

## 像面数字全息物体像的完整探测及重建

李俊昌<sup>1,2</sup>, 桂进斌<sup>1,2\*</sup>, 宋庆和<sup>1</sup>, 夏海廷<sup>1,2</sup>, 王晓诗<sup>1</sup>, 鞠钦宇<sup>1</sup>, 吴佳雪<sup>1</sup>, 彭雨笛<sup>1</sup><sup>1</sup>昆明理工大学理学院物理系, 云南昆明 650500;<sup>2</sup>云南省土木工程防灾重点实验室, 云南昆明 650500

**摘要** 像面数字全息检测是相干光成像的一种重要应用。然而,由于相干传递函数的空间滤波作用,故当成像系统出射光瞳尺寸较小时,电荷耦合器件(CCD)不能探测到完整的像光场。同时,利用目前流行的只能计算像光场振幅分布的理论,不能重建便于光学检测的具有振幅和相位分布的像光场。基于相干光成像理论的分析,提出了一种设计特定照明光的方法,让光学系统能够对物平面检测区完整成像。将物体照明光的全息图与所提方法结合,可以重建便于实际检测的理想像光场。

**关键词** 全息; 衍射计算; 相干光成像; 数字全息

中图分类号 O438.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1309001

## Complete Detection and Reconstruction of Object Image in Image Plane Digital Holography

Li Junchang<sup>1,2</sup>, Gui Jinbin<sup>1,2\*</sup>, Song Qinghe<sup>1</sup>, Xia Haiting<sup>1,2</sup>, Wang Xiaoshi<sup>1</sup>, Ju Qinyu<sup>1</sup>, Wu Jiaxue<sup>1</sup>, Peng Yudi<sup>1</sup><sup>1</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China;<sup>2</sup>Yunnan Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Kunming 650500, Yunnan, China

**Abstract** Image plane digital holographic detection is an important application of coherent light imaging. However, due to the spatial filtering of coherent transfer function, charge coupled device (CCD) cannot detect the complete image light field when the exit pupil size of the imaging system is small. Moreover, using the current popular theory that the amplitude distribution of the image light field can only be calculated, the image light field with amplitude and phase distribution which is convenient for optical detection can not be reconstructed. A method of designing specific illumination light is proposed based on the analysis of coherent light imaging theory. Using the proposed method, the object plane detection area can be complete imaging by optical system. By combining the hologram of object illumination light with the proposed method, the ideal image light field which is convenient for practical detection can be reconstructed.

**Key words** holography; diffraction calculation; coherent light imaging; digital holography

## 1 引言

随着计算机数值处理技术和光学成像理论研究的进步,计算成像在近年来成为一个研究热点。现在,科技工作者不再局限于相干光场的传统标量衍射理论和非相干光场的几何光学描述,计算成像从相干成像与非相干成像这两个极端逐步进入部分相干成像这一更广阔的领域<sup>[1]</sup>。在该领域的研究中,经典的标量衍射理论和几何光学理论起着重要的桥梁作用,相干光照

明条件下的近似成像公式<sup>[2-3]</sup>作为重要理论依据被广泛引用。例如,在基于部分相干光发光二极管(LED)阵列照明的傅里叶叠层显微成像的计算研究中<sup>[4-5]</sup>,将光学系统视为线性空间不变系统,将出射光瞳定义的传递函数视为理想像频谱的低通滤波器。然而,Goodman<sup>[3]</sup>的研究指出,近似公式是在对单透镜成像系统脉冲响应作近似后导出的,只能在物体尺寸小于光学系统入射光瞳直径的1/4时计算像光场的振幅分布。因此,引用该近似公式的部分相干光成像的理论

收稿日期: 2021-11-18; 修回日期: 2021-12-24; 录用日期: 2022-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(62065010,62165007,61565011)

通信作者: jinbingui@163.com

研究还需要进一步深化。如果能够建立一个可以准确计算像光场振幅和相位分布的公式,并将其合理地用于部分相干光的成像运算中,理论上应该能够获得更接近实际的结果。

事实上,采用文献[3]中的研究方法,不对单透镜成像系统的脉冲响应作近似,可以导出能够准确计算像光场复振幅的公式<sup>[6]</sup>。同时,将经典的标量衍射理论与几何光学相结合,还能导出由 $2 \times 2$ 光学矩阵描述的轴对称光学系统的成像公式<sup>[7]</sup>。在按照文献[6-7]导出的成像公式中,相干光成像系统不再是线性空间不变系统,出射光瞳定义的传递函数不再是理想像频谱的低通滤波器,而是理想像经过特定距离菲涅耳衍射的空间滤波器<sup>[8]</sup>。

