

单幅层析全息图的记录及数据重建*

周文静[†] 胡文涛 瞿惠 朱亮 于瀛洁

(上海大学精密机械工程系, 上海 200072)

(2011年12月22日收到; 2012年1月19日收到修改稿)

进行了数字单幅离轴层析全息图记录和数值处理模拟分析及实验研究. 首先定义了单幅层析全息图并分析了基于多向投影的数字单幅离轴层析全息图频谱分布特点, 由此表明它的可处理性. 在此基础上, 数值模拟分析了基于三向投影的单幅离轴层析全息图记录与各向投影信息的分离提取, 最后选择了具有周期结构的透明光栅(周期为 100 μm) 作为实验样本, 实现了三向投影的单幅层析全息图的记录以及数值重建, 三束物光波重建周期值误差在 4%—5% 范围内. 模拟分析及实验结果验证了单幅层析全息图记录与信息分离的可行性, 同时为实现具备实时检测功能的极少量投影数字全息层析系统提供了重要的技术基础.

关键词: 数字全息层析技术, 三向投影, 单幅层析全息图

PACS: 42.40.Kw, 42.30.Wb

1 引言

目前数字全息层析重建中均需要几十幅全息图^[1-7], 从而限制了系统的动态特性. 针对这一特点, 我们前期开展了少量投影数字全息层析重建实验研究^[8,9], 针对轴对称结构样本, 利用单向投影数据拓展为三向投影数据, 实现被测样本横截面折射率的重建, 或者利用被测样本的两次旋转获取三向投影数据, 实现被测样本横截面折射率的重建. 但至今相关研究都未实现系统的动态特性, 即多向投影全息图的实时记录^[9-16]. 实现实时记录的方式有两种: 1) 利用多个电荷耦合器件 (CCD) 同时记录多向投影的干涉全息信息; 2) 将多向投影的干涉全息信息同时汇集于一个方向, 由单个 CCD 器件记录. 前一种记录方法比较简单, 容易实现, 但采用多个 CCD 后会在各向投影信息之间引入位置误差以及匹配误差等. 后一种记录方法虽然需要灵活设计恰当的光路, 但可以避免上述误差的引入. 本文针对第二种记录方式开展了分析及实验研究, 并在此定义由多向投影干涉全息信息一次曝光记录所形成的单幅全息图为单幅层析全息图. 本文首先理论

分析了基于多向投影的单幅层析全息图频谱分布特点, 然后数值模拟分析了基于三向投影的单幅层析全息图记录与各向投影信息的分离提取, 最后选择了具有周期结构的透明光栅作为实验样本, 开展了相应的实验研究, 实现了三向投影的单幅层析全息图的记录以及数值重建. 选择具有周期结构的光栅样本是为了更好地量化分析单幅层析全息图的记录及其重建以及记录系统中光束入射角度对被测样本信息记录的影响. 本文研究结果为下一步关于极少量投影数字全息层析实时动态重建研究工作提供了关键的理论依据和前期基础.

2 单幅层析全息图频谱特点分析

分别设全息面上 3 束物光波、1 束参考光波为 O_1, O_2, O_3, R , 其表达式为

$$O_1(\xi, \eta) = A_1 \exp(i\varphi_1(\xi, \eta)), \quad (1)$$

$$O_2(\xi, \eta) = A_2 \exp(i\varphi_2(\xi, \eta)), \quad (2)$$

$$O_3(\xi, \eta) = A_3 \exp(i\varphi_3(\xi, \eta)), \quad (3)$$

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61107004)、上海市教委创新基金 (批准号: 12zz088)、上海大学研究生创新基金 (批准号: SHUCX112201) 和上海市教委“机械电子工程”创新团队项目资助的课题.

[†] E-mail: lazybee@shu.edu.cn

$$R(\xi, \eta) = A_r \exp(i\varphi_r(\xi, \eta)), \quad (4)$$

式中, A 表示各光波的振幅, φ 表示各光波的相位. 上述各物光波与记录参考光波来自同一相干光源, 振动方向相同, 所以全息平面上会有多束相干波. 用 H 表示全息平面上的光强分布, 表达式为

