

全息模式波前传感器中高阶衍射抑制方法研究

程静欣*, 杨海波, 李曼, 解娜

中国电子科技集团公司光电研究院光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308

摘要 全息模式波前传感器(HWFS)是一种模式型的波前传感器,它利用多模复合的全息元件和位敏探测器来获得入射光中特定模式 Zernike 像差的强度。然而,多模复合全息元件中的光衍射过程通常会伴随着高阶衍射产生的干扰光。这些干扰光会分散激光能量,降低探测信噪比。提出一种通过引入强度调制的方法来消除由二元相位型全息元件衍射产生的干扰光。该方法不仅可以应用于全息模式波前传感器中干扰光的消除,也适用于其他基于二元相位型全息元件的应用,如全息成像、像移干涉仪、光束偏转器等。

关键词 全息; 波前传感; 计算全息; 衍射光学; Zernike 像差; 全息模式波前传感器; 二元相位全息元件; 高阶衍射

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1009001

Suppression of High Order Diffraction in Holographic Wave-Front Sensor

Cheng Jingxin*, Yang Haibo, Li Man, Xie Na

Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation, Tianjin 300308, China

Abstract A holographic wave-front sensor (HWFS) is a modal wave-front sensor, which utilizes a multi-mode composite holographic element and a position sensitive photodetector to extract the amplitudes of specific Zernike modes from the incident light. However, disturbing light from high order diffraction of the multi-mode composite holographic element is inevitable. The disturbing light disperses the power of the incident light and decreases the signal-to-noise ratio of the sensor. Here, an intensity modulation method is introduced to eliminate the interference light generated by the diffraction of binary phase holographic elements. The proposed method can be used for the elimination of interference light in the holographic mode wavefront sensor, and it is suitable to other applications based on binary phase holographic elements, such as holographic imaging, phase-stepping interferometers, and beam deflectors.

Key words holography; wavefront sensing; computer holography; diffractive optics; Zernike aberration; holographic wave-front sensor; binary phase holographic element; high-order diffraction

OCIS codes 090.1760; 090.1970; 010.7350

1 引言

近年来,随着激光技术的发展,激光的应用领域越来越广泛,从激光加工到激光通信乃至激光武器,都涉及激光的传播问题。激光在非理想光学元件或湍流大气等介质中传播时不可避免地会产生波前畸

变,导致光束质量变差^[1-2]。为了能够快速、准确地检测出激光的波前畸变,人们开发出了各式各样的波前探测器^[3-10]。然而,传统的波前探测器通常需要繁琐的图像处理过程和矩阵运算,这导致其探测速度受限(通常只能达到 kHz 量级)^[11]。全息模式波前传感器(HWFS)^[12-13]是一种新型的模式型波前

收稿日期: 2020-09-16; 修回日期: 2020-10-24; 录用日期: 2020-12-08

基金项目: 国防科技重点实验室基金(6142107180304)

* E-mail: chengjx163@163.com

探测器,它通过对畸变波前中 Zernike 像差分量的并行测量来实现波前探测,避免了波前复原所需的计算^[11,14-15],结合高速的光强探测器如位置敏感探测器(PSD)可以实现 100 kHz 乃至 MHz 量级的探测速率^[15-16],其探测速率远快于其他形式的波前探测器。

HWFS 通常采用多模式复合的全息衍射元件来分离不同模式的像差,而衍射元件总是不可避免地会产生多级衍射^[15-16],且随着全息元件复合模式数量的增加,这些多级衍射光斑混杂在一起,不同模式因相互串扰产生更多的衍射光斑,导致探测信噪比降低。如何消除多级衍射产生的干扰光一直是衍射型元件应用中的一个难点^[17-20]。为了消除干扰光的影响,人们在探测器前放置一个只允许信号光透过的微孔光阑^[15],然而微孔光阑的尺寸很难做到足够小,光阑与信号光斑的对准也有很大的难度。Maurer 等^[17]提出了一种在计算全息图时增加一束与干扰光相位相反的人射光的方法来消除不需要的衍射光,然而这需要先知道干扰光的相位和强度分布,因此该方法不适用于多光束衍射的复杂元件。本文提出一种通过引入强度调制来消除全息衍射元件产生的干扰光的方法。

