规律,得到

了阵列反射光强与单个反射光强值的变化规律,实验数据及光强变化规律为逆向调制技术的性能分析、可行性应用提供了重要的依据。可从实验数据看出,阵列反射光束在发射点位置相互重合。正离焦时反射光束发散角随着离焦量增大先变小后变大,当发散角变小时反射光能量聚焦度好,阵列反射光强值不是单个反射光强值的叠加。负离焦时反射光束的发散角变大,反射光的单位能量密度减小,阵列反射光强值接近三个单个反射光强值的叠加。随着入射角的增大反射光强值逐渐变小,阵列光强值在有效入射角范围内是单个反射光强值的叠加。本文测试结果及其规律对阵列逆向调制系统具有普适性,对逆向调制技术的应用研究具有重要实际意义。

参考文献:

- [1] Rita Mahon, Mike S. Ferraro, Peter G. Goetz, et al. Irradiance correlations in retro-reflected beams [J]. Applied Optics, 2015, 54(31): F96 - F102.
- [2] S Dell Agnellol, G Delle Monache, R Vittori, et al. Advanced laser retroreflectors for astrophysics and space science [J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2015, 3: 218 - 227.
- [3] Ren Jianying, Sun Huayan, Zhang Laixian. Free space optical communication technology based on cat-eye modulating retro-reflector [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(1): 98 - 102. (in Chinese)
任建迎, 孙华燕, 张来线. “猫眼”逆向调制自由空间通信技术 [J]. 激光与红外, 2017, 47(1): 98 - 102.
- [4] Sun Yanrong, Ke Xizheng, Li Yuanhu. Analysis of influence factors of retro-reflect modulation reflected optical characteristics [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(1): 0122002. (in Chinese)
孙艳荣, 柯熙政, 李元虎. 影响逆向调制反射光特性的因素分析 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0122002.
- [5] 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)
赵延伸, 孙华燕, 宋丰华等. 离焦量对“猫眼效应”反射特性的影响 [J]. 激光技术, 2008, 32(1): 71 - 74.
- [6] Zhao Hongwei, Wang Jiang, Song Min, et al. Laser experimental study of "cat eye" effect [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 62 - 65. (in Chinese)
赵洪卫, 王江, 宋敏, 等. 激光照射“猫眼”效应实验研

- 究[J]. 激光技术, 2005, 29(1): 62 - 65.
- [7] Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Song Fenghua, et al. Research on the mechanism of reflection characteristics of laser irradiation on cat eye optical lens[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(4): 2284 - 2294. (in Chinese)
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.
- [8] Ma Yuan, Ji Xiaoling. Average intensity of tilted and off-axis Gaussian Schell-model beams propagating through a cat-eye optical lens in atmospheric turbulence[J]. Acta Phys. Sin. 2013, 62(9): 094214. (in Chinese)
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.
- [9] Zhao Yanzhong, Sun Huayan, Zhang Laixian, et al. An approximate analytical propagation formula for gaussian beams through a cat-eye optical lens under large incidence angle condition[J]. Chin. Phys. Lett. 2011, 28(7), 074101: 1 - 4.
- [10] Yanzhong Zhao, Huayan Sun, Xi Zhang, et al. The interference characteristics of light-waves from a tilted and defocused cat-eye optical lens irradiated by laser beam[J]. Optica Applicata, 2011, 3: 617 - 630.
- [11] William S. Rabinovich, Rita Mahon, Mike S. Ferraro, et al. Modulating retro-reflectors links in high turbulence: challenges and solutions [J]. Imaging and Applied Optics, 2015, 7: 7 - 11.
- [12] W S Rabinovich, R Mhahon, M Ferraro, et al. Reduction of scintillation in optical modulating retro-reflector links [J]. Optics Express, 2014, 22(23): 215190.
- [13] Ji Xiaoling, Tang Mingyue. Propagation properties of one-dimensional off-axis Gaussian beams through the turbulent atmosphere [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(9): 4968 - 4973. (in Chinese)
季小玲, 汤明. 一维线阵离轴高斯光束通过湍流大气的传输特性[J]. 物理学报, 2006, 55(9): 4968 - 4973.
- [14] J J Wen, M A Breazeale. A diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams [J]. J. Acoust. Soc. Am. , 1988, 83(5): 1752 - 1756.