

# 合成孔径数字无透镜傅里叶变换全息图的分幅再现

姜宏振 赵建林 邸江磊 秦川 闫晓博 孙伟伟

(西北工业大学理学院光信息技术研究所, 陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要** 在对合成孔径数字全息图通过分幅数值重建的过程中,数值重建平面中心的改变将会影响子全息图再现像的位置及相位分布,进而会对最终得到的合成数值再现像的质量产生不利影响。针对合成孔径数字无透镜傅里叶变换全息图,在理论分析的基础上,提出了相应的分幅再现算法。根据相应子全息图在合成孔径全息图平面上的位置,给各分幅数值再现像分别乘以相应的相位修正因子后再进行叠加,可得到准确的合成数值再现像。以采用线阵 CCD 推扫获得的大幅面数字无透镜傅里叶变换全息图为例,按照所述方法进行了分幅数值重建实验,获得了高质量的准确合成数值再现像。实验结果与理论分析一致。

**关键词** 合成孔径; 数字全息术; 数字无透镜傅里叶变换全息图; 相位修正因子

**中图分类号** TBB77 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3304

## Reconstruction of Synthetic Aperture Digital Lensless Fourier Transform Hologram by Use of the Screen-Division Method

Jiang Hongzhen Zhao Jianlin Di Jianglei Qin Chuan Yan Xiaobo Sun Weiwei

(*Institute of Optical Information Science and Technology, Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China*)

**Abstract** During the numerical reconstruction process of synthetic aperture hologram by use of screen-division method, the center change of the digital reconstruction plane will influence the positions and the phase distributions of the corresponding reconstructed images from the sub-holograms, which will affect the quality of the synthetic numerical reconstruction image. For synthetic aperture digital lensless Fourier transform hologram, a screen-division reconstruction method is proposed based on theoretical analysis. It is pointed out that, in order to get the accurate synthetic numerical reconstruction image, the sub-reconstructed images should multiply with the phase correction factor according to the position of the corresponding sub-holograms on the synthetic aperture hologram plane and then be superposed. Taking the digital lensless Fourier transform hologram with large area acquired by use of linear CCD push-broom technology as example, the screen-division numerical reconstruction experiment is conducted according to the proposed method, and accurate synthetic numerical reconstruction image with high quality is acquired. The experimental result is consistent with the theoretical analysis.

**Key words** synthetic aperture; digital holography; digital lensless Fourier transform hologram; phase correction factor

## 1 引 言

合成孔径技术是一种在无需增加单个设备(系统)难度和复杂性的情况下,能够明显提高成像质量的方法,因而在航空、航天、天文、水声传感、雷达、遥感等技术领域得到了广泛应用。现有 CCD 较小的

靶面面积和较大的像素尺寸限制了其所能记录的物场范围和频带宽度,因而提高数字全息系统的分辨率和信噪比,增大其所能记录和再现的物场范围,是当前数字全息术需要解决的关键问题<sup>[1~4]</sup>。合成孔径技术是解决这一问题的一个有效途径<sup>[5~7]</sup>,其通

收稿日期: 2009-01-07; 收到修改稿日期: 2009-02-13

基金项目: 航空科学基金(2006ZD53042)资助课题。

作者简介: 姜宏振(1984—),男,博士研究生,主要从事数字全息技术方面的研究。E-mail: jianghz2003@sina.com

导师简介: 赵建林(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事光信息技术有应用等方面的研究。

E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号:O404206575)