2 全息模式波前传感器

模式波前传感器的工作原理^[12]如图 1(a)所示,

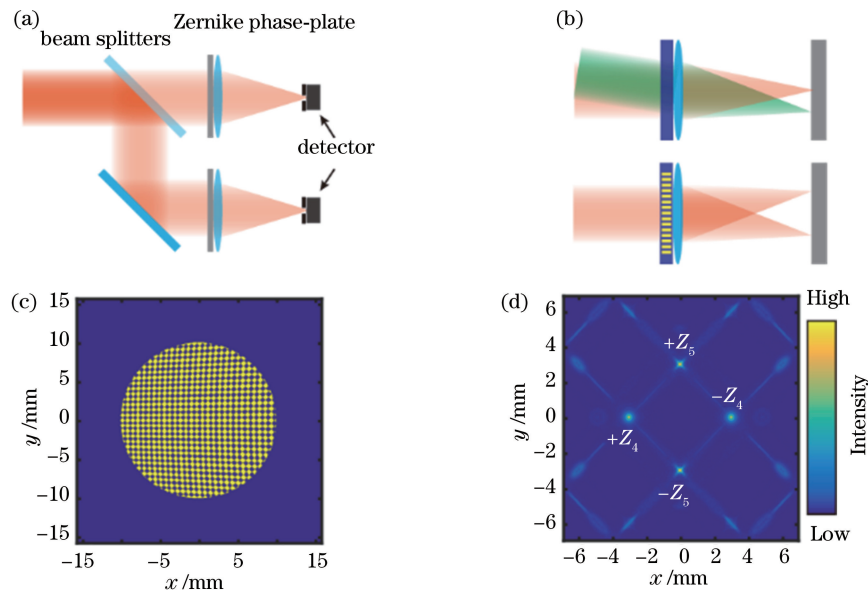


图 1 HWFS 工作原理。(a) HWFS 工作原理示意图;(b) CGH 生成方式和工作原理;(c)多模复合二元相位全息模板的相位图;(d)图 1(c)所示的全息模板在探测面上的衍射效果图

Fig. 1 Working principle of HWFS. (a) Working principle diagram of HWFS; (b) generation and working principle of CGH; (c) phase map of multimode composite binary phase hologram; (d) diffraction result on detection plane of holographic template shown in Fig. 1(c)

待测的准直激光经分光片均分为两个平行的子光束,这两个子光束分别穿过一个具有特定 Zernike 模式的像差板后经透镜聚焦到探测器上。假设待测激光的波前为

$$W = \exp \left[-i \left(a Z_m + \sum_{n \neq m} c_n Z_n \right) \right], \quad (1)$$

式中: Z_m 表示第 m 阶 Zernike 像差; a, c_n 为实数,表示相应模式的 Zernike 像差强度。两个像差板产生的偏置像差分别为 $B = \exp(\pm i b Z_m)$ (其中 b 为偏置系数),于是,像差板后两个子光束的波前分别为

$$W_1 = \exp[-i(a \pm b)Z_m] \cdot \exp\left(i \sum_{n \neq m} c_n Z_n\right). \quad (2)$$

当 a 很小时,通过选择合适的偏置系数 b ,可以近似使两个探测器的强度之差 $\Delta I \propto a$ ^[12],这样只需要测得 ΔI 就可以得到待测激光中像差分量 Z_m 的强度。通过将待测激光均分成多个子光束对,就可以同时测得其所含的多个像差模式分量的大小,从而获得较为完整的激光波前。

然而,随着像差模式数的增加,分光片的光效率越来越低,且会使系统体积和复杂度急速增加,因此人们提出了利用计算全息相位板(CGPH)替代分光片和像差板^[21-23],以实现激光波前探测,这样可以大大减小系统体积和复杂度。

CGH^[24]的生成和工作原理如图 1(b)所示,首先使一束准直、斜入射的参考光和一束带有特定模式像差的正入射光在一个平面上干涉并记录干涉的光强和相位分布,得到一幅全息图。将该全息图加载到相位或强度调制板如空间光调制器、数字微反射镜(DMD)等,得到一个全息元件。接下来,通过将待测激光照射到该全息元件上,就可以得到携带特定模式的正负偏置像差的子光束。由于参考光和像差偏置光的波前已知,因此可以直接计算出全息图,并将其加载到全息元件上,从而实现波前探测的功能。此外,计算不同方向的参考光与不同模式的偏置光干涉的全息图,并将它们以特定的算法叠加到同一块全息板上,实现多像差模式的同时探测。

根据计算方法和应用需求的不同,CGH可以有多种设计方式^[13,16,21,25],而使用较多的 CGH 是线性载频的二元相位型 CGH(BPCGH)^[26-27]。线性载频是指采用准直的参考光与像差偏置光进行干涉,二元相位是指 CGH 的复透过率只有相位分量,强度分量为常数,且相位也只有 0 和 φ (通常情况下, $\varphi = \pi$) 两种值。

