

文章编号: 0258-7025(2004)10-1207-05

# 合成孔径数字全息的记录、再现及实现

钟丽云<sup>1,2</sup>, 张以谟<sup>1</sup>, 吕晓旭<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; <sup>2</sup> 昆明理工大学激光研究所, 云南 昆明 650051)

**摘要** 介绍了合成孔径数字全息记录和再现的基本原理,提出了相应的实现方法和技术方案。特别对合成孔径数字全息再现中的两类方法:用单参考光记录的子全息图数字再现光场复振幅叠加或强度叠加,以及用多参考光记录的子全息图数字再现光场复振幅叠加或强度叠加方法进行了详细理论分析和实验研究。结果表明,合成孔径技术是一种提高数字全息再现像的分辨率的有效方法。与传统的子全息图直接拼接的合成孔径数字全息再现方法相比,用子数字全息图再现光场复振幅叠加或强度叠加两种再现方法均可实现合成孔径数字全息的再现,并可显著提高再现像的分辨率,但强度叠加方法的记录和再现难度远小于前者。在实际中可以根据解决问题的要求和子数字全息图的记录情况选用。

**关键词** 全息;数字全息;合成孔径;再现方法;分辨率

**中图分类号** TB 877.1 **文献标识码** A

## Recording and Reconstruction of Synthetic Aperture Digital Holography

ZHONG Li-yun<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi-mo<sup>1</sup>, LÜ Xiao-xu<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> College of Precision Instrument and Opto-electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)  
(<sup>2</sup> Laser Research Institute, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650051, China)

**Abstract** This paper introduces the fundamental principle of the recording and numerical reconstruction of the synthetic aperture digital holography, and proposes two numerical reconstructed methods: one is the numerical reconstructed complex amplitude superposition or intensity superposition from the single reference beam sub-hologram, the other one is the numerical reconstructed complex amplitude superposition or intensity superposition of the multi-reference beams sub-hologram. The experimental research results show: Synthetic aperture technique can improve the resolution of digital holography evidently. Comparing with the conventional numerical reconstructed method of direct combined sub-hologram, the proposed two kinds of numerical reconstructed methods are the same in improving the resolution of reconstructing image of digital holography, but the difficulty of recording and reconstruction of synthetic aperture digital holography by the intensity superposition method is decreased.

**Key words** holography; digital holography; synthetic aperture; reconstructed method; resolution

## 1 引言

提高数字全息系统的分辨率和信噪比,是数字全息术中需要解决的一个关键问题<sup>[1~4]</sup>。合成孔径技术是一种在不大幅度增加单个设备(系统)难度和复杂性情况下,明显提高图像质量的方法,该方法已经在雷达、航空航天、天文、水声传感、遥感等重要领

域得到了广泛的应用<sup>[5,6]</sup>。最近国外已有文献报道将合成孔径技术用于数字全息的研究<sup>[7~9]</sup>,并在提高再现像的分辨率和信噪比方面取得了一些初步成果。本文在介绍合成孔径数字全息记录原理基础上,分析了合成孔径数字全息的复振幅叠加和强度叠加两类再现方法,进行了相应的实验和对比。结果表明用子数字全息图再现光场的复振幅叠加和强

收稿日期:2003-08-25

基金项目:国家自然科学基金(60277032)和云南省自然科学基金(2002F0030M)资助项目。

作者简介:钟丽云(1968—),女,昆明理工大学教授,天津大学博士研究生,主要从事光学全息和位相测量方面的研究。

E-mail:zhongly@public.km.yn.cn

度叠加均可实现合成孔径数字全息的重现,并可显著提高再现像的分辨率。

## 2 合成孔径数字全息的记录与再现原理

### 2.1 合成孔径数字全息图的记录

假设被记录的物体位于  $x_0y_0$  平面,记录全息图的 CCD 成像面位于  $xy$  平面,再现像位于  $x_1y_1$  平面, CCD 与物平面和再现像平面的距离分别为  $Z_0$  和  $Z_1$ (一般情况下,可选择  $Z_1 = Z_0$ ), CCD 光敏面的尺寸为  $L_x \times L_y$ ,记录光波波长为  $\lambda$ ,数字全息的分辨率被定义为<sup>[10]</sup>

$$\Delta x_1 = \lambda Z_1 / L_x \quad \Delta y_1 = \lambda Z_1 / L_y \quad (1)$$