当理论研究获得进步时,通常能解决应用研究中曾经存在的问题。然而,本文不直接对部分相干光成像进行讨论,而是将能够计算像光场振幅和相位分布的公式用于相干光照明的像面数字全息中,为目前还存在的一些悬而未决的问题的研究提供有益的参考。

像面数字全息是相干光成像在光学精密检测中的一个重要应用,记录全息图的影像传感器电荷耦合器件(CCD)[或互补金属氧化物半导体(CMOS)]的记录窗口宽度通常不超过10 mm。当被测物体尺寸相对CCD窗口较小或较大时,为能获取物体检测区域的像,通常采用显微物镜或光学变焦系统将检测物体的像放大或缩小到CCD探测面上。然而,当成像系统出射光瞳尺寸较小时,传递函数会部分阻断理想像衍射场的空间角谱,不能得到完整的物体像<sup>[9]</sup>。由于检测区域的完整成像是实现检测的先决条件,故通过理论研究,让光学系统的传递函数能够充分传递理想像衍射场的空间角谱,进而获得检测区域的完整像,是应用研究中必须解决的问题。

此外,为提高像面数字全息的测量精度,长期以来,人们通过不同形式的结构光照明物平面进行过许多出色的研究<sup>[10-11]</sup>,可以让重建像的振幅分辨率突破非相干光照明时的瑞利分辨极限。然而,具有一定振幅和相位分布的结构光照明物平面后,必然会改变检测区的振幅和相位,进而在像平面上引入不利于检测的振幅和相位干扰。因此,消除这种干扰是长期以来需要解决问题。

由于现如今仅计算像光场振幅分布的主流理论较

难被用于对振幅和相位均敏感的数字全息研究中,故 Horstmeyer 等<sup>[12]</sup>基于近似成像理论撰文,建议科技工作者能建立一种根据像面数字全息图获得具有振幅和相位分布,且便于实际检测的理想像的数学方法。同时,针对实验观测中发现的相干光成像系统不是线性空间不变系统的问题,提出了改进相干光成像分辨率的建议,进而能提供一种辐射式分辨率板——“西门子星”在像平面不同区域的图像。然而,基于近似成像公式准确获取理想像复振幅的数学方法仍有待研究,近年来关于改进相干光成像分辨率的报道仍然只给出了像平面特定区域的振幅图像<sup>[10-11]</sup>。

对于文献[12]提出的两个研究课题:由于文献[6]或[7]导出的公式已经表明相干光成像系统不是线性空间不变系统,故可以利用公式计算像平面不同区域的图像;对于改进像光场分辨率的研究,理论上已经解决“西门子星”在像平面上不同区域成像质量不一的计算问题。因此,只对另一课题进行研究。为让研究具有一般性,本文针对的是出射光瞳较小且不能对物平面检测区完整成像的光学系统。研究结果表明,对于给定的成像系统,可以设计具有特定波面半径的球面波照明物平面,不但能获得检测区域完整像的数字全息图,而且在引入照明物光的全息图后,可以消除照明物光的干扰,可较好地重建满足数字全息检测需要的像光场。该方法还可以推广至结构光照明的实时数字全息检测中。

本文首先介绍照明物光的设计方法,然后建立利用检测物全息图和照明物光全息图重建理想像的方法。最后,采用双透镜成像的离轴数字全息实验系统进行实验证明。

## 2 相干光成像理论和照明物光的优化设计

在直角坐标系 $o-xyz$ 中,设成像系统光轴与 $z$ 轴重合。光学系统能由 $2 \times 2$ 元素的光学矩阵 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 描述。 $U_0(x, y)$ 是平面波照明情况下物平面光波场的复振幅, $P(x, y)$ 是系统的出射光瞳, $d_{pi}$ 为出射光瞳到像平面的距离,引入二维傅里叶变换和逆变换符号 $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 和 $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$ ,计算像光场振幅和相位分布的表达式为