图 1(c)是通过计算得到的一个 BPCGH,它复合了 Z_4 、 Z_5 两个偏置模式,其在探测面上的衍射效果如图 1(d)所示,从中可以看到两个偏置模式对应的聚焦光斑。图中除了有 4 个主光斑外,还存在多个形状的不规则的光斑,这些就是由 CGH 多级衍射产生的干扰光。随着 CGH 复合模式数的增加,干扰光会越来越多且无规律,从而影响对聚焦光斑的准确测量。

3 干扰光的抑制

为了分析干扰光产生过程并提出消除干扰光的

方法,本文根据图 1(b)所示的光路建立仿真模型。设定入射光复振幅为 U_0 ,BPCGH 的复透过率为 H ,透镜的复透过率为 L ,透镜焦距为 d ,探测面 S 位于透镜焦平面处。 $x_1o_1y_1$ 为 CGH 处面内坐标系,其原点位于 CGH 与光轴交点处; $x_2o_2y_2$ 为探测面处面内坐标系;待测激光波长为 λ ,波数 $k = 2\pi/\lambda$ 。

对于 BPCGH 而言,其复透过率 $H = \exp(i\varphi_B)$,

其中 $\varphi_B = \begin{cases} \pi, & \varphi_H \geq \pi/2 \\ 0, & \varphi_H < \pi/2 \end{cases}$, φ_H 可表示为

$$\varphi_H = \sum_{i=1}^N \frac{\pi}{2} [1 + \cos(b \cdot Z_i - \mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r}_1)], \quad (3)$$

式中: N 表示 CGH 复合模式的数量; $\mathbf{k}_i = \frac{2\pi}{T_i} \cdot$

$\frac{\mathbf{k}_i}{|\mathbf{k}_i|}$ 为第 i 个载频的空间频率向量,载频周期为 T_i ; \mathbf{r}_1 为 BPCGH 面内坐标向量; Z_i 为第 i 个载频携带的 Zernike 像差模式。

3.1 单模 BPCGH

对于单模的 BPCGH 而言,其载频是一个一维矩形相位光栅,假设其携带的 Zernike 偏置像差为 Z_5 (代表 y 轴初级像散),偏置幅度 $b = 0.7$ 。BPCGH 复透过率的相位和幅值如图 2(a)、(b)所示,图中加粗虚线代表透过率,实线代表相位。该 CGH 为纯相位型全息板,因此透过率幅值始终为 1,而相位为 0 或 π 。忽略 CGH 和透镜的厚度,则透镜后表面处激光复振幅为 $U_1 = U_0 \cdot H \cdot L$ 。使用角谱法^[25-26]计算得到探测面处的光场分布为

$$U_2 = g(U_1, \lambda, \delta_1, \delta_2, d), \quad (4)$$

其中,根据文献[28]可得 U_2 为

$$g(U_1, \lambda, \delta_1, \delta_2, d) = \exp \left[i \frac{k}{2} \frac{(m-1)}{md} r_2^2 \right] \mathcal{F}^{-1} \left\{ \exp \left[-i \frac{2d}{mk} (\pi f)^2 \right] \mathcal{F} \left(U_1 \cdot \frac{1}{m} \exp \left[i \frac{k}{2} \frac{(1-m)}{d} r_1^2 \right] \right) \right\}, \quad (5)$$

式中: δ_1 和 δ_2 分别表示 CGH 面和探测面处的采样间隔, $m = \delta_2/\delta_1$ 。根据菲涅耳衍射的采样要求和计算机的计算能力,仿真所采用的采样点数为 $N \times N = 1024 \times 1024$,采样间隔为 $\delta_1 = 30.78 \mu\text{m}$, $\delta_2 = 13.5 \mu\text{m}$ 。

根据以上计算方法,得到 U_2 的幅值分布如图 2(c)所示(实际计算的是正方形区域,但是除了图中所示矩形区域外,其他区域的强度都为 0), ± 1 级衍射产生的主光斑位于 $(\pm 3 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ 处,此外,还

存在 4 个较强的衍射光斑和无规律的干扰光。对于波前探测而言,人们希望只保留 ± 1 级主光斑,消除其他衍射光。假设在焦面处放置一个掩模板,该掩模板的透过率 M 如图 2(d)所示,其在以两个主光斑为中心、半径 $R = 2R_0$ (R_0 表示在探测面处激光的衍射极限)的两个圆形小孔内的透过率为 1,其他区域的透过率为 0。经过掩模板后焦面处的激光复振幅变为 $U'_2 = U_2 \cdot M$ 。这是理想衍射效果,然而,实际上如果真的要放置这样一个掩模板,既要使掩