在实际数字全息图的记录中,如果记录光波波长一定,为了满足采样条件和非涅耳近似条件,物体至 CCD 的距离  $Z_0$  不能太小,因此增大 CCD 的横向尺寸  $L_x$ (或  $L_y$ ) 是提高数字全息系统分辨率最有效的手段。

图 1 是合成孔径数字全息的记录原理,通过在记录面上左右、上下移动 CCD 的位置,记录下  $N$  幅子数字全息图。 $N$  幅子数字全息图合成为一幅  $NL_x \times NL_y$  像素的合成数字全息图,用与参考光等模的模拟再现光波进行数字再现时,其分辨率可以达到<sup>[7]</sup>

$$\Delta x_{\text{ISA}} = \lambda Z_1 / NL_x \quad \Delta y_{\text{ISA}} = \lambda Z_1 / NL_y \quad (2)$$

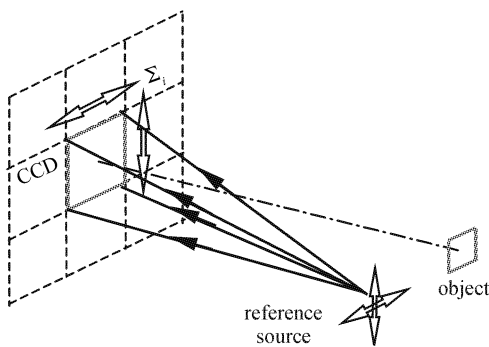


图 1 合成孔径数字全息记录示意图

Fig. 1 Sketch for recording synthetic aperture digital hologram

假设参考点源和记录物体上任意一点的位置坐标分别为  $(x_{R0i}, y_{R0i})$  和  $(x_0, y_0)$ ,在保持所有记录条件不变的情况下,如果 CCD 在第  $i$  个位置记录的区域为  $\Sigma_i$ ,对应区域的物光场和参考光场分别为  $O_{\Sigma_i}$  和  $R_{\Sigma_i}$ ,记录到的子数字全息图为  $I_{\Sigma_i}(x, y)$ ,我们

把所记录的全部子数字全息图合成的数字全息图表示为

$$I(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} I_{\Sigma_i}(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} |O_{\Sigma_i}(x, y, x_0, y_0) + R_{\Sigma_i}(x, y, x_{R0i}, y_{R0i})|^2 = \sum_{i=0}^{N-1} (|O_{\Sigma_i}|^2 + |R_{\Sigma_i}|^2 + O_{\Sigma_i}R_{\Sigma_i}^* + O_{\Sigma_i}^*R_{\Sigma_i}) \quad (3)$$

式中的上标 \* 代表共轭量。

### 2.2 合成孔径数字全息的再现

在普遍情况下,(3)式中的每一幅子数字全息图记录了同一物体不同空间频率的信息,而且每一幅子数字全息图可以用不同的参考光来记录。单幅的数字全息图是在同一时刻记录的,全息图上的各点一般有固定的相位关系,而目前合成孔径数字全息图需要通过移动物体与 CCD 的相对位置,在不同的时刻记录不同的子数字全息图,在此过程中由于各种因素的影响,子数字全息图之间的相位关系会存在一定的随机性,因此除了合理安排记录系统和记录过程外,选择适当的再现方法也是实现合成孔径数字全息的一个重要因素。在传统全息图光学再现中,一般只能观察或记录到再现光场的强度,而数字全息图的数字再现是先计算再现光场各点的复振幅,再求复振幅的模平方得到再现光场各点的强度,因此可以把合成孔径数字全息的再现分为子全息图数字再现光场的复振幅叠加和强度叠加两类共 4 种方法。