$$U(x, y) = \exp\left[\frac{jk}{2d_{pi}}(x^2 + y^2)\right] \times \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\left[-\frac{1}{A}U_0\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right)\exp\left[j\frac{k}{2}\left(\frac{C}{A} - \frac{1}{d_{pi}}\right)(x^2 + y^2)\right]\right] \times P(-\lambda d_{pi} f_x, -\lambda d_{pi} f_y)\right\}, \quad (1)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢大小; $\lambda$ 为光波长; $A$ 为像的横向放大率; $f_x, f_y$ 为频率空间坐标; $P(-\lambda d_{pi} f_x, -\lambda d_{pi} f_y)$ 为传递函数。

在成像系统的相关参数给定后,对式(1)进行计算的步骤依次为:1)计算式中的傅里叶变换;2)变换结果与传递函数 $P(-\lambda d_{pi} f_x, -\lambda d_{pi} f_y)$ 相乘;3)对相乘结

果进行傅里叶逆变换;4)傅里叶逆变换结果与等号右边相位因子相乘。

$-\frac{1}{A}U_0\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right)$ 是理想像,根据理论和实验研究,步骤 1)结束后传递函数的作用类似于理想像经过距离为  $d = \left(\frac{C}{A} - \frac{1}{d_{\text{pi}}}\right)^{-1}$  的非涅耳衍射的空间滤波器。

当出射光瞳尺寸较小时,从步骤 2)的计算结果中可以发现理想像的“角谱”传播受到大量阻断,经过步骤 3)

和步骤 4)的计算后,  $U_0(x, y)$  不能完整成像<sup>[9]</sup>。

然而,若照明物光是波面半径为  $R$  的球面波  $\exp\left[j\frac{k}{2R}(x^2 + y^2)\right]$ , 则理想像变为

$$U_i(x, y) = -\frac{1}{A}U_0\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right)\exp\left[j\frac{k}{2RA^2}(x^2 + y^2)\right], \quad (2)$$

此时式(1)可写为

$$U(x, y) = \exp\left[\frac{jk}{2d_{\text{pi}}}(x^2 + y^2)\right] \times \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\left[-\frac{1}{A}U_0\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right)\exp\left[\frac{jk}{2}\left(\frac{1}{RA^2} + \frac{C}{A} - \frac{1}{d_{\text{pi}}}\right)(x^2 + y^2)\right]\right\} \times P(-\lambda d_{\text{pi}}f_x, -\lambda d_{\text{pi}}f_y)\right\}, \quad (3)$$

若令  $\frac{1}{RA^2} + \frac{C}{A} - \frac{1}{d_{\text{pi}}} = 0$ , 则可得

$$R = \frac{d_{\text{pi}}}{A^2 - Cd_{\text{pi}}A}. \quad (4)$$

此时,式(3)可写为

$$U(x, y) = \exp\left[\frac{jk}{2d_{\text{pi}}}(x^2 + y^2)\right] \times \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\left[-\frac{1}{A}U_0\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right)\right]P(-\lambda d_{\text{pi}}f_x, -\lambda d_{\text{pi}}f_y)\right\}. \quad (5)$$

一般情况下,出射光瞳是轴对称的,当满足式(4)的球面波照明物平面时,传递函数  $P(-\lambda d_{\text{pi}}f_x, -\lambda d_{\text{pi}}f_y)$  变为几何光学理想像频谱的低通滤波器。按照频谱分析理论,光学系统所成的像是损失物体频谱中高频分量的完整物像。

令无照明物体的物光场为  $E_0(x, y)$ , 理想像则变为  $-\frac{1}{A}U_0\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right)E_0\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right)$ , 式(1)可以重新写为

$$U_E(x, y) = \exp\left[\frac{jk}{2d_{\text{pi}}}(x^2 + y^2)\right] \times \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\left[-\frac{1}{A}U_0\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right)E_0\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right)\exp\left[j\frac{k}{2}\left(\frac{C}{A} - \frac{1}{d_{\text{pi}}}\right)(x^2 + y^2)\right]\right\} \times P(-\lambda d_{\text{pi}}f_x, -\lambda d_{\text{pi}}f_y)\right\}, \quad (6)$$

