

引用格式:吴云龙,叶庆,孔辉,等.基于编码成像的激光能量调控方法研究[J].信息对抗技术,2024,3(1):87-96.[WU Yunlong, YE Qing, KONG Hui, et al. Study on laser energy modulation method based on the coding imaging system[J]. Information Countermeasure Technology, 2024, 3(1):87-96. (in Chinese)]

基于编码成像的激光能量调控方法研究

吴云龙¹,叶庆^{1*},孔辉¹,张慧²,陈大可³

(1. 国防科技大学电子对抗学院,安徽合肥 230037; 2. 地理信息工程国家重点实验室,北京 100088;
3. 中国空间技术研究院,北京 100094)

摘要 为了有效提升光电成像系统焦平面探测器在外界存在激光干扰条件下的环境适应性,同时不显著降低原成像系统成像性能,提出了一种基于编码成像的激光能量调控方法,构建了一套以液晶空间光调制器为核心器件的编码成像实验系统并对该系统的成像性能进行了测试,设计了一套基于编码成像的激光能量调控实验验证系统并开展了多参数条件下编码成像抗激光干扰实验研究。实验结果表明,基于编码成像的激光能量调控方法可在不显著降低成像质量前提下有效提升焦平面探测器的抗激光干扰性能。

关键词 编码成像;激光干扰;液晶空间光调制器;能量调控

中图分类号 TN 97

文章编号 2097-163X(2024)01-0087-10

文献标志码 A

DOI 10.12399/j.issn.2097-163x.2024.01.009

Study on laser energy modulation method based on the coding imaging system

WU Yunlong¹, YE Qing^{1*}, KONG Hui¹, ZHANG Hui², CHEN Dake³

(1. College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
2. State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Beijing 100088, China;
3. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract A laser energy modulation method based on the coding imaging system was proposed, which allowed the focal plane detector to improve its environmental adaptability with the existence of laser jamming and keep its imaging quality with small fraction loss. A coding imaging system based on the liquid crystal spatial light modulator was constructed and its imaging performance was tested. A laser energy modulation experimental validation system was designed and experiment on the capacity of resisting laser jamming by using coding imaging method under multiple parameters was conducted. The experiment results indicated that the proposed laser energy modulation method based on the coding imaging system can improve the capacity of resisting laser jamming of focal plane detector effectively without significant loss of imaging quality.

Keywords coding imaging; laser jamming; liquid crystal spatial light modulator; energy modulation

0 引言

波前编码成像技术作为一种新型的数字光学成像技术,通过在其光学系统的光瞳位置增加 1 块相位掩模板对光的波前进行相位调制编码,产生具有离焦不变性的弥散中间像,该中间像经过数字图像解码后再次恢复为清晰图像。波前编码成像技术可以有效解决普通焦平面光学成像系统固有的景深焦深过小、存在色差等一般问题,从而引起了学者的广泛关注和研究^[1-5]。

波前编码技术首先由科罗拉多大学的 CATHEY 和 DOWSKI 于 1995 年提出^[1]。目前关于波前编码技术的研究主要集中在设计新型相位板和优化图像重构算法等方面。在新型相位板设计方面,目前主要分为 2 大类:旋转对称型相位板^[6-7]和非旋转对称型相位板^[8-18]。旋转对称型相位板制作工艺相对简单,但是存在调制深度较低、景深扩展范围有限等问题。而非旋转对称型相位板则可以实现大范围的景深扩展,因此在实际应用方面的研究较多。已提出的非旋转对称型相位板主要有:三次型分布^[1]、正弦型分布^[8]、对数型分布^[9]、自由型分布^[12]、有理数型分布^[13]、改进的正弦型分布^[14]以及正切型分布^[17]等。每种类型的相位板都有自身的优越性,如正切型相位板在景深扩展上效果较好^[17],而自由型相位板则在抑制场曲等高阶像差上具有较大灵活性^[12]。在重构算法设计研究方面,逆滤波算法^[1]最先被提出,但是当系统存在噪声时,由于信号和噪声同时被放大,导致该算法噪声抑制作用较差。为解决传统逆滤波算法重构图像过程中噪声大、质量差的问题,各种改进型逆滤波算法被相继提出,包括利用高斯型低通滤波器进行图像频谱预处理^[19]、通过预估图像信噪比的先验信息实现保留原始图像高频信息的同时有效抑制图像噪声^[20-21]、通过进一步引入正则化参数以及对比度调节参数大幅提升维纳滤波算法在图像重构中噪声抑制的效果^[22]等方法。随后,陆续有学者分别提出了自适应图像反卷积算法、小波变换、迭代算法等多种图像重构优化方法,均展示了较为优越的噪声抑制效果^[23-25]。

当前,更多学者已由对波前编码成像技术的方法研究转向实际应用研究。丁贵鹏等^[26]将波

前编码成像技术应用于透雾连续变焦光学系统设计中。周军等^[27]基于波前编码成像技术设计并研制了大焦深弹载双色红外探测系统,可将传统探测系统的焦深拓展 10 倍。冯斌等^[28-30]基于波前编码成像技术研制了无热化红外成像系统样机并开展了实验验证,研究结果表明该系统可实现宽温度范围有效工作并将系统的焦深拓展 15.2 倍。王磊等^[31]将波前编码成像技术应用于激光防御领域,用于抑制成像系统的猫眼回波,理论研究结果表明离焦编码成像系统可将激光回波功率减弱 2 个量级以上。

综上所述,目前将编码成像技术应用于激光能量调控领域的研究较少,尤其在公开报道中缺少相关实验研究,仅有极少数研究工作从理论上分析了激光对编码成像系统工作性能的影响^[32]。基于此,提出了一种基于编码成像技术的激光能量调控方法,并利用液晶空间光调制器为核心器件开展了实验验证。