过多幅全息图拼接或者孔径合成增大了数字全息图的记录面积,因而能够有效地增大数字全息系统所能记录和再现的物场范围。相应的数值重建方法主要有直接再现与分幅再现两种,通过直接再现方式对合成孔径数字全息图进行数值再现,其优点是重建得到的大面积物场具有较高的分辨率,不足之处在于,当由子全息图拼接得到的合成数字全息图的幅面较大时,数值计算过程会受到计算机处理能力的限制而无法进行。此时可采取分幅再现方法,其做法是首先将合成数字全息图分割成若干一定幅面大小的子全息图,并对各子全息图分别进行数值重建,然后再将各相应再现像准确地进行复振幅叠加以得到合成再现像。这样可以有效减小参与运算的全息图的幅面面积,使得对于超出计算机处理能力的大幅面合成孔径数字全息图的数值重建变为可能。但是,在分幅再现过程中,需要考虑数值重建平面中心的改变对相应子全息图再现像位置和相位分布的影响。本文理论分析数字无透镜傅里叶变

换全息图的分幅再现过程<sup>[8~18]</sup>,提出相应的再现算法,并利用该方法,对采用线阵 CCD 推扫获得的大幅面合成孔径数字无透镜傅里叶变换全息图<sup>[19]</sup>,进行数值重建,得到了准确的高质量合成数值再现像,证明了本文理论分析和所提出算法的正确性。

## 2 原 理

### 2.1 合成孔径数字无透镜傅里叶变换全息图的记录

图 1 显示了合成孔径数字无透镜傅里叶变换全息图的记录过程。设物平面  $O$  和全息图记录平面  $H$  分别位于  $x_0y_0$  和  $xy$  平面,两平面间距为  $d$ ,用波长为  $\lambda$  的平行光垂直照明半透明物体,其透射光场复振幅为  $O_0(x_0, y_0)$ ,参考点光源位于  $x_0y_0$  平面上  $R(-a, -b)$  点,通过在记录平面上横向平移 CCD 而采集多幅全息图,经拼接得到合成孔径数字全息图。由菲涅耳衍射积分可得全息图记录平面上的物光波复振幅分布为

$$u(x, y) = \frac{1}{j\lambda d} \exp(jkd) \exp\left[j \frac{k}{2d}(x^2 + y^2)\right] \mathcal{F}\left\{O_0(x_0, y_0) \exp\left[j \frac{k}{2d}(x_0^2 + y_0^2)\right]\right\} = C \exp\left[j \frac{k}{2d}(x^2 + y^2)\right] U(f_x, f_y), \quad (1)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $C = \exp(jkd)/j\lambda d$  为常数因子;  $f_x = x/\lambda d$ ,  $f_y = y/\lambda d$  分别为物光波在全息图平面上沿  $x, y$  方向的空间频率;  $U(f_x, f_y) = \mathcal{F}\{O_0(x_0, y_0) \exp[jk(x_0^2 + y_0^2)/2d]\}$ ;  $\mathcal{F}\{\}$  表示二维傅里叶变换运算。参考光波在记录平面上的复振幅分布为

$$r(x, y) = R_0 \exp\left[j \frac{k}{2d}(x^2 + y^2 + 2ax + 2by)\right] = R_0 \exp\left[j \frac{k}{2d}(x^2 + y^2)\right] \exp[j2\pi(f_x a + f_y b)], \quad (2)$$

由此得记录平面上物光与参考光的叠加强度为

$$I(x, y) = uu^* + R_0^2 + CR_0 U(f_x, f_y) \exp[-j2\pi(f_x a + f_y b)] + C^* R_0 U^*(f_x, f_y) \exp[j2\pi(f_x a + f_y b)]. \quad (3)$$

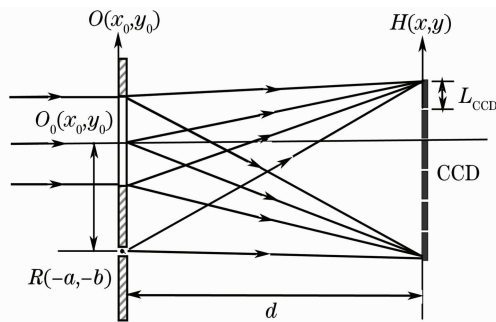


图 1 合成孔径数字无透镜傅里叶变换全息图的记录过程

Fig. 1 Recording process of synthetic aperture digital lensless Fourier transform hologram

