

# 采用角分复用技术拓展低相干光源离轴 全息术的探测面积

马忠洪<sup>1</sup> 杨 勇<sup>1\*</sup> 吴永丽<sup>1</sup> 邓丽军<sup>1</sup> 盖 琦<sup>2</sup> 翟宏琛<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>南开大学现代光学研究所教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300071)

<sup>2</sup>天津理工大学中环信息学院, 天津 300380

**摘要** 在采用超短脉冲光源或低相干连续光源的离轴数字全息术记录超快过程或获取光学断层信息的过程中, 由于受光源相干长度限制, 仅能在一个有限的区域内形成干涉条纹, 则可探测到的物波面积会大大降低。提出了一种基于立体角分复用技术的低相干光源离轴数字全息系统的记录方法, 利用不同立体角度的多个参考光与物光同时干涉, 来克服在像面数字全息记录中由于光源的相干长度过短造成的对物波探测面积的限制。搭建了采用立体角分复用技术的脉冲数字像面全息实验系统, 并获取了多个参考光与物光同时干涉形成的复合全息图。通过频谱变换和数字滤波, 分别重构出由每路参考光与物光干涉所记录下的不同区域的物波波面, 运用数字图像融合技术, 获得了在整个探测面上所记录的物波波面。实验结果验证了该方法的有效性。

**关键词** 全息; 拓展探测面积; 立体角分复用技术; 低相干光源

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0509001

## Spatial Angular Multiplexing for Enlarging Detection Area of Off-Axis Digital Holography with Low-Coherence-Length Light Source

Ma Zhonghong<sup>1</sup> Yang Yong<sup>1</sup> Wu Yongli<sup>1</sup> Deng Lijun<sup>1</sup> Ge Qi<sup>2</sup> Zhai Hongchen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nankai University, Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Institute of Modern Optics, Ministry of Education, Tianjin 300071, China  
<sup>2</sup>College of Zhonghuan Information, Tianjin University of Technology, Tianjin 300380, China

**Abstract** In the off-axis digital holography for detecting the ultra-fast phenomenon or obtaining the optical tomography information, the interference fringes are formed in a limited region due to the low coherence length of the light source, resulting in a corresponding decrease of the detected area of the object wavefront. A new recording method based on spatial angular multiplexing for enlarging the detected area in the above situation is proposed, in which multiple interferences between the object and the reference waves are simultaneously carried out by the spatial angular multiplexing. An image plane pulsed digital holographic system with two references based on spatial angular multiplexing is set up in the experimental system. The full-field reconstruction image can be obtained by fusing the two separately reconstructed parts of the images into a complete one. The experimental results demonstrate the validity of this method.

**Key words** holography; enlarging detected area; spatial angular multiplexing; light source of low coherence length

**OCIS codes** 090.1995; 090.2880; 090.4200

**收稿日期:** 2012-12-04; **收到修改稿日期:** 2013-01-15

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(60838001)、国家自然科学基金科学仪器基础研究项目(61227010)、天津市应用基础及前沿技术研究计划(11JCYBJC01400)和中央高校基本科研业务费专项资金资助课题。

**作者简介:** 马忠洪(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事数字全息方面的研究。E-mail: zhonghong052958@126.com

**导师简介:** 翟宏琛(1944—), 男, 博士, 教授, 主要从事数字全息、飞秒级超快瞬态过程探测等方面的研究。

E-mail: zhai@nankai.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: yangyong@nankai.edu.cn

# 1 引 言

在离轴数字全息探测系统中使用低相干光源可以获得使用普通相干长度的光源(如氦氖激光)无法获得的信息。例如采用超短脉冲激光探测超快过程<sup>[1]</sup>,可以获得高时间分辨的探测信息<sup>[2,3]</sup>,或采用宽光谱激光的光学相干层析技术可获得高纵向空间分辨的光学断层信息<sup>[4,5]</sup>,其中通过加大光源的光谱宽度来压缩光源的相干长度是提高探测超快过程的时间分辨率或提高光学相干层析技术中的纵向空间分辨率的有效手段之一。但在常规的离轴数字全息术中,若探测光源的相干长度越短,则物光和参考光相干的区域就会越小,从而在 CCD 靶面上可记录的条纹数就会越少<sup>[6]</sup>。因此在现有的基于低相干光源的离轴数字全息探测系统中,存在着获得高时间(或纵向空间)分辨率和探测到足够大的物波面积之间的矛盾。