1 基于编码成像的激光能量调控基本原理

波前编码成像系统主要由 3 部分组成:前端光学系统(以透镜为主)、CCD 或 CMOS 等光学传感器件以及数字信号处理系统(包括电子器件和软件程序),如图 1 所示。

在普通光学系统的孔径光阑或光瞳位置增加一个相位掩模板,此相位掩模板一般是非球面的。当光路通过该相位掩模板后,相当于引入了一个附加相位函数,即光波被相位调制,使整个光学系统的点扩散函数(point spread function, PSF)产生变化。

普通光学系统在成像时,来自物平面的光聚焦在焦平面上的一点,此时物上的每一点与像上的每一点一一对应。而在焦平面沿光轴方向的前后位置,光线未被成功聚焦,则光在焦平面上将是一个圆形弥散斑,其直径与离焦量大小成正比关系。与普通光学系统中物平面上的一点唯一对应像平面上的一点有区别的是,相位掩模板在波前编码成像系统中的使用,使得光经过系统时被相位调制,即对光信息产生了编码过程。经过编码(相位调制)后,来自物平面的光将不再会聚到焦平面上的一个点,而是在像平面沿光轴方向前后一定空间按特定规律均匀分布的,即此时不存在确定的焦点。因此,无论光电探测器是

否处于原先焦平面的位置,都将观察到一个模糊的像。在上述过程中,当外界存在相关激光干扰时,激光波前在成像光学系统传输过程中同样会受到掩模板的空间相位调制,从而使相干光束在探测器接收面由一个聚焦光点扩展成一个弥散斑,弥散斑的空间分布主要由相位掩模板的面

型函数分布决定。在入射激光能量一定的条件下,弥散斑的存在会有效降低辐照在探测器表面的激光峰值光强,从而一定程度上起到了保护成像探测器件不受干扰激光破坏的作用,提升了光电成像系统在激光干扰条件下的环境适应性。

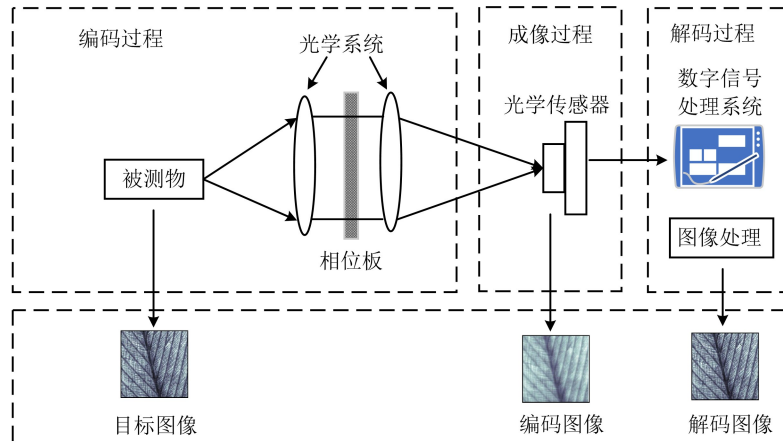


图 1 波前编码成像系统组成

Fig. 1 The composition of wavefront coding system

波前编码成像技术除了增加了对光波的编码(相位调制)过程之外,与传统光学成像系统相比还增加了解码(解调)过程。光直接通过掩模板编码后的成像是模糊的,必须对该模糊像进行后期处理,即解码后才能再次得到清晰的图像。

2 编码成像实验系统设计与成像实验

2.1 编码成像系统点扩散函数测量

目前,已有研究中关于编码成像实验大多是通过制备相位掩模板和编码成像镜头而开展的,该方法的优点是实验装置紧凑、易于调节,缺点是单片相位掩模板制备成本高(通常在万元以上),制备周期长且相位掩模板的面型函数一经确定写入便无法再改变,因此不利于在实验中进行动态参数调节和开展对比实验。鉴于此,本文提出利用通用型液晶空间光调制器为核心器件,通过加载预先生成的多参数可调的数字相位掩模板,实现对入射波前的编码调制。在开展编码成像实验之前,首先要对成像系统的点扩散函数(PSF)进行测量,方便后续进行图像解码复原。PSF测量所采用的实验装置设计思路如图 2 所示。

图 2 中, C 为平行光管; L0 为 Edmund Optics 公司生产的 25 mm 焦距紧凑型定焦镜头;

L1、L2 是一对傅里叶变换透镜组,焦距为 300 mm;BS 为半透半反镜;CCD 为 Thorlabs 公司生产的 CS165MU 型 160 万像素黑白图像传感器,分辨率为 $1\,440 \times 1\,080$,放置于 L2 透镜的焦平面处;空间光调制器(spatial light modulator, SLM)为 Holoeye 公司生产的 PLUTO-2 液晶空间光调制器,分辨率为 $1\,920 \times 1\,080$,通过加载预先生成的数字相位掩模板实现对光波的编码调制,放置于 L1 透镜的焦平面处。实验中采用经典的三次型函数来实现编码调制,利用计算机生成调制系数 α 为 200 的数字相位掩模板,如图 3 所示。