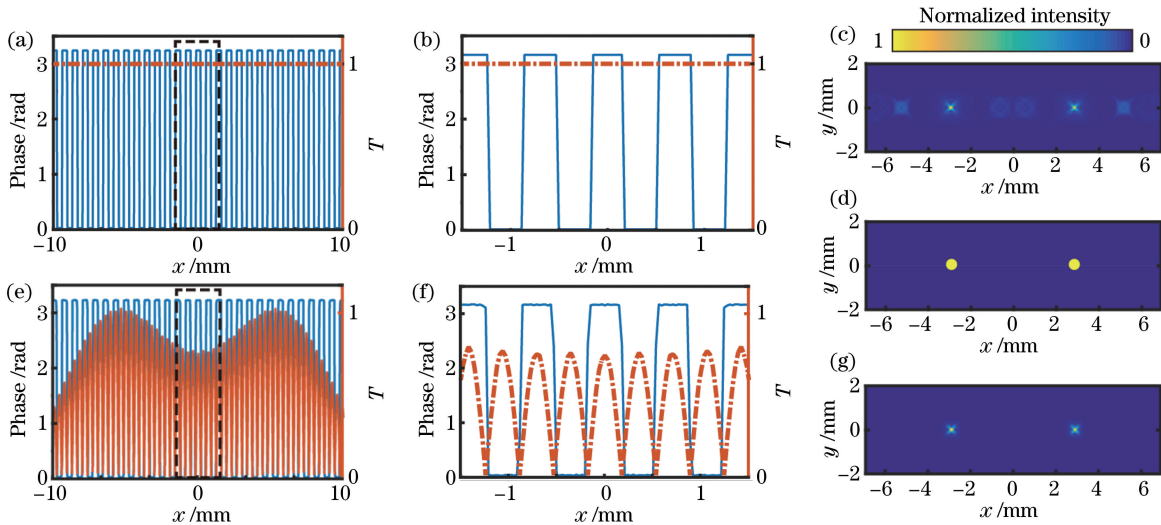


图 2 单模 BPCGH 强度全息模板设计。(a)单模二元相位型 CGH 的相位延迟和透过率分布曲线;(b)图 2(a)中虚线框内曲线放大图;(c)图 2(a)所示 BPCGH 的衍射效果图;(d)探测面前添加的虚拟掩模板的透过率图(圆形区域透过率为 1,其他区域透过率为 0);(e) H' 的透过率和相位延迟分布曲线;(f)图 2(e)中虚线框内曲线的放大显示;(g)复透过率为 H'' 的 BPCGH 的衍射光强度图

Fig. 2 Design of intensity hologram for single-mode BPCGH. (a) Phase delay and transmissivity of single mode binary phase CGH; (b) zoomed display of dotted squared curve in Fig. 2(a); (c) diffracted light intensity of CGH on detection plane; (d) transmissivity map of virtual mask on detection plane (transmissivity is 1 at circle areas and 0 at other area); (e) phase delay and transmissivity curves of H' ; (f) zoomed display of dotted squared curves in Fig. 2(e); (g) diffracted light intensity of BPCGH with complex transmissivity of H''

模板上小孔直径足够小,又要保证小孔位置与衍射光斑严格重合,这是难以实现的。假设可以通过修改 BPCGH 的复透过率 H 来使焦面上的激光振幅分布仍为 U'_2 。修改后的复振幅 U_1 变成 U'_1 , 满足: $U'_2 = g(U'_1, \lambda, \delta_1, \delta_2, d)$ 。

仍然利用角谱法来计算 U'_1 , 只是将激光从探测面逆向传播到 BPCGH 处, 则有 $U'_1 = g(U'_2, \lambda, \delta_2, \delta_1, -d)$, 根据 U'_1 就可以计算出新的 CGH 复透过率: $H' = \frac{U'_1}{U_0 L}$ 。

通过以上方法得出新的 CGH 相位和强度的透过率函数如图 2(e)、(f)所示。

对比 H' 和 H 可以发现, H' 与 H 的相位分布只有在高频有微弱差异, 整体相差不大。而 H' 幅值分布则变为马鞍形包络的周期分布的尖峰函数。若忽略 H' 与 H 相位分布上的微弱差异, 可以将其表达式写成如下形式:

$$H' \approx H \cdot \Delta H \equiv H'', \quad (6)$$

式中: ΔH 为 H' 的强度分量, 是一个实函数; H'' 相当于在原相位全息板的基础上又增加了一个强度全息板, 而该强度全息板等效地在探测面处产生一个只允许衍射主光斑透过的虚拟掩模板。以 H'' 替代原来的 H , 并重新计算出探测面上激光能