在使用宽带连续光源<sup>[7,8]</sup>或使用超短脉冲激光<sup>[9,10]</sup>的宽谱低相干光源离轴数字全息系统中,虽然可利用宽谱低相干光源中不同频率的光线在通过光栅<sup>[6]</sup>、棱镜<sup>[7]</sup>或衍射光学元件<sup>[8]</sup>等角色散元件后沿倾斜面展开<sup>[11]</sup>的特性实现具有倾斜波前<sup>[12]</sup>的全息记录,从而拓展干涉区域以及探测面积<sup>[6,13]</sup>,但因使用角色散元件而引入的空间啁啾<sup>[14]</sup>使得倾斜波前的不同频谱成分的光线在到达记录面时会有一个横向错位,因而会因相对载频的不同使记录面上不同区域的干涉条纹间距不一致,从而会造成测量基准的变化<sup>[9]</sup>。

本文提出了一种基于立体角分复用技术<sup>[15]</sup>拓展超短脉冲离轴数字全息记录系统中物波探测面积的方法,可有效地克服在像面数字全息记录系统中

因光源的相干长度过短造成的对物波探测面积的限制。与波前倾斜方法相比,该方法避免了因使用角色散元件带来的测量基准不一致的问题。理论分析表明该方法同样适用于采用宽带连续光源的低相干光源离轴数字全息系统中。

# 2 采用立体角分复用技术拓展干涉区域的方法

图 1(a) 为采用常规低相干光源离轴数字全息系统中的干涉区域(菱形区域)和物波可探测面积(与  $l$  有关)的示意图。其中  $\theta$  为物光与参考光的夹角,  $l$  为物光与参考光在相干区域内的平均宽度。图中参考光在菱形区域内以一定的夹角与物波相干。该干涉区域被 CCD 以积分的方式记录在与被探测到的物波面积成正比的记录区域内。其中可探测到的物波面积可表示为  $S$ , 其大小与图 1(a) 中标注的尺度  $l$  的关系为

$$S = la, \tag{1}$$

式中  $a$  为相干区域的平均长度,  $l$  与光源的相干长度  $L_c$ 、物光参考光间的夹角  $\theta$  有关:

$$l = N\Delta x = \frac{L_c}{\lambda_0} \frac{\lambda_0}{\sin \theta} = \frac{L_c}{\sin \theta}, \tag{2}$$

式中  $N$  为参考光与物光干涉形成的干涉条纹数目,  $\Delta x$  为干涉条纹的条纹间距,  $\lambda_0$  为宽谱光源的中心波长。图 1(b) 为提出的基于立体角分复用技术拓展低相干光源离轴数字全息系统干涉区域的原理示意图, 其中两束参考光脉冲与物光脉冲的夹角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。通过调整两参考光的延迟量, 可在如图 1(b) 所示的两个菱形区域内与物波同时产生干涉。其可探测到的总的物波面积  $S_t$  可表示为

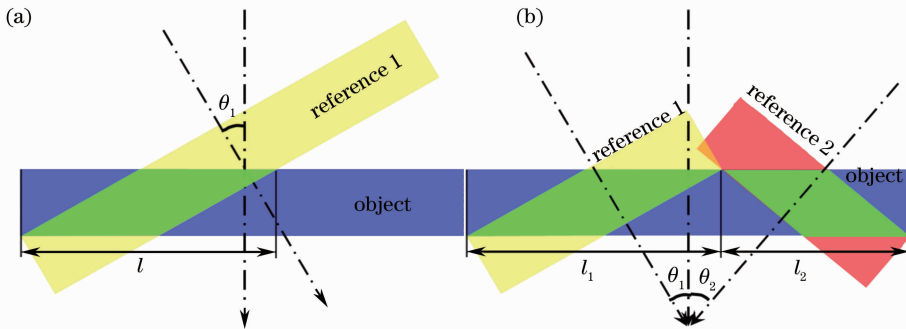


图 1 采用低相干光源的离轴数字全息术干涉区域和物波可探测面积的示意图。(a)采用常规方法的干涉区域和物波可探测面积;(b)采用立体角分复用技术的干涉区域和物波可探测面积