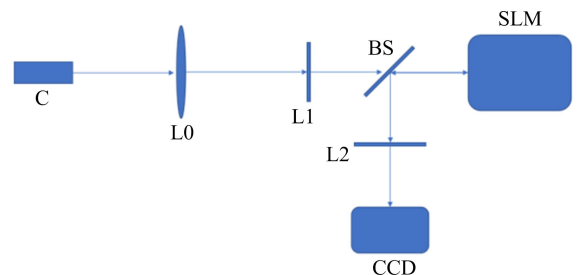


图 2 编码成像系统 PSF 实验测试光路示意图

Fig. 2 The PSF test schematic diagram of coding imaging system

将图 3 所示的数字相位掩模板加载到图 2 中的液晶空间光调制器上,并利用平行光管测得等

效编码成像系统的 PSF 光场分布如图 4 所示。

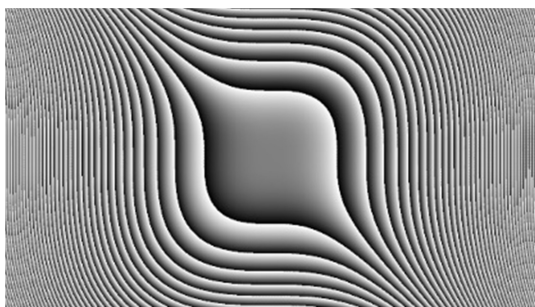


图 3 调制系数为 200 的数字相位掩模板分布图

Fig. 3 Digital phase mask plate distribution with modulation factor of 200

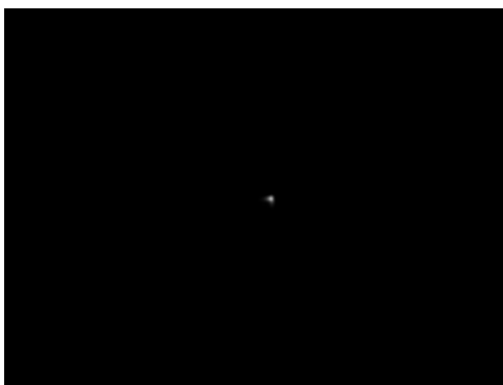


图 4 编码成像系统实测 PSF 光场分布图

Fig. 4 The measured PSF light field distribution of the coded imaging system

2.2 编码成像实验与图像质量恢复

在测量得到编码成像系统的 PSF 后,可以进一步开展系统的编码成像实验和图像质量恢复,在这一过程中一般需要采用空间分辨率靶标开展相关实验。空间分辨率是指经过成像后在图像上所能分辨的最小单元之间的距离,是衡量成像系统成像性能和质量优劣的重要指标。在实验中常通过对各种分辨率测试靶标进行成像,以此测量成像系统的空间分辨率。

本次实验使用的分辨率测试靶标为 Edmund Optics 公司生产的 USAF1951 分辨率测试板,如图 5 所示。

为便于实际操作及观察,只需对图 2 中的实验装置进行轻微调整,即将图 2 中平行光管替换为分辨率测试靶标,本实验所采用的光路如图 6 所示。

图 6 中,LED 为平面光源,用于照明分辨率测试靶标;USAF 为分辨率测试靶标;其他实验装置均与图 2 中的实验装置保持一致。

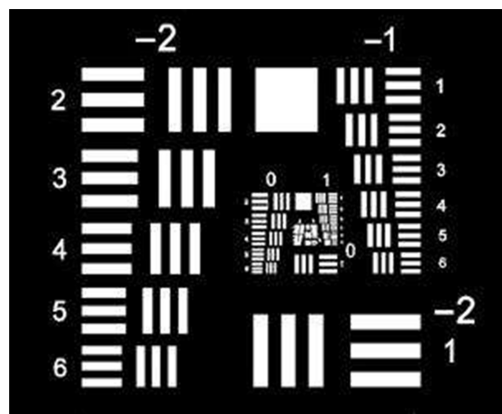


图 5 USAF1951 分辨率测试板

Fig. 5 USAF1951 resolution test board

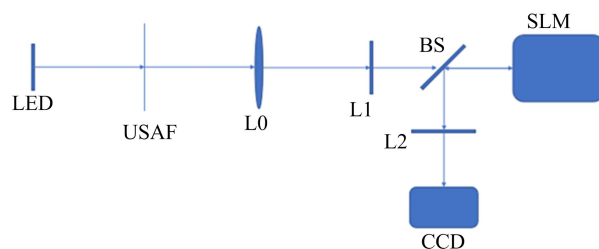


图 6 利用靶标测试成像系统空间分辨率的实验光路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of spatial resolution test on imaging system

实验中,首先令 SLM 不加载数字相位掩模板,此时液晶空间光调制器可等效看作一个平面反射镜,用于模拟传统光学成像系统进行常规成像,在黑白传感器上采集得到了如图 7(a)所示的分辨率测试靶标图像。

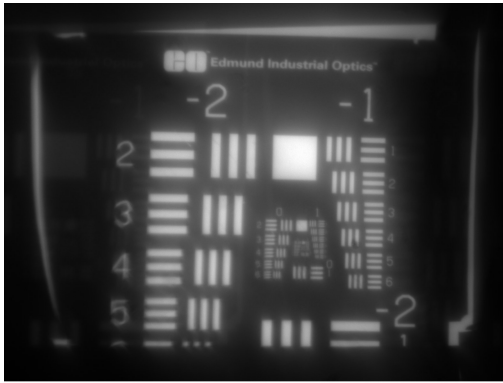
接下来在 SLM 上加载如图 3 所示的数字相位掩模板,再次观察成像,此时相机上得到了如图 7(b)所示的分辨率测试靶标的图像。通过对比图 7(a)与 7(b)可以很明显地看出,SLM 加载数字相位掩模板后,可对入射光波进行波前相位调制,从而在黑白传感器上形成模糊的弥散中间像。采用维纳滤波的方法,并利用图 4 所示的实测 PSF,可对分辨率测试靶标经编码后的中间模糊图像进行图像质量恢复,经过维纳滤波得到恢复图像的估计值为:

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{1}{H(u, v)} \frac{|H(u, v)|^2}{|H(u, v)|^2 + \frac{S_\eta(u, v)}{S_f(u, v)}} \right] G(u, v) \quad (1)$$

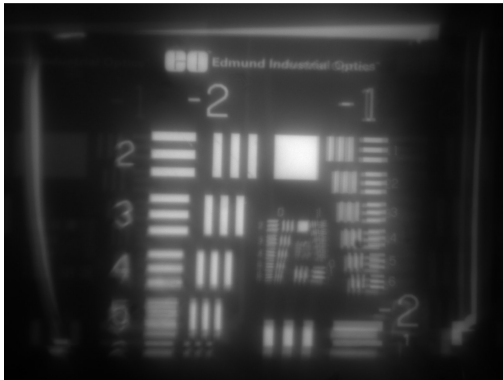
式中, $H(u, v)$ 为光学传递函数 (OTF),

$|H(u, v)|^2 = H(u, v)H^*(u, v)$, $H^*(u, v)$ 是 $H(u, v)$ 的共轭; $S_\eta(u, v) = |N(u, v)|^2$ 为噪声的功率谱, $S_f(u, v) = |F(u, v)|^2$ 为输入原始图像的功率谱。 $G(u, v)$ 为经过光学系统后接收图像的傅里叶变换。 实际情况下, 功率谱 $S_\eta(u, v)$ 和 $S_f(u, v)$ 一般是未知的, 可用一个估计的参数值 K 来替换表达式中的 $S_\eta(u, v)/S_f(u, v)$ 项, 此时式(1)将变换为:

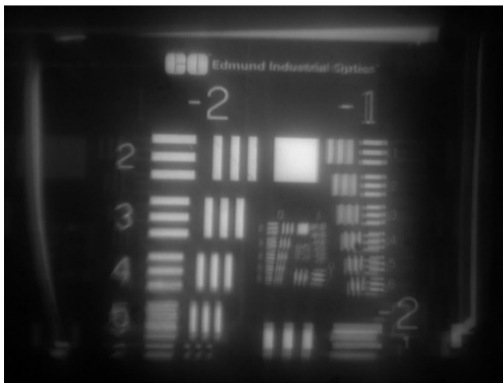
$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{1}{H(u, v)} \frac{|H(u, v)|^2}{|H(u, v)|^2 + K} \right] G(u, v) \quad (2)$$



(a) 未加载相位掩膜板



(b) 加载相位掩膜板



(c) 经过解码恢复

图 7 分辨率靶标测试图

Fig. 7 Resolution test target images

图 7(b) 经维纳滤波解码恢复的图像如图 7(c) 所示, 通过将图 7(c) 与 7(b) 所示的中间模糊图像相对比, 可以看出经过解码恢复后的图像清晰度有了很大提高, 但与图 7(a) 中未经过波前编码的图像相比, 图像的清晰度只在中间部分区域得到了较大提高, 在边缘区域还存在一定的振铃效应, 这主要是由 PSF 测量误差和解码算法精度引起的。

2.3 解码图像质量定量评价

通过人眼直接观察图像质量时, 一般主观性较大, 往往无法对其进行定量描述。因此, 需要选择一种能够对图像质量进行客观定量分析的评价指标。在本实验中, 评价恢复图像质量的好坏一般是将其与未经过波前编码的常规图像进行对比, 故使用皮尔逊相关系数来定量计算解码恢复图像与编码调制前常规图像的相关程度, 进而客观评价出解码图像的恢复质量是一种可行的方法。皮尔逊相关系数的计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

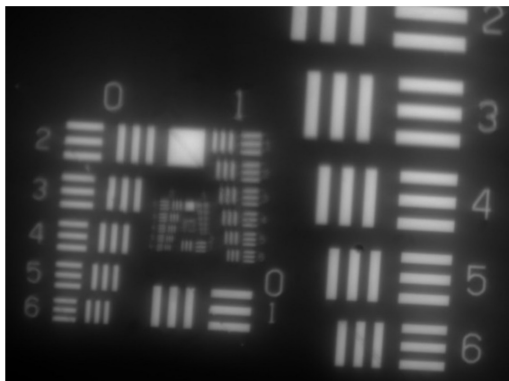
为了进一步排除背景区域干扰, 使图像对比效果更加明显, 需要减小图像中的无效区域, 即减小没有条纹和数字的黑色空白区域面积。实验中通过降低分辨率测试靶标与成像主镜头之间的距离, 使靶标上的有效区域尽可能占据视场, 可以得到分辨率测试靶标的常规局部放大图像, 以及加载相位掩膜板对它进行编码调制后的图像, 分别如图 8(a) 和 8(b) 所示。

利用 PSF 对图 8(b) 进行解码, 得到恢复图像如图 8(c) 所示。对编码前的图像图 8(a) 和解码后的恢复图像图 8(c) 进行对比, 计算二者的皮尔逊相关系数, 以定量评价解码恢复效果。相关系数的值一般在 0~1 之间, 数值越接近 1 表示二者相关程度越高, 即 PSF 误差越小, 图像恢复的质量也越高。经过计算, 图 8(b) 和 8(c) 与未经过波前编码调制的原图 8(a) 相比, 计算得到的皮尔逊相关系数分别为 0.918 和 0.974, 这就量化地说明了解码图像具有较高的恢复质量。