$$\begin{aligned} H &= (O_1 + O_2 + O_3 + R) \cdot (O_1 + O_2 + O_3 + R)^* \\ &= O_1 O_1^* + O_1 O_2^* + O_1 O_3^* + O_1 R^* + O_2 O_1^* \\ &\quad + O_2 O_2^* + O_2 O_3^* + O_2 R^* + O_3 O_1^* \\ &\quad + O_3 O_2^* + O_3 O_3^* + O_3 R^* \\ &\quad + R O_1^* + R O_2^* + R O_3^* + R R^*, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $*$ 表示共轭. 合并、整理上式, 得

$$\begin{aligned} H &= \left(\sum_{i=1}^3 O_i O_i^* + R R^* \right) + (O_1 O_2^* + O_2 O_1^* \\ &\quad + O_1 O_3^* + O_3 O_1^* + O_2 O_3^* + O_3 O_2^*) \\ &\quad + (O_1 R^* + O_2 R^* + O_3 R^*) \\ &\quad + (O_1^* R + O_2^* R + O_3^* R), \end{aligned} \quad (6)$$

式中, 第一个括号内的是直流项, 第二个括号内的是三束物光波彼此之间产生的干涉噪声, 第三个括号内包含了三束物光波原始信息, 第四个括号内包含了三束物光波的共轭信息.

设三束物光波及参考光波的频率各为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega$, 对 (6) 式进行傅里叶变换, 则得

$$\begin{aligned} \mathfrak{S}[H] &= A + \sum_{i=1}^3 [F(\omega - \omega_i) + F(\omega + \omega_i)] \\ &\quad + [F(\omega_1 - \omega_2) + F(\omega_1 + \omega_2)] \\ &\quad + [F(\omega_1 - \omega_3) + F(\omega_1 + \omega_3)] \\ &\quad + F(\omega_2 - \omega_3) + F(\omega_2 + \omega_3), \end{aligned} \quad (7)$$

上式表明, 直流项在零频处产生冲激谱 A , 其他各频谱在频谱平面上的位置受参考光波和物光波之间的夹角调制, 其中 $F(\omega + \omega_1), F(\omega + \omega_2), F(\omega + \omega_3)$ 分别是三束物光波原始信息所对应的频谱, 即为需要提取出来的有效频谱, 其他各项均为无效频谱, 或可看作噪声去除.

3 单幅层析全息图模拟分析

本文模拟和实验分析中的单幅层析全息图均包含三投影方向 (0° 视角、 60° 视角、 120° 视角) 的物光波信息. 模拟过程分四步完成: 第一步, 模拟

生成三束互不相同的物光波, 作为来自三向投影的物光波; 第二步, 将三向物光波与平面参考光波产生离轴干涉生成单幅层析全息图, 并考虑物光波彼此之间的干涉; 第三步, 采用频域法实现单幅离轴层析全息图的频谱滤波, 获取三向物光波的频谱; 第四步, 提取三向物光波的频谱成分, 并分别数值重建得到相应的原始相位信息.

为表示各投影物光波的相异性, 模拟中采用三束不同物波: 一个抛物面、两个抛物面和四个抛物面, 如图 1 所示. 模拟参数如下: 激光波长为 632.8 nm , CCD 接收面积为 1024×1024 像素, 像