Fig. 1 Schematic diagram of interference region and detected area based on the off-axis digital holography with a light source of low coherence length. (a) Interference region and detected area by conventional implementation; (b) interference region and detected area by spatial angular multiplexing

$$S_t = S_1 \cup S_2 = (l_1 a_1) \cup (l_2 a_2) = \frac{L_c a_1}{\sin \theta_1} \cup \frac{L_c a_2}{\sin \theta_2}, \quad (3)$$

式中符号“ $\cup$ ”表示两区域的并集。

可见，在低相干光源的离轴数字全息系统中采用立体角分复用技术，可将物波的可探测面积从  $S_1$  扩大到  $S_t$ 。但应该注意的是，在该方法中，物光与参考光间的夹角不能取得过小，以确保全息图频谱的正负一级频谱与零级频谱能有效地分离；但也不能过大，否则会导致干涉条纹太密，以致每一路参考光探测到的物波面积变小及造成与 CCD 的分辨率不匹配的问题。在该方法中，实际使用的参考光的数量可以根据需要探测的物波面积的大小及复用全息图频谱空间的复用能力进行适当的增加。作为对

比，图 2 分别给出了采用两个及三个不同立体角度的参考光与物波同时干涉的示意图。其中，带箭头的虚线表示相应光束的传输方向。图 2(a) 为使用两个从不同立体角度同时入射的参考光的示意图，可在 CCD 靶面(区域 A)上同时形成由两个干涉条纹取向不同的子全息图(区域 C, D)叠加的复合全息图，从而使可探测到的物波区域由 C 或 D 扩大为  $C \cup D$ 。同理，如图 2(b) 所示，使用三个从不同立体角度同时入射的参考光时，可在 CCD 的靶面同时形成由三个不同干涉条纹取向的子全息图(区域 C, D, E)叠加的复合全息图，并能探测到较大的物波面积(区域 B 被条纹覆盖的区域)。

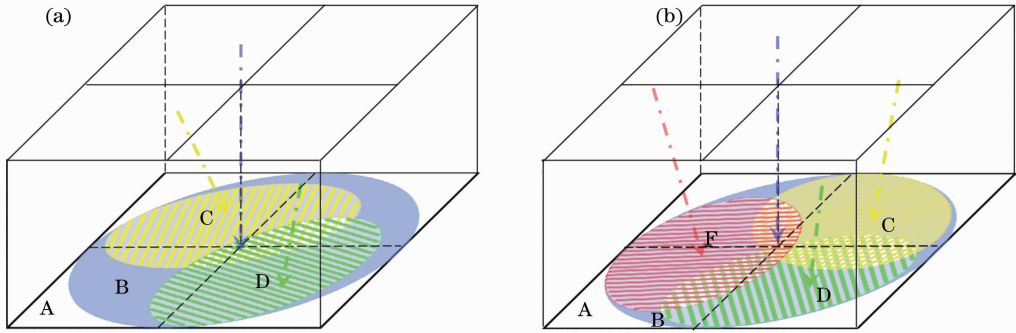


图 2 多个参考光与物光干涉区域示意图。(a) 两个立体角度的参考光与物光干涉区域示意图；(b) 三个立体角度的参考光与物光干涉区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the interference region with multiple reference waves. (a) With two reference waves; (b) with three reference waves. (A: CCD plane, B: object wavefront, C&D&E: sub-holograms)