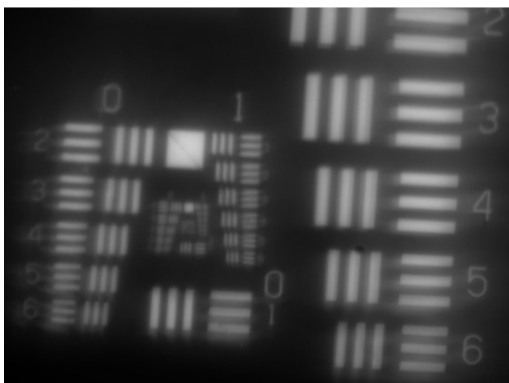
3 基于编码成像的激光能量调控实验

如前所述, 编码成像技术的引入, 可使成像链路中物空间的光在相位掩膜板处经过波前调

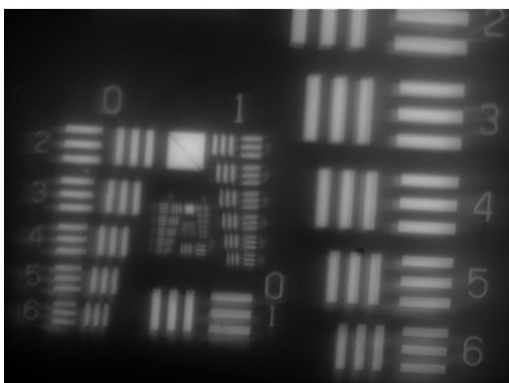
制后,原先聚焦的光发散成为相对均匀的弥散光,从而起到保护成像探测器的目的,下面将进一步开展基于编码成像的激光能量调控实验研究。



(a) 未加载相位掩模板



(b) 加载相位掩模板



(c) 经过解码恢复

图 8 分辨率靶标局部放大测试图

Fig. 8 Magnified local images of resolution test target

3.1 实验光路设计

为探究波前编码成像在激光能量高调控方面的作用,只需探究在相同强度激光的照射下,编码成像技术对探测器表面激光峰值强度的影响。由于本实验中采用的黑白图像传感器像素位深为 8 位,其灰度值最大为 255。如果照射在探测器表面的激光强度过大,导致探测器会出现

饱和,亮度超过探测器的线性响应范围,饱和区域灰度值始终为 255,那么此时灰度值并不能反映出真实的激光强度。这时若使探测器上的激光强度小幅度降低,则探测器可能仍处于饱和状态,灰度值将未发生改变,仍为 255。因此,若要使灰度值能够真实反映探测器表面的激光强度,则需要保持探测器不出现饱和区域,即灰度值始终小于 255。

实验中所采用的光路如图 9 所示,LS 为氦-氖激光器,其出射波长 λ 为 632.8 nm;DF1、DF2 表示可调谐中性密度滤光片组;BE 为消色差扩束镜;BS 为半透半反镜(薄膜分束镜);L1 为消色差透镜;R1 是平面反射镜。

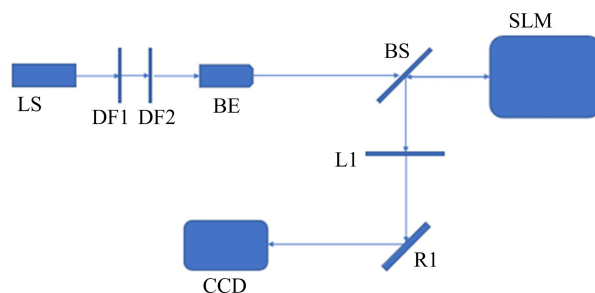


图 9 激光能量调控测试光路示意图

Fig. 9 Schematic diagram of laser energy modulation experiment

3.2 激光调制成像结果对比

调节激光衰减器的衰减量,使激光的亮度大小合适,即探测器采集图像最大灰度值始终小于 255。依然以调制系数 α 为 200 的数字相位掩模板为例,如图 3 所示,同时为了将液晶 SLM 调制产生的多衍射级次光斑进行空间有效分离,因此提出在图 3 所示的相位掩模板基础上叠加数字光栅的方法,所采用的数字光栅分布如图 10 所示。

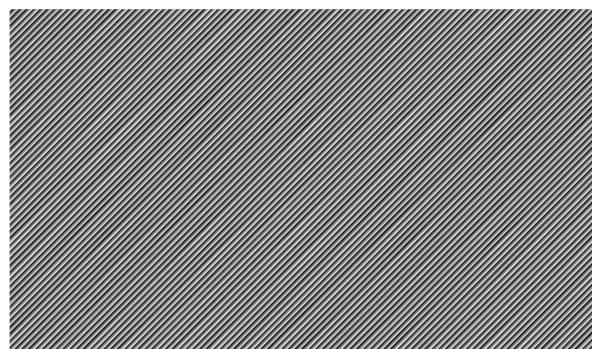


图 10 叠加数字光栅相位分布图

Fig. 10 Superimposed digital grating phase profile

图 11(a)~(c)分别为液晶 SLM“不加载相位掩模板时”“加载相位掩模板时”“加载相位掩模板并额外叠加数字光栅”3 种情况下的成像结果。

图 11 中 3 幅图像光斑亮度过低,单纯依靠人眼要观察出 3 幅图的变化情况比较困难,只适合

用计算机对灰度值进行分析,并不利于直接展示。因此为便于直观观察 3 幅图像的区别,在保持其他实验条件不变的情况下,减小激光衰减器的衰减量后,提高入射激光强度,再次采集图 11 中 3 种情况下的激光成像结果,分别对应图 12(a)~(c)。