### 2.2 合成孔径数字无透镜傅里叶变换全息图的分幅再现过程分析

图 2 为合成孔径数字无透镜傅里叶变换全息图分幅再现过程示意图,其中图 2(a)和图 2(b)分别显示了合成孔径数字全息图的数值重建平面与子全息图  $I_1$  的数值重建平面。设合成孔径数字全息图  $I$  的中心为  $A$ ,子全息图  $I_1$  的中心为  $B$ , $A$  相对于  $B$  在  $x$  和  $y$  方向上的偏移量分别为  $K$  和  $L$ 。当对合成孔径数字全息图  $I$  进行再现时,数值重建平面的中心为  $A$  点;而当对子全息图  $I_1$  进行数值再现时,数值重建平面的中心为  $B$  点。为了得到准确的合成数值再现像,需要考虑各子全息图数值重建平面中心的改变对相应子全息图再现像位置以及相位分布的影响。

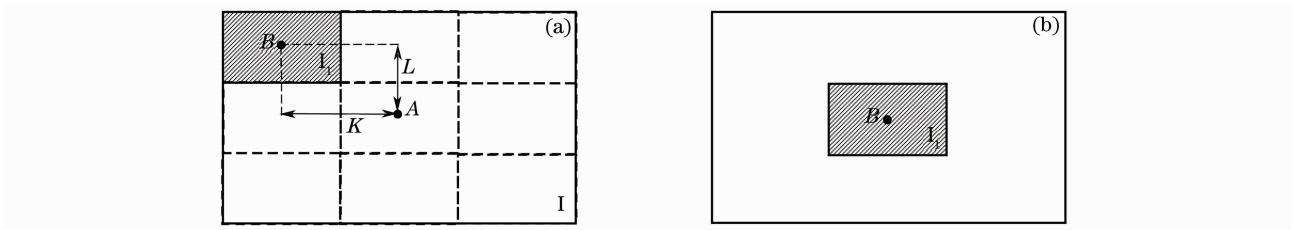


图2 合成孔径数字无透镜傅里叶变换全息图分幅再现过程。(a)合成孔径数字全息图数值重建平面；  
(b)子数字全息图数值重建平面

Fig. 2 Reconstruction process of synthetic aperture digital lensless Fourier transform hologram based on screen division method. (a) Numerical reconstruction plane of synthetic aperture digital hologram; (b) numerical reconstruction plane of sub-hologram

数字无透镜傅里叶变换全息图记录的是物空间的频谱,故数值重建平面位于频域,相应的重建像平面为空域。分幅再现过程中,子全息图数值重建平面中心的改变,相当于对其所记录的相应物空间频谱中心在频域的位移。根据傅里叶变换的相移性质,频域的位移导致空域相移,因此,子全息图数值重建平面中心的改变,不会影响各子全息图的数值再现像的位置,但会使相应再现像的相位分布发生变化。若对分幅重建得到的各子全息图再现像场复振幅进行直接叠加,则各子全息图的再现像场虽然不会发生彼此间的错位叠加,但错误的相位叠加信息会影响合成数值再现像的细节质量。故而需要对由各子数字全息图得到的再现像场复振幅,通过乘以相应的相位修正因子后再进行叠加,才能得到正确的合成数值再现像。