量分布, 如图 2(g) 所示, 可以看出, 衍射结果与设想一致, 除了 ± 1 级两个主衍射光斑以外, 所有干扰光都被滤掉。这说明, 对于单模 BPCGH 而言, 可以通过增加强度全息板的方式实现对探测面处干扰光的抑制。

3.2 多模复合 BPCGH

多模复合 BPCGH 是由多个单模 CGH 以特定算法复合而成^[15, 26, 29-31]。本文考虑使用叠加算法得到多模复合 BPCGH, 即通过将多个不同 Zernike 像差的单模连续相位型 CGH 线性相加后再进行归一化和二值化处理得到^[26]。图 3(a) 显示的是一个多模复合 BPCGH 的衍射效果, 其 5 个载频分别携带了 Z_4 、 Z_5 、 Z_6 、 Z_7 、 Z_8 5 个模式的偏置像差。该 BPCGH 的相位分布如图 3(a) 左上角所示, 是一个复杂的二维图案。与单模 BPCGH 衍射效果类似, 多模 BPCGH 在探测面上除了产生各个模式的主衍射光斑以外, 也会产生大量干扰光, 只是随着模式的增加, 干扰光斑也变得更多, 它们不仅包括每一个模式本身的高阶衍射, 还包括不同模式之间串扰形成的新衍射光斑。从图 3(b) 中的强度曲线可以看出, 干扰光几乎遍布整个成像区域, 其强度可达主光斑的 15%。

按照单模 BPCGH 强度全息板的设计方法,同样先设计探测面处的虚拟掩模板。掩模板的透过率如图 3(c) 右上角所示,在每一个主光斑处都有一个圆孔,圆孔半径 $R=2R_0$,其他位置不透光。以透过该掩模板后的激光复振幅分布为衍射结果,逆向计

算出的强度全息图如图 3(c) 左下角所示。可以看出,强度全息图也变成一个复杂的二维图案。图 3(c)、3(d) 是增加强度全息板后 BPCGH 的衍射结果。与单模 BPCGH 类似,除了主光斑以外,所有干扰光都被有效滤除。

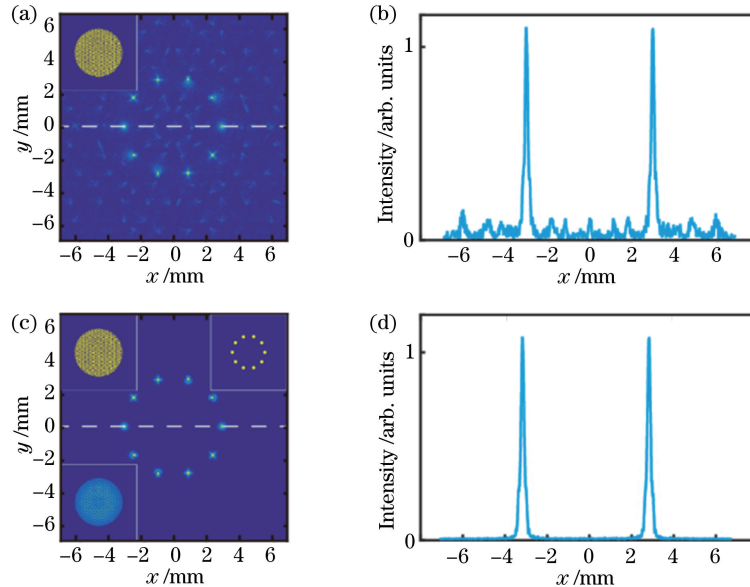


图 3 多模复合 CGH 的衍射效果。(a) 多模复合的二元相位型 CGH 的衍射效果图,左上角为 CGH 的相位图;(b) 图 3(a) 中虚线对应的归一化强度;(c) 增加了强度全息板后 CGH 的衍射效果图,左上角为新的 CGH 的相位分量,左下角为 CGH 的强度分量,右上角为虚拟的掩模板透过率图;(d) 图 3(c) 中虚线对应的归一化强度

Fig. 3 Diffraction effect of multimode composite CGH. (a) Diffraction result of multimode composite binary phase CGH (top left inset of Fig. 3(a) is phase map of CGH); (b) normalized intensity along dotted line in Fig. 3(a); (c) diffraction result of CGH in Fig. 3(a) with additional intensity hologram (top left inset is phase map of new CGH, left bottom inset is intensity of new CGH, and top right inset is virtual mask transmittance); (d) normalized intensity along dotted line in Fig. 3(c)