#### 2.2.1 基于子全息图数字再现光场复振幅叠加的再现方法

全息技术的特点是可以同时记录物体的强度和相位信息,传统全息技术用光学方法进行再现,使其相位信息的利用受到限制。数字全息技术用数字方法进行再现,首先得到的是再现像的复振幅,可以方便地利用所记录到的相位信息对记录的对象进行进一步的分析,这是数字全息技术最有应用前景的优势之一。因此合成孔径数字全息术应优先选择子全息图数字再现光场复振幅叠加的再现方法,实际上这也是目前通用的数字再现方法。

如果记录时每一幅(或每几幅)子数字全息图采用不同的参考光,再现时需先用与各子数字全息图参考光场对应的模拟再现光进行数字再现,再将各子全息图的数字再现光场的复振幅叠加得到合成孔径数字全息的再现光场,我们称之为多参考光合成孔径数字全息,其再现过程可表示为

$$\begin{aligned}
 A(x_I, y_I) &= \sum_{i=0}^{N-1} I_{\Sigma_i}(x, y) C_{\Sigma_i}(x, y) = \\
 &= \sum_{i=0}^{N-1} |O_{\Sigma_i}(x, y, x_{00}, y_{00}) + R_{\Sigma_i}(x, y, x_{R0i}, y_{R0i})|^2 R_{\Sigma_i}(x, y, x_{R0i}, y_{R0i}) = \\
 &= \sum_{i=0}^{N-1} (|O_{\Sigma_i}|^2 R_{\Sigma_i} + |R_{\Sigma_i}|^2 R_{\Sigma_i} + O_{\Sigma_i} |R_{\Sigma_i}|^2 + O_{\Sigma_i}^* R_{\Sigma_i}^2) = \sum_{i=0}^{N-1} A_{\Sigma_i}(x_I, y_I) \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中  $A(x_I, y_I)$  为总再现光场,  $A_{\Sigma_i}(x_I, y_I)$  为第  $i$  幅子数字全息图数字再现光场的分复振幅,  $C_{\Sigma_i}(x, y)$  为模拟数字再现光。

采用同一参考光记录各子数字全息图, 则合成孔径数字全息图的再现光场可以用两种再现方法来实现。一种是先把所有子数字全息图拼合成一幅总

数字全息图后, 用与原参考光相同的模拟再现光场进行数字再现; 另一种是先用与原参考光相同的模拟再现光场对每一幅子数字全息图进行数字再现, 再将各子全息图的数字再现像的复振幅叠加得到合成孔径数字全息的再现光场。两种方法的再现过程为

$$\begin{aligned}
 A(x_I, y_I) &= \sum_{i=0}^{N-1} I_{\Sigma_i}(x, y) C(x, y) = \\
 &= \sum_{i=0}^{N-1} |O_{\Sigma_i}(x, y, x_{00}, y_{00}) + R(x, y, x_{R0}, y_{R0})|^2 R(x, y, x_{R0}, y_{R0}) = \\
 &= \sum_{i=0}^{N-1} (|O_{\Sigma_i}|^2 + |R|^2 + O_{\Sigma_i} R^* + O_{\Sigma_i}^* R) = I(x, y) R \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$A(x_I, y_I) = \sum_{i=0}^{N-1} I_{\Sigma_i}(x, y) C(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} A_{\Sigma_i}(x_I, y_I) \quad (6)$$

式中  $C(x, y)$  为模拟数字再现光,  $R(x, y, x_{R0}, y_{R0})$  为记录时的参考光。

用复振幅叠加方法实现合成孔径数字全息图再现时, 如果各子数字全息图记录到的干涉场有相对固定的相位关系, (4)~(6)三个式子的再现结果应是相同的。虽然在理论上子数字全息图之间的相位存在  $\pi/2$  的偏差也不致影响再现的效果<sup>[8]</sup>, 但在实际上要实现这一目标, 对记录系统的稳定性和 CCD 的位移精度有着非常高的要求。因此用(4)式所示的多参考光方法实现记录和再现需要设计专门的记录系统, (5)式和(6)式的方法可以在有一定条件的实验室实现, 而(6)式的方法可以允许在再现时调整再现光场来实现合成孔径数字全息图的再现。