### 2.3 子数字全息图再现像的相位修正

根据傅里叶变换的线性性质,对合成孔径数字全息图整体通过数值重建得到的重建物场的复振幅,等于全息图各部分在各自原位通过数值重建得到的物场复振幅之线性叠加。设对子全息图在原位直接数值重建得到的物场复振幅为  $u_i$ ,各子全息图分别单独经数值再现得到的物场复振幅为  $u_f$ ,则由于受到数值重建平面中心位置改变的影响, $u_f$  与  $u_i$  之间存在相位差异。因此,必须对  $u_f$  进行相位修正,使之能准确代表  $u_i$ 。在数值重建像平面  $O'(x',y')$  上,令

$$u_0(x',y') = O_0(x',y') \exp[jk(x'^2 + y'^2)/2d]$$

则通过分幅重建获得的子全息图  $I_1$  的数值再现像  $u_f$  与合成孔径数字全息图平面上  $I_1$  对应的再现像分量  $u_i$  分别为

$$u_f = \mathcal{F}^{-1} \{ CR_0 U(f_x - f_k, f_y - f_L) \exp\{-j2\pi[(f_x - f_k)a + (f_y - f_L)b]\} \} = CR_0 \exp[j2\pi(f_k a + f_L b)] \mathcal{F}^{-1} \{ U(f_x - f_k, f_y - f_L) \exp[-j2\pi(f_x a + f_y b)] \} = CR_0 \exp[j2\pi(f_k x' + f_L y')] u_0(x' - a, y' - b), \quad (4)$$

$$u_i = \mathcal{F}^{-1} \{ CR_0 U(f_x, f_y) \exp[-j2\pi(f_x a + f_y b)] \} = CR_0 u_0(x' - a, y' - b), \quad (5)$$

因此  $u_i$  和  $u_f$  之间关系为

$$u_i = u_f \exp[-j2\pi(f_k x' + f_L y')] = u_f \exp[-j2\pi(f_k m \Delta x' + f_L n \Delta y')], \quad (6)$$

式中  $\mathcal{F}^{-1}\{\}$  表示二维逆傅里叶变换运算; $f_k = K/\lambda d$ ,  $f_L = L/\lambda d$ ,分别为全息图平面上横向和纵向的频移量; $m, n$  分别表示数值重建像平面上  $x$  和  $y$  方向的空间域采样数且满足:  $-M/2 \leq m \leq M/2$ ,  $-N/2 \leq n \leq N/2$ ;  $\Delta x' = \lambda d/M \Delta x_H$ ,  $\Delta y' = \lambda d/N \Delta y_H$ ,分别为相应方向的空间域采样间隔; $\Delta x_H, \Delta y_H$  分别为全息图在  $x$  和  $y$  方向上的像素尺寸。

对子数字全息图  $I_1$  的数值再现像  $u_f$  乘以(6)式所示的相位修正因子  $\exp[-j2\pi(f_k m \Delta x' + f_L n \Delta y')]$  后,即可得到合成孔径数字全息图平面上

该子全息图相应的再现像分量  $u_i$ 。进而对修正后的各个再现像分量进行叠加,就可以得到准确的合成数值再现像。

### 2.4 合成孔径数字全息图的分幅处理

为了得到清晰的合成数值再现像,需要使各子全息图再现像场的分辨率大于物空间的最高频谱。在记录距离和记录波长一定的条件下,再现像场的分辨率主要由全息图的幅面大小所决定。在分幅重建过程中,为了使得全息图的分割处理以及后续数值计算过程具有一致性,可以将合成孔径数字全息

图首先分割为若干幅面大小相等的子全息图,在此基础上,对各子全息图进行适当的补零操作以调整各子再现像的分辨率<sup>[20]</sup>,从而得到清晰的合成数值再现像。为使补零操作不影响子全息图再现像的相位分布,从而得到正确的合成数值再现像,需要保证补零前后子全息图平面的中心不变。如图 3 所示,设子全息图的原始像素数目为  $M_1 \times N_1$ ,补零后的像素数目为  $M_2 \times N_2$ ,此时再现像的像素尺寸为

$$\Delta x' = \frac{\lambda d}{M_2 \Delta x_H}, \Delta y' = \frac{\lambda d}{N_2 \Delta y_H}, \quad (7)$$

可见,经过补零操作,使得物空间的最高频谱  $f_{\max} \leq 1/2\Delta x'$ ,且满足  $\Delta x' = \Delta y'$ ,此时即可得到无畸变的清晰再现像。