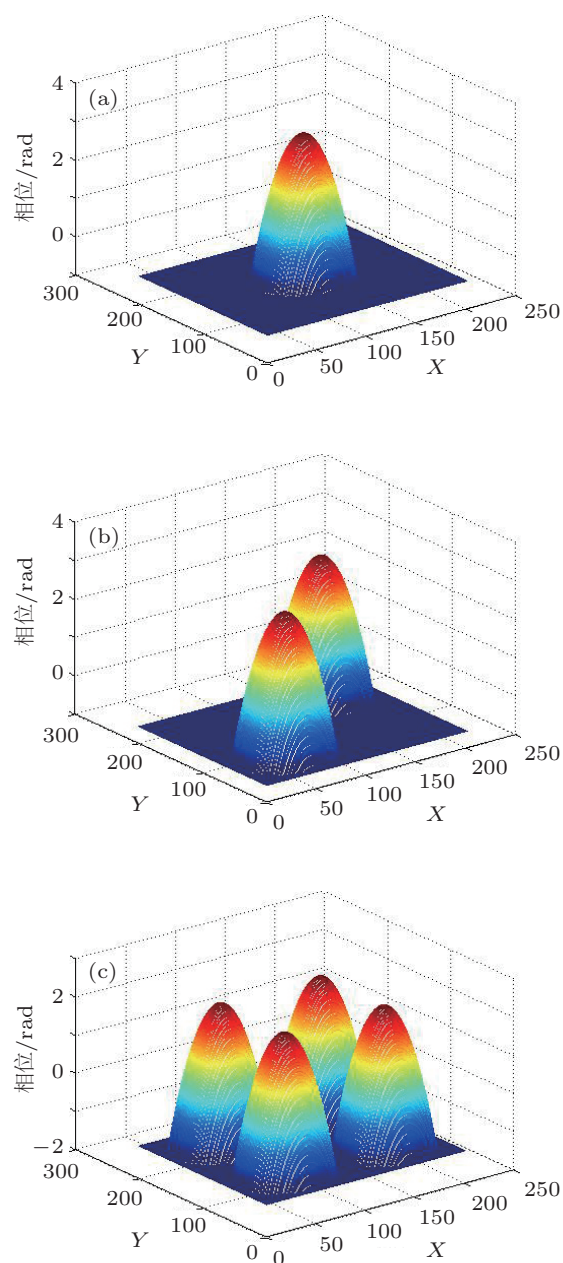


图 1 三向物光波的原始相位三维分布图 (a) 0° 视角; (b) 60° 视角; (c) 120° 视角

素尺寸为 $4.65 \mu\text{m}$, 记录距离为 60 cm . 抛物面的表达式如下:

$$z = 0.05 - (x^2 + y^2)/200^2, \quad (8)$$

将抛物面经过平移与复制后, 分别得到图 1(a), (b), (c) 所示三束不同视角的物光波, 图中所示为各物光波的相位分布.

图 2 为模拟生成的单幅离轴层析全息图, 图 3 所示为单幅离轴层析全息图对应的频谱图. 将物光波 $i(i = 1, 2, 3)$ 与平面参考光波干涉的频谱成分记为 $F-O_iR$, 将物光波 1 与物光波 2 干涉的频谱成分记为 $F-O_1O_2$, 则由图 2 可见, 因为三束物光波和参考光波之间的夹角要大于物光波彼此之间的夹角, 所以三束原始物光波所对应的频谱成分受其他频谱成分干扰极小, 且相互分离.

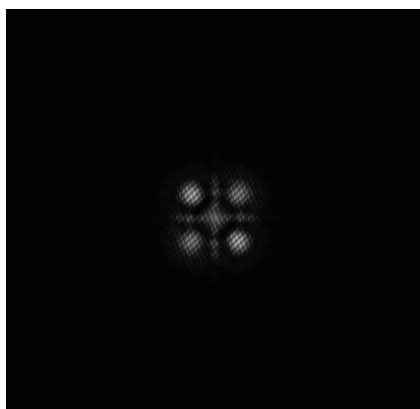


图 2 单幅层析全息图

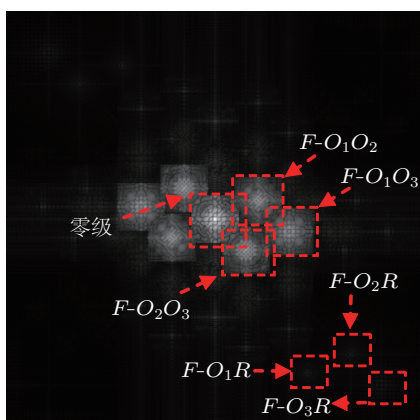


图 3 单幅层析全息图频谱

分别取出 $F-O_1R$, $F-O_2R$, $F-O_3R$, 用卷积算法进行全息图数值重建, 重建结果如图 4 所示.

与图 1 所示三束原始物光波分别比较, 重建结

果表明三向的原始物光波信息被完整地分离提取, 但由于存在干涉噪声, 且采用了矩形窗进行频谱的分离提取, 所以不可避免地会存留一部分噪声频谱, 同时也会丢失一部分有效频谱, 从而引入重建误差. 图 5 是数值重建三向物光波的相位误差三维分布图, 图 6 为图 5 各误差沿 X 轴的横截线分布图. 表 1 给出了数值重建误差数据, 其中相位幅值是相位最大值和相位最小值之差, 平均误差是对所有像素中的误差取平均值, 标准误差是对所有像素中的误差取标准差.