### 2.2.2 基于子全息图数字再现光场强度叠加的再现方法

在许多情况下, 往往只关心再现像的强度信息, 而且对于相位随机分布的散射物体, 要确定物体上各点的相位关系也比较困难, 这时可以考虑用子全息图数字再现光场强度叠加的方法实现合成孔径数字全息图的再现。这种再现方法为, 先用(4)式或(6)式中的方法再现出各子全息图再现光场的分复振幅  $A_{\Sigma_i}(x_I, y_I)$ , 再将各分复振幅求模平方后相加, 直接得到总再现光场的强度, 其再现过程可以表示为

$$\begin{aligned}
 I(x_I, y_I) &= \sum_{i=0}^{N-1} |I_{\Sigma_i}(x, y) C(x, y)|^2 = \\
 &= \sum_{i=0}^{N-1} I_{\Sigma_i}(x_I, y_I) \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中  $I(x_I, y_I)$  和  $I_{\Sigma_i}(x_I, y_I)$  分别是合成孔径数字全息再现光场的强度和子数字全息图再现光场的强度。由于强度叠加时各子全息图再现像之间的相位误差对合成再现像的影响比较小, 其记录和再现难度小于复振幅叠加方法, 在我们的实验中, 一些用复振幅叠加方法再现不满意的情况, 用强度叠加方法仍然可以得到良好的合成再现像。

## 3 实验

采用图 2 所示的光路记录合成孔径数字全息图, 对上述理论分析进行了实验验证。图 2 中的参考光为球面波, 其位置按无透镜傅里叶变换全息术的要求安排<sup>[11]</sup>, 记录中只用了单参考光方法; 图 2(a)为总体记录光路, 图中标出了记录中的坐标关系; 图 2(b)为椭圆圈出部分  $yo_z$  平面的侧视图。在图 2(a)中, He-Ne 激光器发出的波长为 633 nm 的激光经准直后被分束镜  $BS_1$  分为两束, 其中一束作为参考光, 经反射镜  $M_1$  反射和透镜  $L_1$  会聚后, 通过分束镜  $BS_2$  反射到 CCD 上。另一束经反射镜  $M_2$  反射和透镜  $L_2$  会聚, 通过分束镜  $BS_2$  透过物体形成

物光,参考光和物光按一定夹角照射到 CCD 芯片上形成全息图,如图 2(b)所示;透镜  $L_1$  和  $L_2$  除了用于形成球面波外,还可调节参考光会聚点至 CCD 的距离和参考光物光的强度比,以便于记录无透镜傅里叶全息图。CCD 固定在可沿  $x$  方向移动的平台,平台移动精度高于  $0.001\text{ mm}$ ,用于采集  $x$  方向的合成孔径数字全息图。记录对象为印有“女士”图案

的透明胶片,尺寸约为  $7\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ ,发髻中细线的宽度约为  $0.1\text{ mm}$ ,为方便记录在透明胶片前放置了一片毛玻璃作散射体。实验中物体与 CCD 的距离  $Z_0 = 462\text{ mm}$ ,用于实验记录数字全息图的 CCD 是卸去镜头的 MTV-1802CB 摄像头,像素数为  $795\text{ (H)} \times 576\text{ (V)}$ ,像素大小为  $0.010\text{ mm} \times 0.0108\text{ mm}$ 。