取出物平面物体,像平面上可以得到照明物光的像,其表达式为

$$E(x, y) = \exp\left[\frac{jk}{2d_{\text{pi}}}(x^2 + y^2)\right] \times \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\left[-\frac{1}{A}E_0\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right)\exp\left[j\frac{k}{2}\left(\frac{C}{A} - \frac{1}{d_{\text{pi}}}\right)(x^2 + y^2)\right]\right\} \times P(-\lambda d_{\text{pi}}f_x, -\lambda d_{\text{pi}}f_y)\right\}. \quad (7)$$

对于出射光瞳足够大的无像差系统,  $P(-\lambda d_{\text{pi}}f_x, -\lambda d_{\text{pi}}f_y) \approx 1$  扩束准直系统在邻近光轴的区域中通常是满足的<sup>[8]</sup>。由式(6)、(7)可得

$$U_0\left(\frac{x}{A}, \frac{y}{A}\right) \approx \frac{U_E(x, y)}{E(x, y)}. \quad (8)$$

以上讨论未对  $E_0(x, y)$  进行任何限制,故其可以是有有一定振幅分布和相位分布的照明物光。因此,实验研究中记录检测物体全息图前,先记录下无检测物时照明物光的像全息图。在从两全息图中分别获得

$U_E(x, y)$  和  $E(x, y)$  后,便能利用式(8)重建便于实际测量的像光场。

### 3 实验证明

为证明式(1)的可行性和传递函数的物理意义,曾经利用插入孔径光阑的双透镜相干光成像系统进行过研究<sup>[9]</sup>。研究结果表明,孔径光阑在许多位置不能得到完整的物像。现采用同样的成像系统,引入参考光,形成一个离轴数字全息系统进行实验证明。

图 1 为两透镜  $L_1$ 、 $L_2$  和相关元件构成的像面数字



全息系统,其中SF为扩束准直系统。将 USAF1951 分辨率板作为物平面,波长为 532 nm 的激光经扩束和准直后,通过分束镜BS1成为沿光轴传播的平面波以照明物体,物光通过有孔径光阑的双透镜成像系统和

分束镜BS2后在影像传感器 CCD 的探测平面成像。被BS1向上反射的光波经过平面反射镜M1、M2反射后,经BS2反射到达 CCD 形成参考光,参考光与物光干涉的强度图像——数字全息图由 CCD 记录。

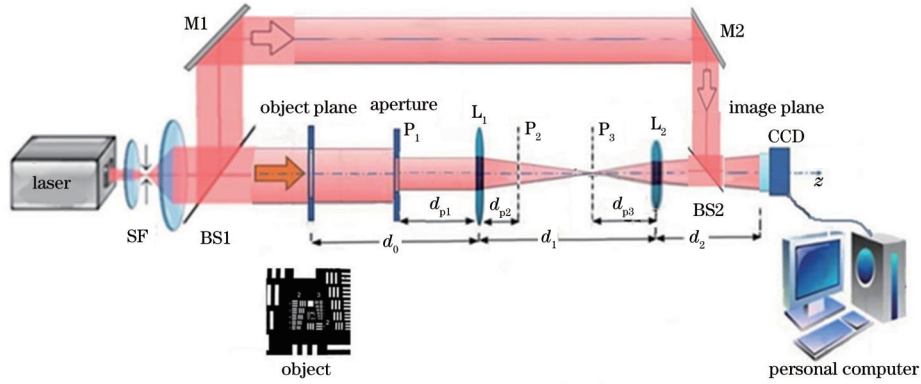


图 1 数字全息实验系统

Fig. 1 Digital holographic experimental system

光学系统的相关参数为:透镜  $L_1$  焦距为  $f_1=300$  mm (孔径为 38 mm),透镜  $L_2$  焦距为  $f_2=150$  mm (孔径为 38 mm),CCD 像素宽度为  $d_c=0.00345$  mm (像素数量为  $1600 \times 1200$ ),物平面与透镜  $L_1$  的距离为  $d_0=280$  mm,透镜  $L_1$  与透镜  $L_2$  的距离为  $d_1=435$  mm。实验时将直径为  $D_h=5.5$  mm 的圆孔光阑分别放在  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  位置,圆孔光阑在  $P_1$  位置时与透镜  $L_1$  的距离为  $d_{p1}=210$  mm,圆孔光阑在  $P_2$  位置时与透镜  $L_1$  的距离为  $d_{p2}=80$  mm,圆孔光阑在  $P_3$  位置时与透镜  $L_2$  的距离为  $d_{p3}=135$  mm,图 1 是圆孔光阑放在  $P_1$  位置时的示意图。