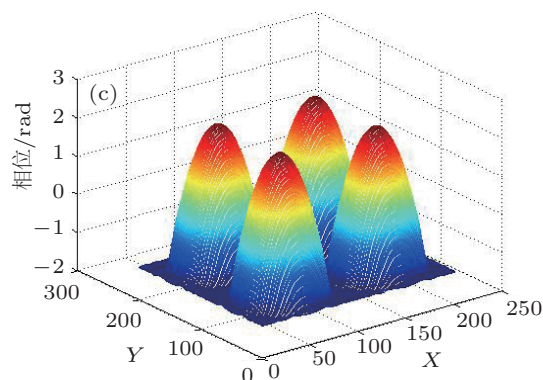
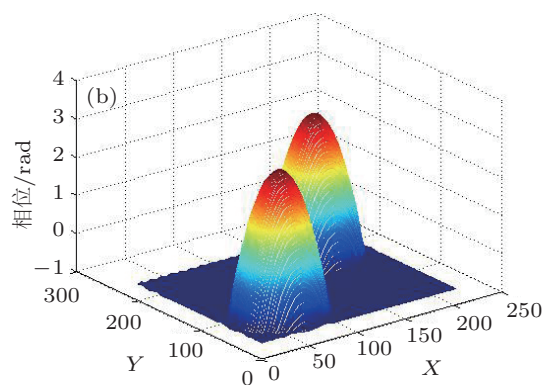
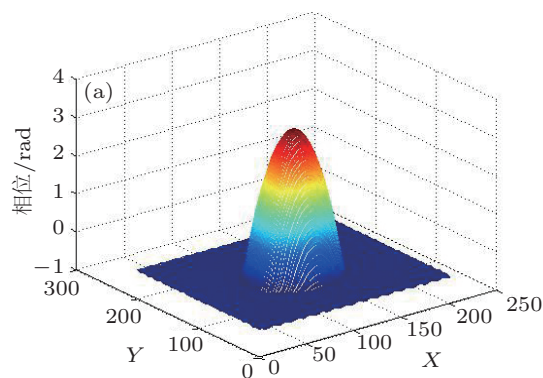


图 4 全息图数值重建三向物光波相位三维分布图 (a) 0° 视角; (b) 60° 视角; (c) 120° 视角

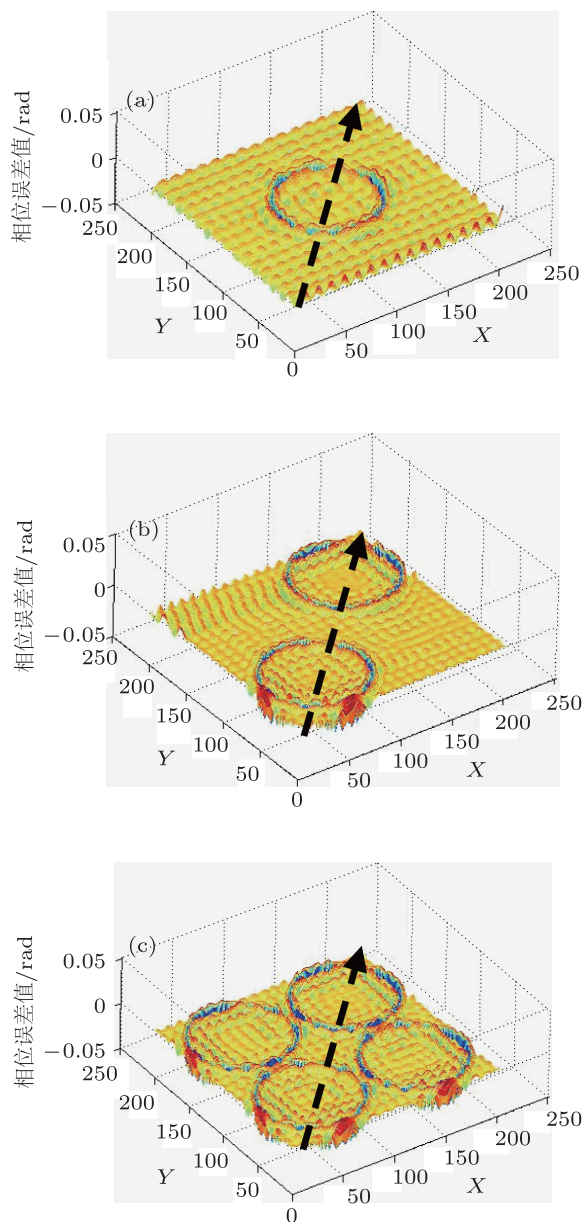


图5 全息图数值重建三向物光波相位误差三维分布图 (a) 0° 视角; (b) 60° 视角; (c) 120° 视角

表1 重建结果误差分析

	原始相位 幅值/rad	重建相位 幅值/rad	平均 误差/rad·pixel ⁻¹	标准 误差/rad·pixel ⁻¹
物波 1	3.7699	4.3135	0.0322	0.0430
物波 2	3.7699	3.8966	0.0361	0.0557
物波 3	3.7699	3.8311	0.0675	0.0651