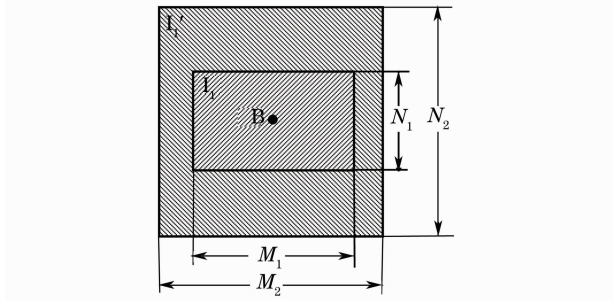


图 3 子数字全息图的补零调整

Fig. 3 Zero-padding operation for sub-hologram

### 3 实验研究

实验中取待测样品为 2# 鉴别率板(尺寸为  $0.4 \text{ cm} \times 0.4 \text{ cm}$ ,第 25 级条纹周期为  $10 \mu\text{m}$ ),CCD 靶面到物体之间距离  $d = 14 \text{ cm}$ ,记录波长为  $632.8 \text{ nm}$ 。图 4 显示了大幅面数字无透镜傅里叶变换全息图的分割处理过程,其中图 4(a)为通过线阵 CCD 推扫方式获得的像素数目为  $5000 \times 5000$  (水平像素  $\times$  垂直像素),像素尺寸为  $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$  的原始数字全息图,沿图中虚线方向将其分割成像素数目为  $2500 \times 2500$  (水平像素  $\times$  垂直像素)的 4 幅子数字全息图 A,B,C,D。由计算知,此时再现像场的分辨率小于物空间的最高频谱,为了得到清晰的再现像,分别对每幅子数字全息图按照图 3 所示进行补零处理,得到如图 4(b)~(e)所示的 4 幅补零子数字全息图,其像素数目均为  $3000 \times 3000$  (水平像素  $\times$  垂直像素),分别与子数字全息图 A,B,C 及 D 相对应。补零后每幅子全息图再现像的像素尺寸  $\Delta x'$  为  $4.2 \mu\text{m}$ ,满足关系  $f_{\max} \leq 1/2\Delta x'$ 。

图 5 为对子补零全息图的分幅重建结果。其中图 5(a)~(d)显示的数值重建结果分别与图 4(b)~(e)对应。

可以看出,由分幅得到的子全息图重建像场的范围有限,因此需要将由各子数字全息图重建得

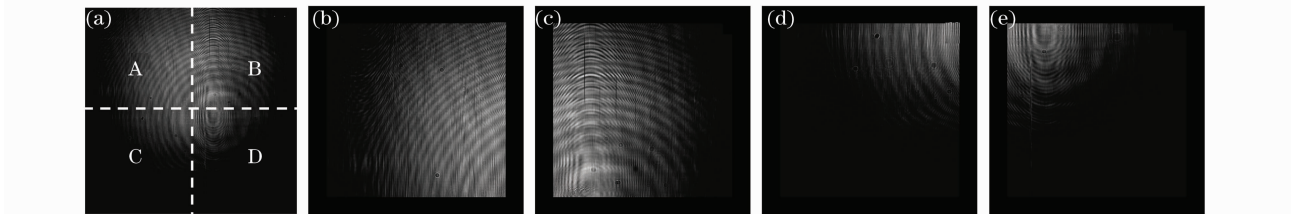


图 4 合成孔径数字全息图分割处理过程。(a)原始数字全息图;(b)~(e)图(a)中 A,B,C,D 各区域的补零子数字全息图  
Fig. 4 Division process of synthetic aperture digital hologram. (a) Original digital hologram; (b)~(e) appending-zeros digital hologram of area A, B, C and D in Fig. (a)