### 3 实验系统及实验结果

为了验证上述实验方法的可行性，搭建了采用立体角分复用技术的脉冲数字像面全息实验系统，如图 3 所示。其中低相干光源为钛宝石飞秒脉冲激光器，中心波长  $\lambda_0$  为 820 nm，脉冲宽度  $\Delta\tau$  为 35 fs。入射的飞秒脉冲激光被薄膜分束镜  $BS_1$  (薄膜分束镜厚度  $2 \mu\text{m}$ ，引入的色散可忽略不计) 分成物波与参考波两部分。物波经反射镜  $M_1$  反射到延迟线  $DL_1$ ，并垂直照射到被测的分辨率版 S (USAF-1951) 上。其透射波经显微物镜 (MO) 成像后，由  $BS_3$  反射到 CCD 靶面上 (CCD 的型号为 chameleon CMLN-13S2M，其像素数为  $1280 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$ ，单个像素尺寸为  $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ )；由  $BS_1$  透射的参考光经  $BS_2$  反射形成第一个参考光，再经过反射镜  $M_2$ ，延迟线  $DL_2$  和反射镜  $M_3$  后，以角度  $1.7^\circ$  在 CCD 靶面与物光干涉；透过  $BS_2$  的光束形成第二

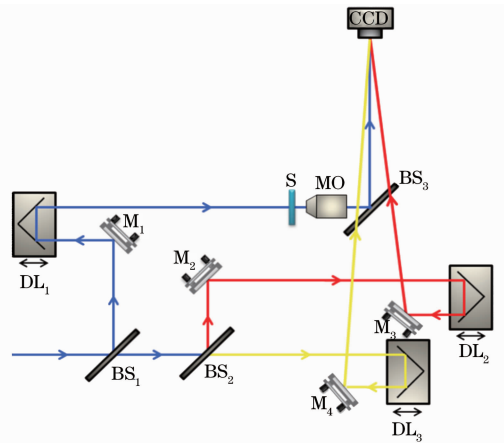


图 3 采用立体角分复用技术的脉冲数字像面全息实验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the image plane pulsed digital holography experimental system based on spatial angular multiplexing

个参考光,经延迟线  $DL_3$  和反射镜  $M_4$  后,以角度  $1.5^\circ$  在 CCD 靶面与物光干涉。实验中,采用显微物镜将物体的放大像成像于 CCD 记录靶面上,以提高探测的横向分辨率。两个参考光波不经过显微物镜直接与物波在靶面上相干,以避免引入额外的色散,保证了系统探测的时间分辨率。波前倾斜方法使用的角色散元件引入的空间啁啾会使飞秒激光脉冲在 CCD 靶面的不同区域以不同的载频进行干涉,因而不同区域形成的不同间距的条纹导致了测量基准的不一致。由于实验装置没有使用诸如光栅、棱镜等的角色散元件,从而避免了飞秒激光脉冲空间啁啾的产生。因此与波前倾斜方法相比,从根本上避免了角色散元件带来的测量基准不一致问题。

在实验中,通过调节延迟线  $DL_1$ ,  $DL_2$  和  $DL_3$ ,可使两参考光与物波干涉的条纹分布在如图 1(b)所示的两个菱形区域内。采用上述实验装置获得的复合全息图如图 4(a)所示。图中虚线方框内的局部放大

图像如图 4(b)所示,为一幅像面全息图;该复合全息图经二维傅里叶变换得到的频谱如图 4(c)所示。图中,区域 1 和 2 分别为两路参考光与物波干涉的正一级频谱,区域 3 为两路参考光干涉的正一级频谱。分别对区域 1 和 2 这两个频谱进行滤波、逆傅里叶变换后,可分别再现出被探测到的不同区域的物波波面,如图 4(d)、(e)所示。通过分区域计算图 4(d)、(e)与原始图像间的相似程度[峰值信噪比(PSNR)值],选取 PSNR 值较大的图像作为最终的再现像组成部分,采用图像融合和拼接技术<sup>[16]</sup>,可以获得如图 4(f)所示的两再现波面的数字拼接图。振幅型分辨率板的实验结果说明了本文所提方法的有效性。由于所采用的角分复用技术可以方便地获取物体的相位信息,分别再现各个参考光分别记录的相位信息,再通过已有的相位拼接方法<sup>[17,18]</sup>,可以获得记录区域得到拓展的相位信息的再现结果。