强度全息板的作用相当于一个可调的小孔,在滤除干扰光的同时不可避免地会降低信号光的透过率。信号光的透过率受小孔直径的影响,孔径越大,信号光的透过率越高,对干扰光的过滤效果越差。在 $R=2R_0$ 的情况下,信号光的透过率约为 40%,而干扰光的透过率约为 1%,即通过增加强度全息板,可以使探测信噪比提高 40 倍。

4 分析与讨论

需要指出的是,强度全息图是根据虚拟掩模板后的激光复振幅计算得出的,计算结果同时受激光强度信息和相位信息的影响。因此需将设计的强度全息图与相应的相位全息图相结合才能产生掩模板的效果,若相位全息图发生了变化,强度全息图也需要重新设计。

这种强度全息板产生的虚拟掩模板与真实掩模

板不完全一样。如图 4 所示,设计的虚拟掩模板孔径越大,其效果越接近真实掩模板,根据需要可以设计出任意形状的虚拟掩模板。而随着虚拟掩模板孔径的减小,其效果逐渐偏离真实掩模板,当其孔径接近 0 时,它对干扰光的过滤效果逐渐失效,这是因为随着孔径的减小,虚拟掩模板效果趋近于一个均匀衰减片。图 4(b)、(c)、(d) 中的孔径分别为 $0.5R_0$ 、 $2R_0$ 、 $8R_0$ 。

以上数值模拟都是建立在二元相位型 CGH 基础上的,该方法是否适用于连续相位型 CGH 也是一个值得研究的问题。如图 5 所示,对于一个单模的连续相位 CGH,其相位延迟是一个正弦分布的曲线,其强度透过率仍然为 1。该 CGH 的衍射效果与二元相位型 CGH 不同,除了主衍射光斑和干扰光斑以外,还出现了一个很强的 0 级衍射光斑。当用同样的方法为其设计强度全息板后,其衍射效果如

图 5(f) 所示, CGH 虽然能对零级衍射和干扰光起到一定的衰减作用, 但并不能完全滤除掉这些干扰光, 并且还会产生新的干扰光。根据复透过率 H' , 可得其相位分布的周期仍与 H 相同, 但却不再是正弦曲线, 而是变成了矩形曲线, (6) 式不再适用, 因此不能通过仅增加一个强度全息板的方法来产生虚拟

掩模板。通过多次仿真发现, 根据 U'_2 计算得到的 H' 的相位总是一个与原 H 周期相同、幅值接近的矩形曲线, 而二元相位型 CGH 的相位分布正好与之契合, 因此, 只需要增加强度全息板就可以产生虚拟的掩模板, 但其他相位分布形式的 CGH 则不适用于此方法。