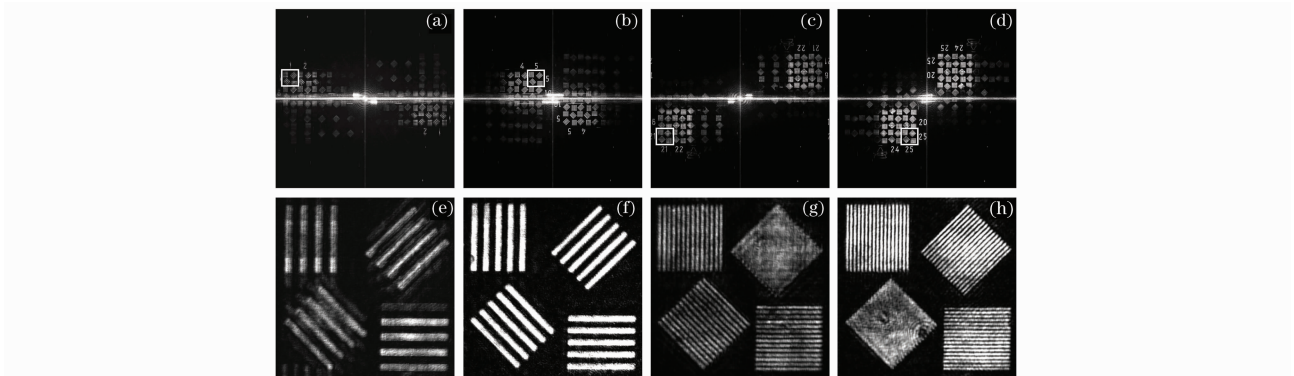


图 5 子数字全息图的分幅重建结果。(a)~(d)图 4(b)~(e)的数值重建结果;(e)~(h)图(a)~(d)中标记区域的放大像  
Fig. 5 Reconstruction results of sub-holograms. (a)~(d) Reconstruction results of Fig. 4(b)~(e); (e)~(h)magnifications of the marked area in (a)~(d)

到的像场进行叠加才能得到被记录物体的完整再现像。图 5(e)~(h)分别为对图 5(a)~(d)中标记区域的放大结果。由于图 5(e)和图 5(f)中的重建像场为物场中的低频成分,其衍射光所对应的所有频谱成分均能够被相应的子数字全息图所记录,因此可以得到清晰的再现像;图 5(g)和图 5(h)中的重建像场为物场中的高频成分,其某些方向的衍射光所对应的频谱成分不能被相应的子数字全息图所记录,因此重建像场中有一部分信息不能得到清晰再现,需要将其与包含该频谱成分的子数字全息图的重建像场进行叠加,才能够得到清晰的再现像。

图 6 为各子全息图再现像的合成叠加结果。其中图 6(a)为直接将各子全息图数值再现像的强度相加所得到的合成数值再现像;图 6(b)为将各子数字全息图数值再现像的复振幅相加后,取其模值所得到的合成数值再现像;图 6(c)为对各子数字全息图数值再现像的复振幅乘以相位修正因子后相加,然后再取其模值所得到的合成数值再现像;图 6(d)为对合成孔径数字全息图直接进行数值重建所得再

现像。图 6(e)~(h)分别对应图 6(a)~(d)中标记区域的放大像。通过比较可以看出,直接对各子全息图数值再现像进行强度或复振幅相加,无助于改善合成数值全息再现像中的细节信息,只有对各子全息图数值再现像的复振幅作相位修正后再相加,才能有效地提高合成数值再现像的质量。上述分幅数值重建实验中,参与运算的子全息图在补零后的幅面面积  $3000 \times 3000$  (水平像素  $\times$  垂直像素) 仅为原始数字全息图幅面面积  $5000 \times 5000$  (水平像素  $\times$  垂直像素) 的 36%, 但却获得了与对原始合成孔径数字全息图直接数值重建所得到的再现像效果。实际应用中,若数字无透镜傅里叶变换全息图具有超大的幅面[例如  $20000 \times 20000$  (水平像素  $\times$  垂直像素)], 则由于受到计算机处理能力的限制几乎不可能采用直接再现方式进行数值重建, 此时更可显示出分幅重建方法的优越性, 如将其等分为若干适当面积的子全息图后分别进行数值重建以得到合成数值再现像。