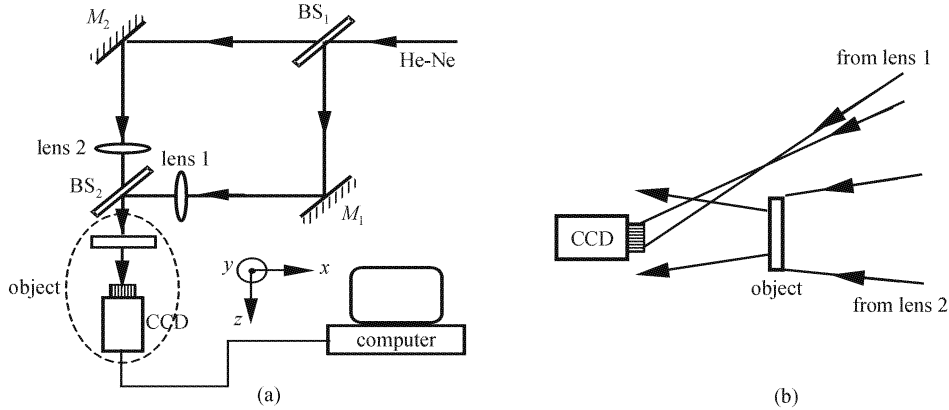


图 2 合成孔径数字全息的实验记录光路

(a) 总体光路;(b) 总体光路中圈出部分的侧视图

Fig. 2 Experimental configuration for synthetic aperture digital holography  
(a) whole light-road configuration; (b) the side elevation marked with dash line in (a)

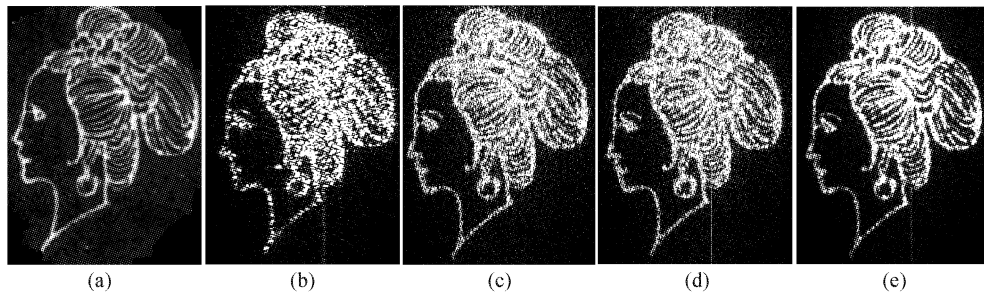


图 3 “女士”图像及合成孔径数字全息不同数字再现方法的再现像

(a) “女士”图案的扫描图;(b) 像素为  $375 \times 576$  单幅子全息图的再现像;(c) 像素为  $375 \times 576$  的 6 幅子全息图沿  $x$  方向拼接成像素为  $2250 \times 576$  大全息图的再现像;(d) 像素为  $375 \times 576$  的 6 幅子全息图再现光场复振幅叠加的再现像;(e) 像素为  $375 \times 576$  的 6 幅子全息图再现光场强度叠加的再现像

Fig. 3 Picture “Lady” and numerical reconstructed images of synthetic aperture digital hologram

(a) picture “Lady”; (b) the reconstructed image of a single hologram ( $375 \times 576$ ); (c) the reconstructed image for the combined six sub-holograms ( $2250 \times 576$ ); (d) the reconstructed image for six sub-hologram complex amplitude superposition; (e) the reconstructed image for six sub-holograms intensity superposition

实验中记录了 10 幅像素为  $375 \times 576$  的子数字全息图,选择其中相邻的 6 幅进行再现,再现的结果显示在图 3 中。图 3(a)是“女士”原图案的扫描图,图 3(b)是像素为  $375 \times 576$  单幅无透镜傅里叶全息图的再现像,图 3(c)是沿  $x$  方向 6 幅像素为  $375 \times 576$  的子数字全息图按(5)式再现的合成孔径再现像,图 3(d)是同样的子数字全息图按(6)式再现的

合成孔径再现像,图 3(e)是子数字全息图按(7)式再现的合成孔径再现像。可以看出,用(5)~(7)3 个式子得到的合成孔径数字全息再现像的结果是非常接近的,它们的分辨率明显高于图 3(b)所示单幅子数字全息图再现像的分辨率,再现像在  $x$  方向的分辨率明显提高,而在  $y$  方向由于没有合成孔径的效果,再现像的分辨率基本没有改变。

## 4 结 论

合成孔径数字全息技术可以显著提高数字全息的分辨率。再现方法是实现合成孔径数字全息成功再现的重要因素之一。用子全息图再现像的复振幅叠加方法和采用子全息图再现像的强度叠加方法均可实现合成孔径数字全息图的再现,可以根据解决问题的需要和子数字全息图记录的情况选用。