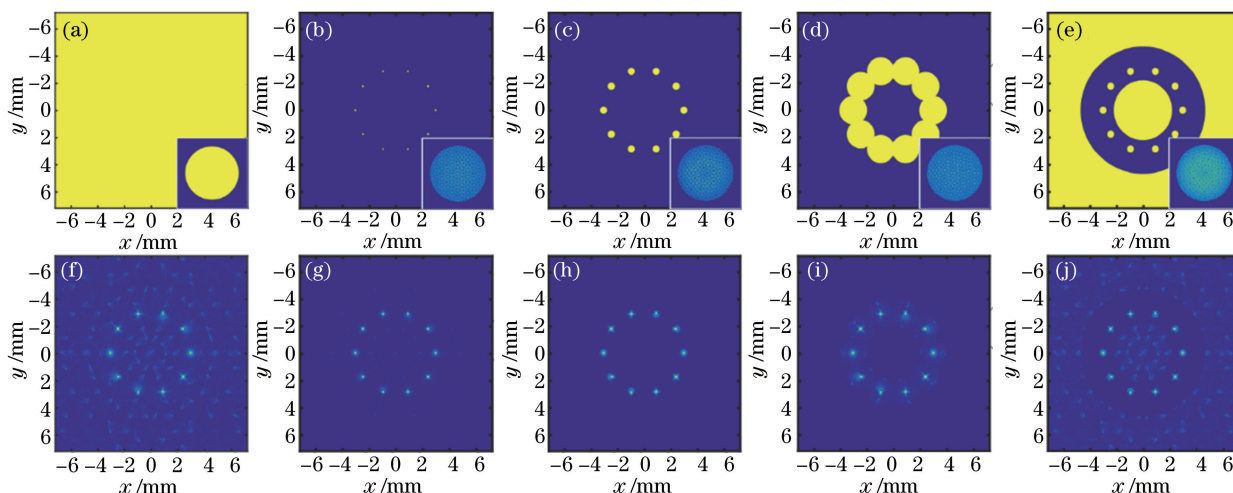


图 4 不同虚拟掩模板的衍射效果图。(a)~(e) 不同掩模板及计算得到的强度全息图(右下角); (f)~(j) 添加了相应强度全息板后的衍射光强度图

Fig. 4 Diffraction effect of various virtual masks. (a)–(e) Various virtual masks and corresponding intensity holograms (lower right inset); (f)–(j) diffraction light intensity of BPCGH with additional intensity hologram

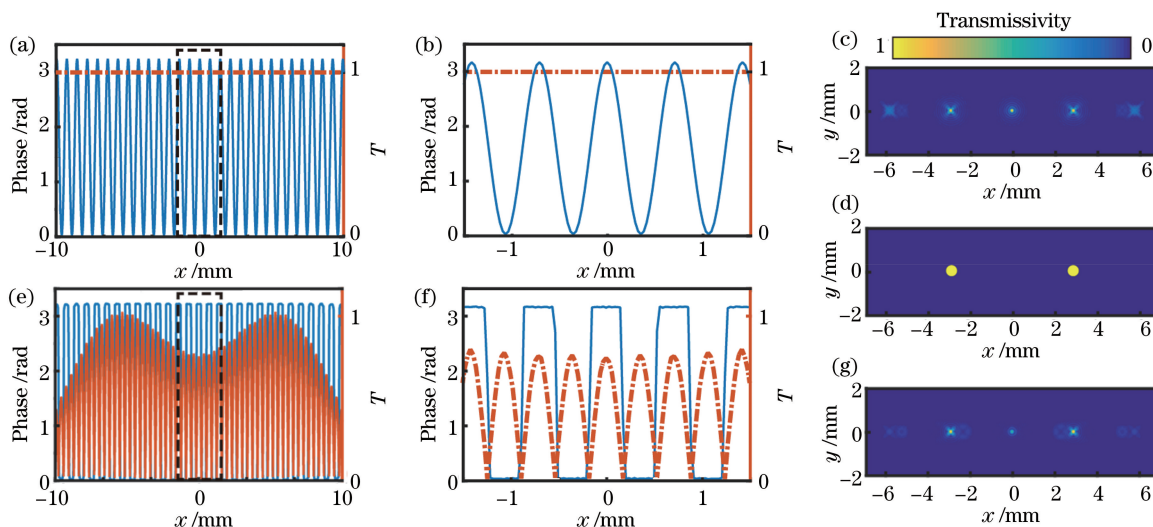


图 5 单模连续相位型 CGH 的强度调制效果。(a) 单模连续相位型 CGH 的相位延迟和透过率分布曲线; (b) 图 5(a) 中虚线框内曲线的放大显示; (c) CGH 在探测面上的衍射强度图; (d) 探测面前添加的虚拟掩模板的透过率图; (e) H' 的透过率和相位延迟分布曲线; (f) 图 5(e) 中虚线框内曲线的放大显示; (g) 复透过率为 H'' 的 CGH 的衍射光强度图

Fig. 5 Intensity modulation effect of single-mode continuous phased CGH. (a) Phase delay and transmissivity curves of single mode continuous phased CGH; (b) zoomed display of curve in dotted square in Fig. 5(a); (c) diffraction intensity of CHG at detection plane; (d) transmissivity of virtual mask before detection plane; (e) transmissivity and phase delay curves of H' ; (f) zoomed curves in dotted square in Fig. 5(e); (g) diffraction light intensity of CGH with complex transmissivity of H''

5 结 论

提出了一种消除二元相位型全息元件多级衍射的方法,通过专门设计的强度全息板,在探测面处产生一个任意形状的虚拟空间过滤器,以保证有用的光通过的同时过滤掉无用的干扰光。在多模复合的全息模式波前传感器中,该技术可以有效滤除衍射主光斑以外的所有干扰光,提高波前探测的测量精度。