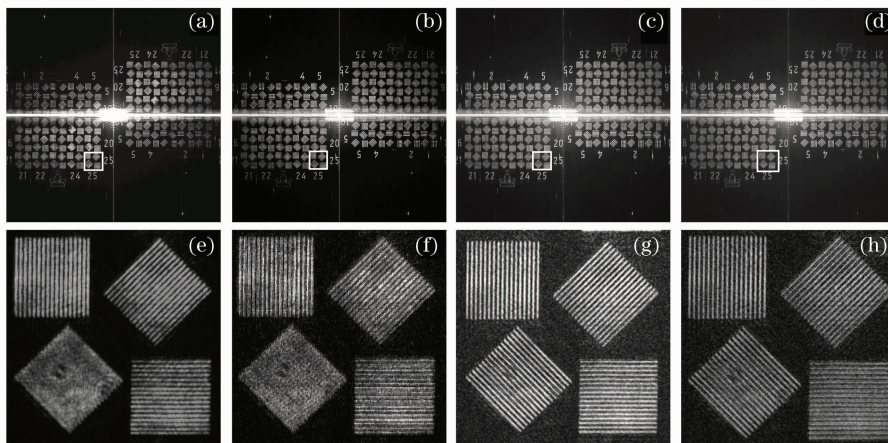


图 6 子数字全息图再现像的合成结果。(a)直接将再现像的强度相加;(b)直接将再现像的复振幅相加;(c)将再现像的复振幅作相位校正后再相加;(d)直接对合成孔径数字全息图的数值再现结果;(e)~(h)图(a)~(d)中标记区域的放大像

Fig. 6 Synthesis result of the reconstruction images of sub-holograms. (a) Directly adding the intensities of the reconstructed images; (b) directly adding the complex amplitudes of reconstructed images; (c) directly adding the complex amplitude of reconstructed images after phase correction; (d) direct reconstruction result of synthetic aperture digital hologram; (e)~(h) magnifications of the marked area in (a)~(d)

## 4 结 论

对合成孔径数字全息图进行分幅重建,可以有效减小参与运算的全息图的幅面面积,使得对于超出计算机处理能力的大幅面合成孔径数字全息图的数值重建变为可能。在理论分析合成孔径数字无透镜傅里叶变换全息图分幅再现过程的基础上,提出了相应的再现算法。在该分幅重建方法中,考虑了数值重建平面中心的改变对相应子全息图数值再现

像位置以及相位分布的影响,同时通过补零操作对因全息图幅面减小而造成的再现像的分辨率的降低进行了一定程度上的补偿,使之能够得到清晰的再现像。以利用线阵 CCD 推扫获得的大幅面合成孔径数字无透镜傅里叶变换全息图为例,采用所述分幅重建方法进行了数值重建,获得了高质量的准确合成数值再现像,证实了本文理论分析和所提出算法的正确性。