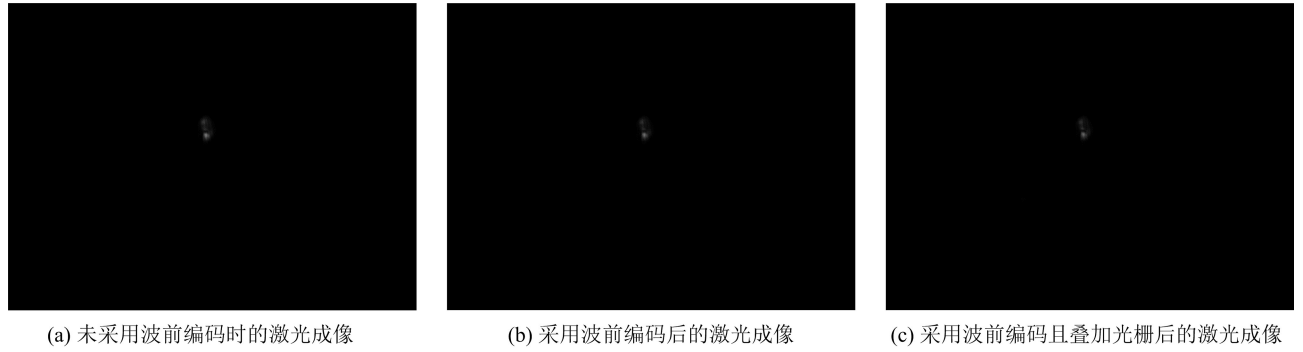


图 11 弱激光入射条件下的成像结果

Fig. 11 Imaging results under low laser incidence conditions

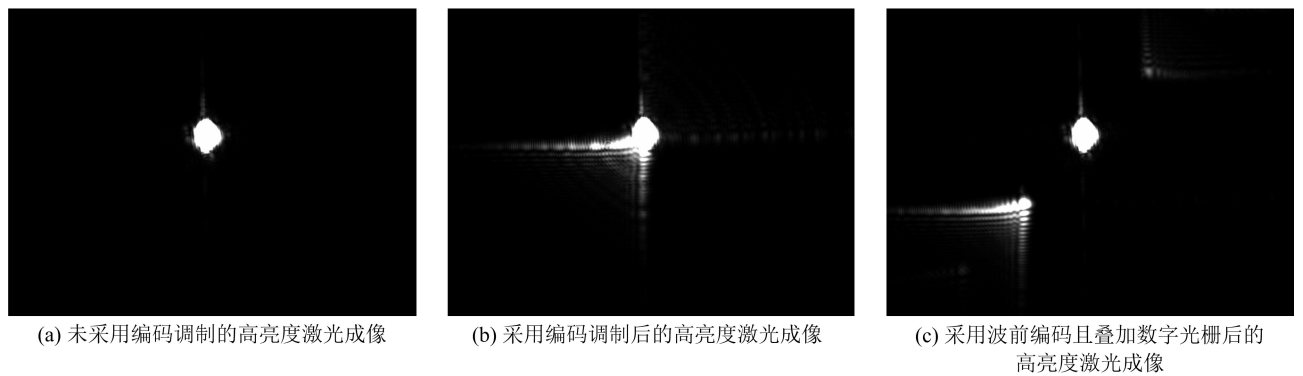


图 12 强激光入射条件下的成像结果

Fig. 12 Imaging results under high laser incidence conditions

由图 12 可以看出,通过编码相位调制,使得入射激光在探测器表面的光场由单一光斑分布变为多衍射级次光斑分布,且在图像中心存在一个未经调制的零级光斑,各衍射级次光斑在空间上相互叠加在一起。而利用叠加数字光栅的方法可实现各衍射级次在空间上相互分离。

通过 Matlab 编写程序,对图 13(a)~(c)的灰度值进行分析,找到其最大灰度值,分别为 128、115、103。此时图像最大灰度值相对较小,仅为探测器最大范围的一半,因此在此基础上可以适当减小激光衰减量,进一步提高激光干扰图像的灰度值。接下来分别开展了不加调制、仅加载三次相位调制、加载复合相位调制以及不同调制系数条件下的激光能量调控实验,并计算了在相位掩模板上叠加数字光栅时相比未采用编码调制时激光干扰图像最大灰度值的下降比例,实验结果

见表 1 所列。

注意到未使用相位掩模板调制时激光图像最大灰度值并不相同,这主要是由于激光器输出功率并不能严格保持恒定导致的,此外还受实验环境影响,存在外力造成实验光路抖动而带来的误差。由表 1 结果可以看出,激光干扰图像中最大灰度值在经过编码调制后明显下降,增加数字光栅调制后图像的最大灰度值会进一步减小,且采用的数字相位掩模板调制系数越大,激光峰值亮度下降的比例也更大,即调制系数越大的相位掩模板在入射激光能量调控方面的作用越明显。

为了更加深入地分析这一现象的原因,本文以较高激光亮度分别对不同调制系数下叠加光栅的复合相位掩模板进行成像,成像结果如图 13(a)~(e)所示。

观察图 13 不难看出,调制系数越大,经相位

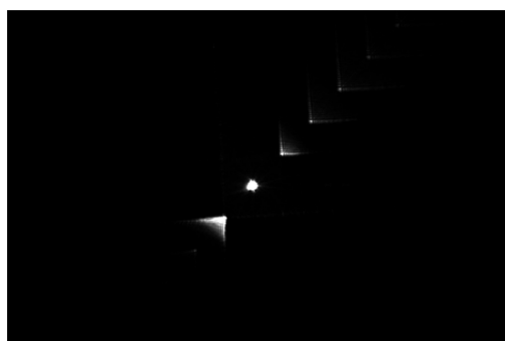
调制而产生的多级次衍射光斑旁瓣数量越多。由于入射激光的总能量是一定的,衍射光斑旁瓣数量越多,旁瓣分得的能量就越多,使得中心区域未被调制的零级光斑所占据的总能量就越小。一般而言,中间未被调制区域光斑往往是亮度最高的区域,波前编码调制可以将原本聚集的光分