根据上述参数,图 1 中物平面到 CCD 探测平面的光学系统光学矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

将相关参数代入上式,注意成像系统满足  $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} =$

$\begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 1/A \end{bmatrix}$ ,得到  $d_2=155$  mm,并且

$$\begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 1/A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.5017 & 0 \\ -3.333 \times 10^{-4} & -1.9933 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

即横向放大率为  $A=-0.5017$ 。

在实验研究中,首先用式(4)计算光阑放在  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  位置的照明球面波的波面半径  $R$ ,然后在物体前插入一焦距为 400 mm,直径为 93 mm 的透镜,通过沿光轴平移透镜改变该透镜焦点在光轴上的位置,实现计算值为  $R$  的球面波照明物平面。研究表明,当光阑放置在  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  每一位置时,与理论值  $R$  邻近的一段区域内的照明球面波均能得到完整的像。例如,对于位置  $P_2$ ,理论计算的  $R$  为  $-389$  mm,但透镜放在物体前 150 mm 处,即让  $R=-250$  mm 也能得到完整的像,这无疑为实际应用提供了方便。为便于理论分析,利用 CCD 中央  $1200 \times 1200 (N \times N)$  的像素形成边宽为  $L_i=Nd_c=4.14$  mm 的方形区进行研究。图 2 是光阑放置在位置  $P_2$  情况下使用平面波照明和球面波照明时 CCD 测量像的强度图像。为比较图像细节,将每幅图中央区域矩形框内的图像放大图置于左侧。不难看出,在采用球面波照明后,不但能让物平面观测区完整成像,而且图像细节的强度和分辨率还有所提高。

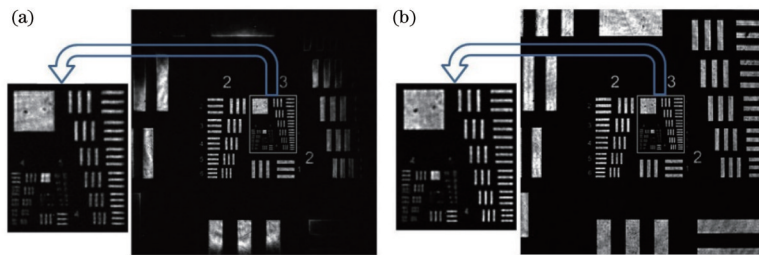


图 2 光阑在位置  $P_2$  情况下使用平面波照明和球面波照明时 CCD 实验测量图像比较。(a)平面波照明;(b)球面波照明

Fig. 2 Comparison of CCD experimental measurement images of plane wave illumination and spherical wave illumination when aperture is at position  $P_2$ . (a) Plane wave illumination; (b) spherical wave illumination

基于光学系统传递函数的物理意义进行定量研究,可以得到照明光的波面半径不准确满足式(4)的理论值时却仍然能够完整成像的原因,现以图2实验为例进行研究。

图3(a)、(b)分别是平面波照明情况下式(1)的理论模拟像和 CCD 实验测量像。按照几何光学成像理论或文献[9]的讨论,位置  $P_2$  情况下出射光瞳到像平面的距离为  $d_{pi} \approx -104.73$  mm, 出射光瞳直径为  $D_{pi} \approx 4.024$  mm。式(1)计算中频谱平面宽度为  $N/L_1 \approx 289.85$   $\text{mm}^{-1}$ , 在频谱平面的传递函数的直径为  $D_{pi}/(\lambda d_{pi}) \approx 64.01$   $\text{mm}^{-1}$ , 按照这个数值,图3(c)给出

了式(1)中傅里叶变换获得的频谱振幅图像和圆环示的传递函数。由于带相位因子的理想像的傅里叶变换类似于理想像经过特定距离的非涅耳衍射,传递函数只允许通过圆环内非0区域的“角谱”,如图3(d)所示。实际所成之像是损失了非0区域外“角谱”的不完整像,如图3(a)、(b)所示。由于放置的光瞳中心不在光轴上,故为能让理论与实验相吻合,图3中所有模拟是在光阑中心坐标为  $x=0, y=-0.05$  mm 的情况下完成的。该模拟表明,对于任意给定的孔径光阑,式(1)均能较好地完成像光场复振幅的计算。