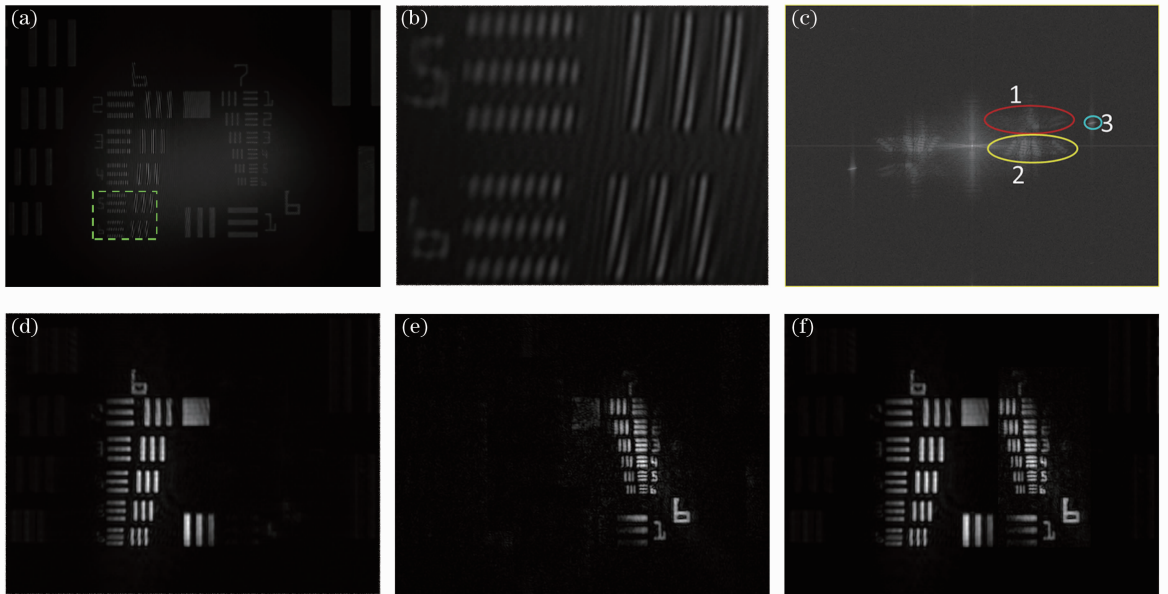


图 4 采用立体角分复用技术拓展物波探测面积的实验结果。(a)复合全息图;(b)全息图虚框内的局部放大图;(c)复合全息图的频谱;(d),(e)每一路参考光的再现像;(f)再现像的拼接图

Fig. 4 Experimental results of the detected object wavefront based on spatial angular multiplexing. (a) Composite hologram; (b) enlarged blue dashed box of (a); (c) Fourier spectrum of (a); (d) and (e) reconstructed images of each reference wave; (f) digitally fused image

从上述实验结果中可以看出,在超短脉冲光源数字全息记录中,受光源相干长度的影响,使可探测到的物波面积受到限制;通过采用基于立体角分复用的多参考光同时记录的方法,可有效地拓展像面全息记录系统中被探测到的物波面积。

## 4 结 论

提出了一种基于立体角分复用技术拓展低相干光源离轴脉冲数字全息系统中可探测物波面积的记录方法。理论分析和实验结果表明,该方法有效地克服了在像面数字全息记录系统中由于超短脉冲光源的相干长度过短造成的对物波探测面积的限制。

分析表明,该方法同样适用于采用宽带连续光源的低相干光源离轴数字全息系统,实验给出了具有两个参考光的实验结果。在实际应用中,可根据需要适当增加参考光的数量,使物波的探测面积得到进一步的拓展。