### 参 考 文 献

- 1 M. Jacquot, P. Sandoz, G. Tribillon. High resolution digital holography [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **190**(1):87~94
- 2 Liu Cheng, Li Liangyu, Li Yinzhu *et al.*. Digital holography free of zero-order diffraction and conjugate image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4):427~431  
刘 诚,李良钰,李银柱等. 无直透光和共轭像的数字全息[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4):427~431
- 3 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu *et al.*. Analysis of some fundamental issue about digital hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4):465~471  
钟丽云,张以谟,吕晓旭等. 数字全息中的一些基本问题分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4):465~471
- 4 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu *et al.*. Some quantitative analysis about digital holographic reconstructed image [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):570~574  
钟丽云,张以谟,吕晓旭等. 数字全息图的再现像的分析计算[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5):570~574
- 5 L. J. Cutrona. *Redar Handbook* [M]. New York: McGraw-Hill, 1970. Chap. 23
- 6 T. J. Green, Jr., S. Marcus, B. D. Colella. Synthetic-aperture-radar imaging with a solid-state laser [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(30):6941~6949
- 7 Jürgen H. Massig. Digital off-axis holography with a synthetic aperture [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **27**(24):2179~2181
- 8 R. Binet, J. Colineau, J. C. Leheureau. Short-range synthetic aperture imaging at 633 nm by digital holography [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(23):4775~4782
- 9 F. Le Liere, M. Gross, L. Collot. Synthetic-aperture experiment in the visible with on-axis digital heterodyne holography [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(20):1550~1553
- 10 T. Kreis, W. Jüptner. Digital in-line holography in partical measurement [C]. *SPIE*, 1999, **3744**:54~64
- 11 R. J. Collier, C. B. Burckhardt, L. H. Lin, translated by Sheng Erzhen, Sun Mingjing. *Optical Holography* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1983. 195~208  
R. J. 科利尔, C. B. 伯克哈特, L. H. 林著, 盛尔镇, 孙明经译. *光全息学* [M]. 北京:机械工业出版社, 1983. 195~208



## 欢迎订阅 2005 年《人工晶体学报》

《人工晶体学报》是由中国硅酸盐学会晶体生长与材料分会和中非人工晶体研究院联合主办,由《人工晶体学报》编辑委员会编辑,人工晶体学报社出版的国家级学术性期刊,是我国唯一专门刊登人工晶体材料这一高新技术研究领域成果的学术性刊物。它以论文和简报等形式报道我国在晶体材料:半导体材料、光电子材料、压电晶体材料、纳米材料、薄膜材料、超硬材料和高技术陶瓷等在理论研究、生长技术、性能、品质鉴定、原料制备,以及应用技术和加工等方面的最新科研成果,同时介绍国内外晶体材料的发展动态与学术交流会议及会议信息。刊户覆盖以上各行业的大专院校、科研院所、生产经营单位和省(市)图书馆、政府相关部门,本刊已在美、日、英、俄、德等国家和地区发行。

《人工晶体学报》为中文核心期刊,美国工程索引(ED)收录源期刊。全文在“万方数据数字化期刊群”及“中国期刊全文数据库”上网。2004年6月被《中国知识资源总库·科技精品期刊库》收入。

刊 号:ISSN 1000-985X CN 11-2637/O7

广告经营许可证:京朝工商广字 0016 号

主办单位:中国硅酸盐学会晶体生长与材料分会 中非人工晶体研究院

刊 期:双月刊

开 本:大十六开

2005年《人工晶体》学报全年定价240元,可直接与编辑部联系订阅。

银行汇款方式:

邮局汇款方式:

收款单位:中非人工晶体研究院

邮 编:100018

开户银行:北京工商银行管庄分理处

北京 733 信箱《人工晶体学报》编辑部

帐 号:144330-01

网 址:www.jtxb.cn

电 话:(010)65492968

E-mail:bjb@jtxb.cn

传 真:(010)65493320