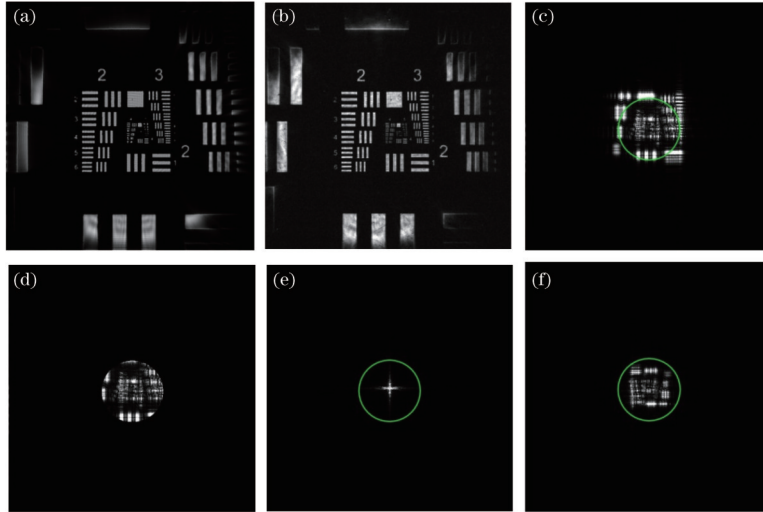


图3 光阑在  $P_2$  位置时的相关研究图像。(a)平面波照明模拟像的强度图像(4.14 mm×4.14 mm);(b)平面波照明 CCD 探测图像(4.14 mm×4.14 mm);(c)平面波照明时带二次相位因子的理想像频谱振幅图像(289.85  $\text{mm}^{-1}$ ×289.85  $\text{mm}^{-1}$ );(d)平面波照明时传递函数传递的频谱振幅图像(289.85  $\text{mm}^{-1}$ ×289.85  $\text{mm}^{-1}$ );(e)  $R=-389$  mm 时理想像频谱振幅图像(289.85  $\text{mm}^{-1}$ ×289.85  $\text{mm}^{-1}$ );(f)  $R=-250$  mm 时理想像频谱振幅图像(289.85  $\text{mm}^{-1}$ ×289.85  $\text{mm}^{-1}$ )

Fig. 3 Relevant research images when aperture is at  $P_2$  position. (a) Intensity image of plane wave illumination simulation image (4.14 mm×4.14 mm); (b) plane wave illumination CCD detection image (4.14 mm×4.14 mm); (c) spectrum amplitude image of ideal image with quadratic phase factor under plane wave illumination (289.85  $\text{mm}^{-1}$ ×289.85  $\text{mm}^{-1}$ ); (d) spectrum amplitude image transmitted by transfer function under plane wave illumination (289.85  $\text{mm}^{-1}$ ×289.85  $\text{mm}^{-1}$ ); (e) spectrum amplitude image of ideal image when  $R = -389$  mm (289.85  $\text{mm}^{-1}$ ×289.85  $\text{mm}^{-1}$ ); (f) spectrum amplitude image of ideal image when  $R = -250$  mm (289.85  $\text{mm}^{-1}$ ×289.85  $\text{mm}^{-1}$ )

当采用波面半径  $R=-389$  mm 的球面波照明物体时,按照式(5)和 USAF1951 分辨率板的结构,理想像的频谱是中心有极大值、在横向和纵向有丰富数值的频谱,传递函数的非0区相当于频谱的低通滤波器,如图3(e)所示,所成之像必然是损失了高频分量的完整像。当  $R=-250$  mm 时,式(3)中  $\frac{1}{RA^2} + \frac{C}{A} - \frac{1}{d_{pi}} = 0.0057$   $\text{mm}^{-1}$ ,带二次相位因子的理想像的频谱与理想像经过距离  $d = \left( \frac{1}{RA^2} + \frac{C}{A} - \frac{1}{d_{pi}} \right)^{-1} \approx -176$  mm 的非涅耳衍射场相似,但传递函数的非0区能够充分透过非涅耳衍射场对应的频谱,如图3(f)所示,重建损失了少量高频“角谱”的完整像,如图2(b)所示。