**致谢** 感谢薛东旭在实验上的帮助,以及天津大学王清月、胡明列、宋有健老师在飞秒激光实验系统上给予的帮助。

### 参 考 文 献

- 1 Li Xiaoxi, Jia Tianqing, Feng Donghai *et al.*. The ablation mechanism and ultra-fast dynamics property of lithium fluoride with the ultra-short pulse laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1526~1530  
李晓溪, 贾天卿, 冯东海等. 超短脉冲照射下氟化锂的烧蚀机理及其超快动力学研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1526~1530
- 2 Xianglei Mao, Samuel S. Mao, Richard E. Russo. Imaging femtosecond laser - induced electronic excitation in glass[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(5): 697~699
- 3 Hu Haofeng, Wang Xiaolei, Guo Wengang *et al.*. Time-resolved optical diagnosis of intense femtosecond laser ablation of silica glass[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(1): 017901  
胡浩丰, 王晓雷, 郭文刚等. 强飞秒激光烧蚀石英玻璃的超快时间分辨光学诊断[J]. *物理学报*, 2011, **60**(1): 017901
- 4 Zahid Yaqoob, Toyohiko Yamauchi, Wonshik Choi *et al.*. Single-shot full-field reflection phase microscopy [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(8): 7587~7595
- 5 Xu Peng, He Hong, Ding Zhihua. Research in subsurface morphologies of jades with optical coherence tomography[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0508004  
许 鹏, 何 红, 丁志华. 光学相干层析应用于玉石亚表面结构的研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0508004
- 6 A. A. Maznev, T. F. Crimmins, K. A. Nelson. How to make femtosecond pulses overlap [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(17): 1378~1380
- 7 Mao Youxin, Guo Jianpin, Liang Yanmei *et al.*. Analysis of noise characteristics in an optical coherence tomographic system

- [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 324~330  
毛幼馨, 郭建平, 梁艳梅等. 低相干光源层扫描系统的噪声分析与研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 324~330
- 8 Zahra Monemhaghdoost, Frédéric Montfort, Yves Emery *et al.*. Dual wavelength full field imaging in low coherence digital holographic microscopy [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(24): 24005~24022
- 9 Tadas Balčūnas, Andrius Melninkaitis, Andrius Vanagas *et al.*. Tilted-pulse time-resolved off-axis digital holography [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(18): 2715~2717
- 10 Raúl Martínez-Cuenca, Lluís Martínez-León, Jesús Lancis *et al.*. High-visibility interference fringes with femtosecond laser radiation [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(25): 23016~23024
- 11 Selcuk Akturk, Mark Kimmel, Patrick O'Shea *et al.*. Measuring pulse-front tilt in ultrashort pulses using GRENOUILLE [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(5): 491~501
- 12 J. Hebling. Derivation of the pulse front tilt caused by angular dispersion [J]. *Opt. & Quantum Electron.*, 1996, **28**(12): 1759~1763
- 13 Oscar Eduardo Martinez. Pulse distortions in tilted pulse schemes for ultrashort pulses [J]. *Opt. Commun.*, 1986, **59**(3): 229~232
- 14 Ma Jing, Chen Yunliang, Tan Liying *et al.*. Angular dispersion analysis of DOE-WDM [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 532~536  
马 晶, 陈云亮, 谭立英等. 衍射光学元件波分复用角色散特性分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 532~536
- 15 Wang Xiaolei, Zhai Hongchen, Mu Guoguang. Pulsed digital holography system recording ultrafast process of the femtosecond order [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(11): 1636~1638
- 16 He Jianwei, Yang Jianfeng, Xue Bin *et al.*. Reserch on the automatic stitching of panorama camera image based on system similarity matching principle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 989~993  
何建伟, 杨建峰, 薛 彬等. 基于系统论匹配准则的尺度不变特征变换的图像自动拼接研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 989~993
- 17 Masashi Otsubo, Katsuyuki Okada, Jumpel Tsujiuchi *et al.*. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms [J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(2): 608~613
- 18 Cuixia Dai, Yingjie Yua, Gang Chen *et al.*. Study of the holographic phase stitching technique [C]. *SPIE*, 2008, **7000**: 70001T

栏目编辑: 何卓铭