散开来,有效地降低了激光中心光斑的峰值强度。调制系数越大,激光干扰图像中心光斑中最大灰度值下降程度越大。另一方面,叠加数字光栅可以将经调制的各衍射级次光斑在空间上大范围分离,从而有效避免出现图 12(b)所示的光斑空间叠加现象,进一步分散中心零级光斑的能量。

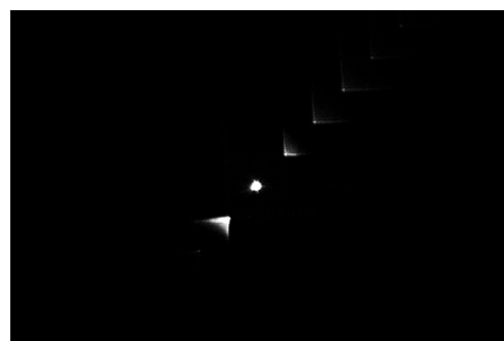
表 1 不同成像条件下激光干扰图像的最大灰度值

Tab. 1 Maximum gray value of laser interference image under different imaging conditions

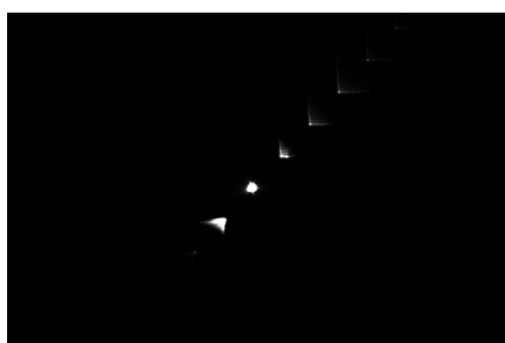
相位掩膜板调制系数 α	未调制	仅加载相位掩膜板	加载相位掩膜板+光栅	图像最大灰度值下降比例(%)
400	198	162	133	32.83
300	188	151	141	25.00
200	198	169	148	25.25
100	193	175	169	12.44
50	181	174	158	12.71



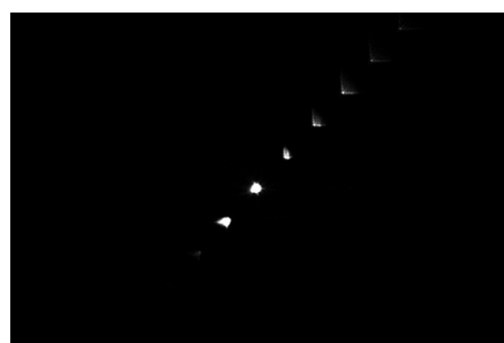
(a) $\alpha=400$



(b) $\alpha=300$



(c) $\alpha=200$



(d) $\alpha=100$



(e) $\alpha=50$

图 13 不同调制系数下复合相位掩膜板成像结果

Fig. 13 Imaging results of composite phase mask plates with different modulation coefficients

4 结束语

本文提出了一种基于编码成像的激光能量调控方法,该方法针对传统光电成像系统易受激光干扰的现实问题,通过利用光场调控器件对入射波前进行相位调制,可在不显著降低原成像系统成像性能的前提下有效提升焦平面探测器的环境适应性。实验结果表明,基于编码成像的激光能量调控方法可将到达探测器表面的激光峰值强度降低30%以上,且能保持较高的图像恢复质量,同时成像系统抗激光干扰性能可通过改变编码参数进行动态调控,可为发展新型光电成像探测技术提供理论支撑。

参考文献

- [1] DOWSKI E R, CATHEY W T. Extended depth of field through wave-front coding[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(11): 1859-1866.
- [2] BRADBURN S, CATHEY W T, DOWSKI E R. Realizations of focus invariance in optical-digital systems with wave-front coding[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(35): 9157-9166.
- [3] CATHEY W T, DOWSKI E R. New paradigm for imaging systems[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(29): 6080-6092.
- [4] DOWSKI E R, CORMACK R H, SARMA S D. Wavefront coding: jointly optimized optical and digital imaging systems[C]//*Proceedings of Visual Information Processing IX*. [S.l.:s.n.], 2000: 114-120.
- [5] WACH H B, DOWSKI E R, CATHEY W T. Control of chromatic focal shift through wave-front coding[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(23): 5359-5367.
- [6] MEZOUARI S, HARVEY A R. Phase pupil functions for reduction of defocus and spherical aberrations[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(10): 771-773.
- [7] ZHOU F, YE R, LI G W, et al. Optimized circularly symmetric phase mask to extend the depth of focus[J]. *Journal of the Optical Society of America, A. Optics, Image Science, and Vision*, 2009, 26(8): 1889-1895.
- [8] ZHAO H, LI Y C. Optimized sinusoidal phase mask to extend the depth of field of an incoherent imaging system[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(2): 267-269.
- [9] ZHAO H, LI Y C. Optimized logarithmic phase masks used to generate defocus invariant modulation transfer function for wavefront coding system[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(15): 2630-2632.
- [10] PRASAD S, PAUCA V P, PLEMMONS R J, et al. Pupil-phase optimization for extended-focus, aberration-corrected imaging systems [C]//*Proceedings of Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations XIV*. [S.l.:s.n.], 2004: 335-345.
- [11] YANG Q G, LIU L, SUN J F. Optimized phase pupil masks for extended depth of field[J]. *Optics Communications*, 2007, 272(1): 56-66.
- [12] TAKAHASHI Y, KOMATSU S. Optimized free-form phase mask for extension of depth of field in wavefront-coded imaging[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(13): 1515-1517.
- [13] ZHOU F, LI G W, ZHANG H T, et al. Rational phase mask to extend the depth of field in optical-digital hybrid imaging systems[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(3): 380-382.
- [14] WANG J G, BU J, WANG M W, et al. Improved sinusoidal phase plate to extend depth of field in incoherent hybrid imaging systems[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(21): 4534-4536.
- [15] LIU M, DONG L Q, ZHAO Y J, et al. Stationary phase analysis of generalized cubic phase mask wavefront coding[J]. *Optics Communications*, 2013, 298/299: 67-74.
- [16] ARINES J, HERNANDEZ R O, SINZINGER S, et al. Wavefront-coding technique for inexpensive and robust retinal imaging[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 3986-3988.
- [17] LE V N, CHEN S Q, FAN Z G. Optimized asymmetrical tangent phase mask to obtain defocus invariant modulation transfer function in incoherent imaging systems[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 2171-2174.
- [18] XIE H B, HE L R, YANG L, et al. An extended depth-of-field imaging system with a non-rotationally symmetric phase mask[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(10): 103101.
- [19] MEZOUARI S, HARVEY A R. Wavefront coding for aberration compensation in thermal imaging systems[C]//*Proceedings of Novel Optical Systems Design and Optimization IV*. [S.l.:s.n.], 2001: 34-42.
- [20] PLEMMONS R J, HORVATH M, LEONHARDT E, et al. Computational imaging systems for iris recognition[C]//*Proceedings of Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations XIV*. [S.l.:s.n.], 2004: 346-357.
- [21] GOMEZ-MORALES F, TUDELA R, FERRE BORRULL J, et al. Pupil filters for wavefront coding: off axis performance[C]//*Proceedings of Optical Design*