参 考 文 献

- [1] Lutomirski R F, Yura H T. Propagation of a finite optical beam in an inhomogeneous medium [J]. Applied Optics, 1971, 10(7): 1652-1658.
- [2] Casperson L W. Gaussian light beams in inhomogeneous media[J]. Applied Optics, 1973, 12(10): 2434-2441.
- [3] Murty M V R K. A compact radial shearing interferometer based on the law of refraction [J]. Applied Optics, 1964, 3(7): 853-857.
- [4] Platt B C, Shack R. History and principles of shack-hartmann wavefront sensing[J]. Journal of Refractive Surgery, 2001, 17(5): S573-S577.
- [5] Bates W J. A wavefront shearing interferometer[J]. Proceedings of the Physical Society, 1947, 59(6): 940-950.
- [6] Murty M V R K. The use of a single plane parallel plate as a lateral shearing interferometer with a visible gas laser source[J]. Applied Optics, 1964, 3(4): 531-534.
- [7] Murty M V R K, Hagerott E C. Rotational: shearing interferometry[J]. Applied Optics, 1966, 5(4): 615-619.
- [8] Roddier F. Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics [J]. Applied Optics, 1988, 27(7): 1223-1225.
- [9] Ragazzoni R, Diolaiti E, Vernet E, et al. A pyramid wavefront sensor with no dynamic modulation [J]. Optics Communications, 2002, 208(1/2/3): 51-60.
- [10] Smartt R N, Steel W H. Theory and application of point-diffraction interferometers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1975, 14(S1): 351-356.
- [11] Dyrud P, Andersen G. Fast holographic wavefront sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6215: 62150I.
- [12] Neil M A A, Booth M J, Wilson T, et al. New modal wave-front sensor: a theoretical analysis [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2000, 17(6): 1098-1107.
- [13] Neil M A A, Booth M J, Wilson T, et al. Closed-loop aberration correction by use of a modal Zernike wave-front sensor [J]. Optics Letters, 2000, 25(15): 1083-1085.
- [14] Andersen G, Austin P G, Gaddipati R, et al. Fast, compact, autonomous holographic adaptive optics [J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9432-9441.
- [15] Ghebremichael F, Andersen G P, Gurley K S, et al. Holography-based wavefront sensing [J]. Applied Optics, 2007, 47(4): A62-A69.
- [16] Andersen G P, Dussan L C, Ghebremichael F, et al. Holographic wavefront sensor [J]. Optical Engineering, 2009, 48(8): 085801.
- [17] Maurer C, Schwaighofer A, Jesacher A, et al. Suppression of undesired diffraction orders of binary phase holograms [J]. Applied Optics, 2008, 47(22): 3994-3998.
- [18] Kovalev M S, Krasin G K, Odinokov S B, et al. Measurement of wavefront curvature using computer-generated holograms [J]. Optics Express, 2019, 27(2): 1563-1568.
- [19] Boruah B R, Love G D, Neil M A A, et al. Interferometry using binary holograms without high order diffraction effects [J]. Optics Letters, 2011, 36(12): 2357-2359.
- [20] Zhou T T, Han C. Speckle noise suppression in three-dimensional phase-only holographic display [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1209001. 周婷婷, 韩超. 三维纯相位全息显示中的散斑噪声抑制 [J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1209001.
- [21] Mishra S K, Bhatt R, Mohan D, et al. Differential modal Zernike wavefront sensor employing a computer-generated hologram: a proposal [J]. Applied Optics, 2009, 48(33): 6458-6465.
- [22] Kodatskiy B, Kovalev M, Malinina P, et al. Fourier holography in holographic optical sensors [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10002: 100020K.
- [23] Ren Z B, Lin Y M. Progress in optical scanning holography [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111009. 任振波, 林彦民. 光学扫描全息术研究进展 [J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111009.
- [24] Gorelaya A, Kovalev M, Malinina P, et al. Advanced holographic wavefront sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10233: 102330Z.
- [25] Bhatt R, Mishra S K, Mohan D, et al. Direct amplitude detection of Zernike modes by computer-generated holographic wavefront sensor: modeling and simulation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(6): 428-439.
- [26] Liu C H, Xi F J, Ma H T, et al. Modal wavefront

- sensor based on binary phase-only multiplexed computer-generated hologram [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(27): 5117-5124.
- [27] Liu C F, Jiang Z F. Holographic modal wavefront sensor: theoretical analysis and simulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(s2): 147-152.
刘长海, 姜宗福. 全息模式波前传感器理论分析及数值模拟[J]. *中国激光*, 2009, 36(s2): 147-152.
- [28] Schmidt J D. Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLAB [M]. Bellingham: SPIE, 2010.
- [29] Mendlovic D. Double-multiplexed computer-generated holograms [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(20): 3887-3890.
- [30] Dai E W, Zhou C H, Xi P, et al. Multifunctional double-layered diffractive optical element [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(17): 1513-1515.
- [31] Gillet J N, Sheng Y L. Multiplexed computer-generated hologram with polygonal apertures [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(2): 298-307.