用  $R=-250$  mm 的球面波  $E_0(x, y) = \exp\left[\frac{jk}{2R}(x^2 + y^2)\right]$  照明物平面。利用式(6)进行理论模拟后,图4(a)、(b)分别给出理论模拟和数字全息图实验重建像光场的相位分布。很明显,虽然 CCD 能够探测到完整像,但是像的相位分布并不是 USAF1951 分辨率板的等相位,不能进行对相位敏感的数字全息检测。

引入照明物光的像全息图,基于式(8)进行的理论模拟和实验获得的理想像光场的相位分布如图4(c)、(d)所示。对于实际的 USAF1951 分辨率板,由于可能存在微纳级别的分辨率板厚度变化,以及记录两次全息图的时间范围内照明物光、参考光和实验环境的轻微变化等原因,故实验测量的透射光相位分布会出现轻微的不均匀,这种不均匀在一定程度上体现了这

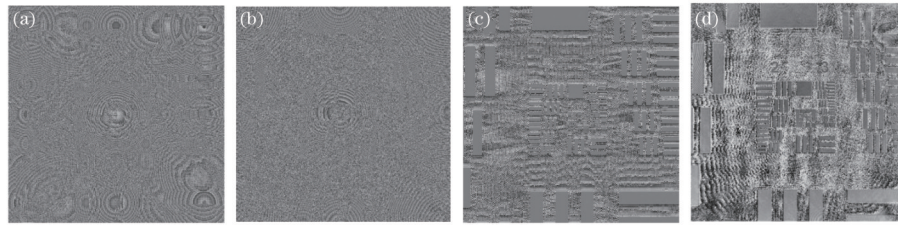


图 4 光阑在  $P_2$  位置时球面波照明重建像的理论模拟和实验测量图像(图像宽度为 4.14 mm)。(a)模拟全息图的重建像相位;(b)实验全息图的重建像相位;(c)模拟理想像相位;(d)实验重建的理想像相位

Fig. 4 Theoretical simulation and experimental measurement images of spherical wave illumination reconstructed image when aperture is at  $P_2$  position (image width is 4.14 mm). (a) Reconstructed image phase of simulated hologram; (b) reconstructed image phase of experimental hologram; (c) phase of analog ideal image; (d) phase of ideal image reconstructed by experiment

些物理量的轻微变化。因此,图 4(d)可以被视为式(8)效果较好的实验证明。

回顾式(8)的推导过程可知,对于出射光瞳足够大的无像差系统式(8)才是成立的。实验研究中发现,对于出射光瞳较小而用平面波照明,CCD 不能探测到完整像的情况,引入平面波照明的空场全息图,仍然可以

较好地再像平面中心区域重建理想像光场。图 5 给出了光阑在  $P_2$  位置时的理论模拟和实验重建像,这无疑为只对物平面中心区检测感兴趣的应用研究提供了方便。这个实验结果也可以被视为像光场表达式[式(1)]中邻近光轴的区域中  $P(-\lambda d_{pi} f_x, -\lambda d_{pi} f_y) \approx 1$  的一个实验证明。

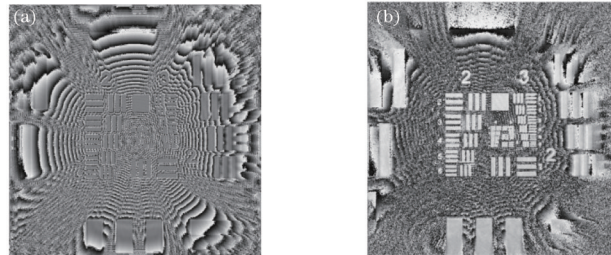


图 5 光阑在  $P_2$  位置时平面波照明重建像的理论模拟和实验测量图像(图像宽度为 4.14 mm)。(a)模拟理想像的重建像相位;(b)实验理想像的重建像相位

Fig. 5 Theoretical simulation and experimental measurement images of plane wave illumination reconstructed image when aperture is at  $P_2$  position (image width is 4.14 mm). (a) Reconstructed image phase of simulated ideal image; (b) reconstructed image phase of experimental ideal image