- and Engineering II. [S. l. : s. n.], 2005: 938-944.
- [22] YAN F, ZHENG L G, ZHANG X J. Image restoration of an off-axis three-mirror anastigmatic optical system with wavefront coding technology[J]. Optical Engineering, 2008, 47(1): 017006.
- [23] ABRAHAMSSON S, USAWA S, GUSTAFSSON M. A new approach to extended focus for high-speed, high-resolution biological microscopy [C]//Proceedings of Three-Dimensional and Multidimensional Microscopy: Image Acquisition and Processing XIII. [S. l. : s. n.], 2006: 60900N.
- [24] VAN DER GRACHT J, NAGY J G, PAUCA V P, et al. Iterative restoration of wavefront coded imagery for focus invariance[C]//Proceedings of Integrated Computational Imaging Systems. [S. l. : s. n.], 2001: 109-115.
- [25] 张欣. 波前编码技术中的图像复原研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
ZHANG Xin. Research on the image restoration in wavefront coding technology [D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2010. (in Chinese)
- [26] 丁贵鹏, 陶钢, 庞春桥, 等. 焦深延拓的透雾连续变焦光学系统设计[J]. 兵工学报, 2020, 41(8): 1539-1548.
DING Guipeng, TAO Gang, PANG Chunqiao, et al. Design of fog transmission zoom optical system with focal depth extension[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(8): 1539-1548. (in Chinese)
- [27] 周军, 陈守谦, 甄政, 等. 基于波前编码的大焦深弹载双色红外探测系统[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 75-79.
ZHOU Jun, CHEN Shouqian, ZHEN Zheng, et al. Double bands missile-borne infrared detection system of extended focus depth based on wavefront coding [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 75-79. (in Chinese)
- [28] FENG B, SHI Z L, CHANG Z, et al. 110°C range athermalization of wavefront coding infrared imaging systems [J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 85: 157-162.
- [29] FENG B, SHI Z L, XU B S, et al. ZnSe-material phase mask applied to athermalization of infrared imaging system [J]. Applied Optics, 2016, 55(21): 5715-5720.
- [30] 史泽林, 冯斌, 冯萍. 基于波前编码的无热化红外成像技术综述[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 24-34.
SHI Zelin, FENG Bin, FENG Ping. Review on athermalized infrared imaging technology based on wavefront coding [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 24-34. (in Chinese)
- [31] 王磊, 孙晓泉, 叶庆. 波前编码光电成像系统猫眼回波分析[J]. 量子电子学报, 2020, 37(4): 418-429.
WANG Lei, SUN Xiaoquan, YE Qing. Retroreflection analysis of wavefront coding imaging system [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2020, 37(4): 418-429. (in Chinese)
- [32] 苏永鹏. 相位板技术在光学成像系统中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2018.
SU Yongpeng. Application of phase mask techniques in optical imaging system [D]. Tianjin : Tianjin University, 2018. (in Chinese)

作者简介

吴云龙

男, 1988 年生, 博士, 副研究员, 研究方向为新型光场调控技术研究
E-mail: jackwu1225@126.com



叶庆

男, 1981 年生, 博士, 副研究员, 研究方向为激光技术研究
E-mail: yeqing18@nudt.edu.cn



孔辉

男, 1984 年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为激光技术研究
E-mail: konghui17@nudt.edu.cn



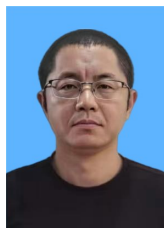
张慧

女, 1980 年生, 高级工程师, 研究方向为图像检测识别、地理空间数据分析处理及应用
E-mail: 40782137@qq.com



陈大可

男, 1981 年生, 高级工程师, 研究方向为新概念空间飞行器设计
E-mail: chendake@qxslab.cn



责任编辑 安 蓓