4 单幅层析全息图处理实验及结果分析

4.1 单幅层析全息图处理实验

首先搭建了基于 Mach-Zender 预放大式三向投影数字单幅离轴层析全息图光学记录系统, 如

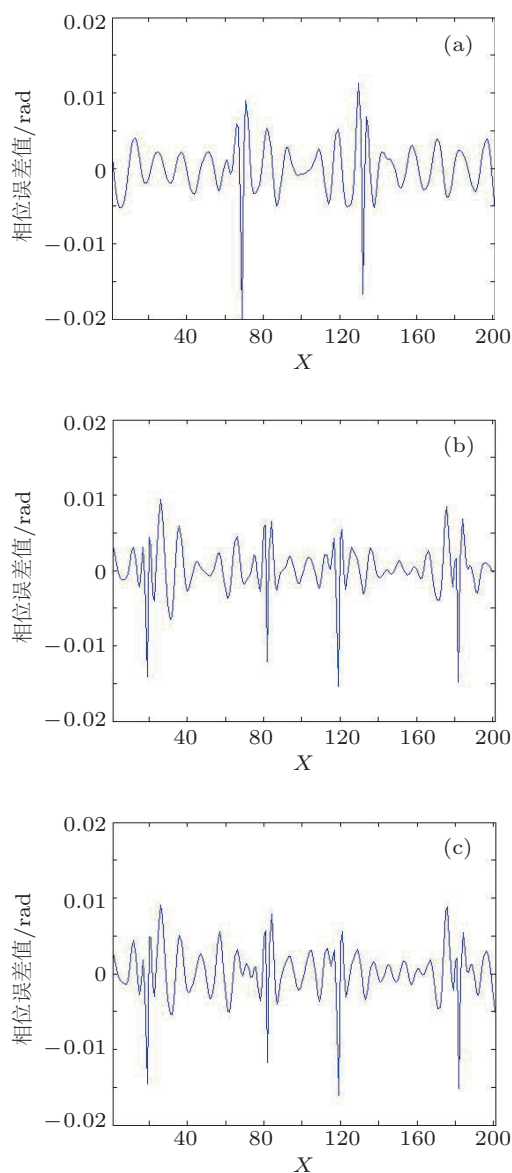


图6 图5各误差分布沿 X 轴的横截线分布图 (a) 0° 视角; (b) 60° 视角; (c) 120° 视角

图7所示, 其中 BE 为空间滤波器, M 为反射镜, MO 为显微物镜. 激光光源经扩束、滤波、准直, 通过消偏振分光棱镜 NBS1 后反射光束 4 经 NBS2 分为两束光波, 一束作为参考光波, 另一束光波照射被测样本, 记为物光波 O_1 (0° 视角). NBS1 的透射光束经 NBS3 分为光束 5、光束 6, 分别照射被测样本, 记为物光波 O_2 (60° 视角), 物光波 O_3 (120° 视角). 三束物光波分别与参考光波 R 离轴干涉生成单幅层析全息图, 由 CCD 记录.

激光光源波长为 664.2 nm, CCD 的像素量为 1392×1040 , 像素尺寸为 $4.65 \mu\text{m}$. 为更好地分析各向投影的记录及重建效果, 被测样本选用具有

周期结构的透明光栅, 光栅周期为 $100\ \mu\text{m}$, 显微镜 MO 放大倍率为 20.

图 8 为记录的单幅层析全息图, 图 9 为图 8 所

对应的频谱图, 可见频谱图分布特点符合上文模拟分析结果, 即由于物光波 O_1, O_2, O_3 与记录参考光波 R 的夹角不同, 各项信息频谱成分相互分离.