为验证理论分析,图 2~5 中的实验是人为地在成像系统中引入孔径光阑完成的,如果不引入这个光阑,任意给定的成像系统始终存在尺寸有限的出射光瞳。当不能实现检测区域的完整成像时,以上讨论仍然适用。

本文的研究可以推广至动态数字全息检测中。按照式(8),在检测系统调整好后,只要先记录下没有放入物体时的照明物光的全息图,放入物体后便能实现变化物的动态检测。此外,为提高显微数字全息像光场振幅的分辨率,近年来人们采用不同形式的结构光照明进行了大量出色的研究。然而,在数字全息检测中,像光场的振幅和相位通常是同等重要的物理量,分析式(6)可知,结构光照明通常引入像光场的相位畸变。希望本文的工作能为消除结构光照明引入的像光场相位畸变提供有益的参考。

## 4 结 论

目前流行的相干光成像计算公式只能在物体尺寸小于入射光瞳直径 1/4 时近似计算像光场的振幅分

布,不能准确地成为与振幅和相位相关的相干光照明与部分相干光照明的光学成像研究的理论依据。基于像光场复振幅的计算公式,建立了不受入射或出射光瞳尺寸影响并对物平面观测区完整成像的方法。将该方法用于像面数字全息中,提出了利用照明光和实物的全息图重建像光场振幅和相位分布的数学方法,并给出了实验证明。研究成果可以被推广至对动态物的实时数字全息检测中。

## 参 考 文 献

- [1] 张润南,蔡泽伟,孙佳嵩,等. 光场相干测量及其在计算成像中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 1811003.  
Zhang R N, Cai Z W, Sun J S, et al. Optical-field coherence measurement and its applications in computational imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811003.
- [2] (德)马科斯·玻恩,(美)埃米尔·沃耳夫. 光学原理[M]. 7 版. 杨葭荪,译. 北京: 电子工业出版社, 2006.  
Born M, Wolf M. Principles of optics[M]. 7th ed. Yang



- X S, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2006.
- [3] (美) Joseph W. Goodman. 傅里叶光学导论[M]. 4 版. 陈家璧, 秦克诚, 曹其智, 译. 北京: 科学出版社, 2020. Goodman J W. Introduction to Fourier optics[M]. 4th ed. Chen J B, Qin K C, Cao Q Z, Transl. Beijing: Science Press, 2020.
- [4] 张芬, 周业倩, 尤栖冲, 等. 加权切趾传递函数约束的傅里叶叠层显微成像[J]. 光学学报, 2021, 41(4): 0411001. Zhang F, Zhou Y Q, You X C, et al. Fourier ptychographic microscopy based on a weighted apodized transfer function constraint[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 0411001.
- [5] 王阳, 张美玲, 王宇, 等. 部分相干光照明的数字全息显微技术及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 1811005. Wang Y, Zhang M L, Wang Y, et al. Partially coherent illumination-based digital holographic microscopy and its applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811005.
- [6] 李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京: 科学出版社, 2002. Li J C. Calculation of diffraction and thermal effects of laser[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [7] 李俊昌, 熊秉衡. 信息光学教程[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2017. Li J C, Xiong B H. Information optics tutorial[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2017.
- [8] 李俊昌, 罗润秋, 彭祖杰, 等. 相干光成像系统传递函数的物理意义及实验证明[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1207001. Li J C, Luo R Q, Peng Z J, et al. Physical significance and experimental proof of transfer function in coherent optical imaging systems[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1207001.
- [9] 李俊昌, 彭祖杰, 桂进斌, 等. 傍轴光学系统的相干光成像计算[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(20): 2011001. Li J C, Peng Z J, Gui J B, et al. Calculation of coherent light imaging in paraxial optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(20): 2011001.
- [10] Li S H, Ma J, Chang C L, et al. Phase-shifting-free resolution enhancement in digital holographic microscopy under structured illumination[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 23572-23584.
- [11] Balasubramani V, Tu H Y, Lai X J, et al. Adaptive wavefront correction structured illumination holographic tomography[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 10489.
- [12] Horstmeyer R, Heintzmann R, Popescu G, et al. Standardizing the resolution claims for coherent microscopy[J]. Nature Photonics, 2016, 10(2): 68-71.