## 参 考 文 献

- 1 U. Schnars, WPO. Juptner. Digital recording and numerical reconstruction of holograms [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2002, **13**(9): 85~101
- 2 Y. Zhang, Q. Lü, B. Ge *et al.*. Digital holography and its application [C]. *SPIE*, 2005, **5636**: 200~211
- 3 Di Jianglei, Zhao Jianlin, Fan Qi *et al.*. Phase correction of wavefront reconstruction in digital holographic microscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 56~61  
邸江磊, 赵建林, 范琦等. 数字全息显微术中重建物场波前的相位校正[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 56~61
- 4 Wang Huaying, Wang Guangjun, Zhao jie *et al.*. Imaging resolution analysis of digital holographic microscopy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1670~1675  
王华英, 王广俊, 赵洁等. 数字全息显微系统的成像分辨率分析[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1670~1675
- 5 Jurgen H. Massig. Digital off-axis holography with a synthetic aperture [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(24): 2179~2181
- 6 Zhong liyun, Zhang yimo, Lu xiaoxu. Recording and reconstruction of synthetic aperture digital holography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1207~1211  
钟丽云, 张以谟, 吕晓旭. 合成孔径数字全息的记录、再现及实现[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1207~1211
- 7 Zhong liyun, Zhang yimo, Lu xiaoxu. Synthetic aperture digital holography and multiple reference wave synthetic aperture digital holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1343~1347  
钟丽云, 张以谟, 吕晓旭. 合成孔径数字全息的模拟及多参考光合成孔径数字全息[J]. *光子学报*, 2004, **33**(11): 1343~1347
- 8 C. Wagner, S. Seebacher, W. Osten *et al.*. Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(22): 4812~4820
- 9 S. Takao, S. Yoneyama, M. Takashi. Minute displacement and strain analysis using lensless Fourier transformed holographic interferometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, **38**(5): 233~244
- 10 D. Dirksen, H. Droste, B. Kemper *et al.*. Lensless Fourier holography for digital holographic interferometry on biological samples [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **36**(3): 241~249
- 11 G. Pedrini, H. J. Tiziani. Short-coherence digital microscopy by use of a lensless holographic imaging system [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4489~4496
- 12 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lv Xiaoxu *et al.*. Analysis of the characteristics about the digital holography of the spherical reference wave [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1209~1213  
钟丽云, 张以谟, 吕晓旭等. 球面参考光波数字全息的一些特点分析及实验[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1209~1213
- 13 Xu Ying, Zhao Jianlin, Xiang Qiang *et al.*. Image processing in numerical reconstruction for lensless Fourier transform hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1503~1506  
徐莹, 赵建林, 向强等. 无透镜傅里叶变换全息图数值再现中的图像处理[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1503~1506
- 14 Lv Xiaoxu, Zhang Yimo, Zhong Liyun *et al.*. Analysis and experiment of phase-shifting coaxial lensless Fourier digital holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1511~1515  
吕晓旭, 张以谟, 钟丽云等. 相移同轴无透镜傅里叶数字全息的分析与实验[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1511~1515
- 15 Yuan Caojin, Zhai Hongchen, Wang Xiaolei *et al.*. Three-dimensional surface contouring of reflecting micro-object by digital holography with short-coherence light source [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(1): 218~223  
袁操今, 翟宏琛, 王晓雷等. 采用短相干数字全息术实现反射型微小物体的三维形貌测量[J]. *物理学报*, 2007, **56**(1): 218~223
- 16 Chujun Zheng, Peng Han, Hongsen Chang. Four-quadrant spatial phase-shifting Fourier transform digital holography for recording of cosine transform coefficients [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(3): 145~147
- 17 Jiang Hongzhen, Zhao Jianlin, Di Jianglei *et al.*. Correction of nonparaxial and misfocus aberrations in digital lensless Fourier transform holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1457~1462  
姜宏振, 赵建林, 邸江磊等. 数字无透镜傅里叶变换全息术中非傍轴及离焦像差的校正[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1457~1462
- 18 Jianlin Zhao, Hongzhen Jiang, Jianglei Di. Recording and reconstruction of a color holographic image by using digital lensless Fourier transform holography [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(4): 2514~2519
- 19 Jianglei Di, Jianlin Zhao, Hongzhen Jiang *et al.*. High resolution digital holographic microscopy with wide field of view based on synthetic aperture technique and use of linear CCD scanning [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(30): 5654~5659
- 20 Domenico Alfieri, Giuseppe Coppola, Sergio De Nicola. Method for superposing reconstructed images from digital holograms of the same object recorded at different distance and wavelength [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **260**(1): 113~116