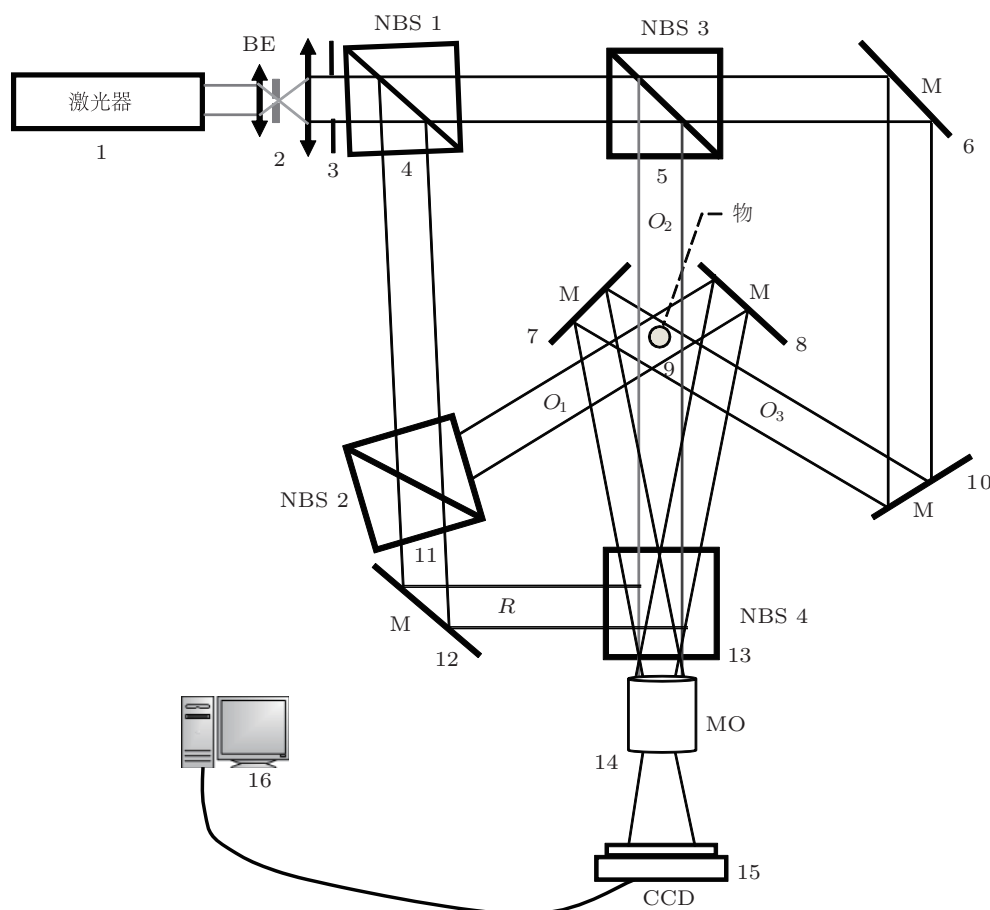


图 7 Mach-Zender 数字单幅离轴层析全息图光学记录系统示意图

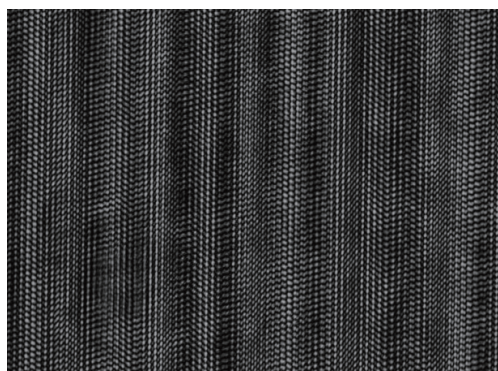


图 8 数字单幅离轴层析全息图

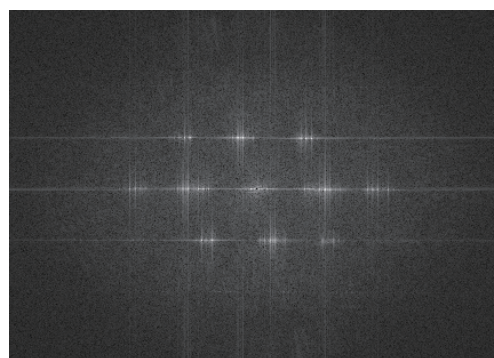


图 9 图 8 所示单幅离轴层析全息图的频谱图

分别取出 O_1, O_2, O_3 的频谱, 采用卷积算法进行全息图数值重建. 三束物光波重建相位分布如

图 10 所示. 图 11 则分别为图 10 中各相位图沿 X 轴的横截线分布.

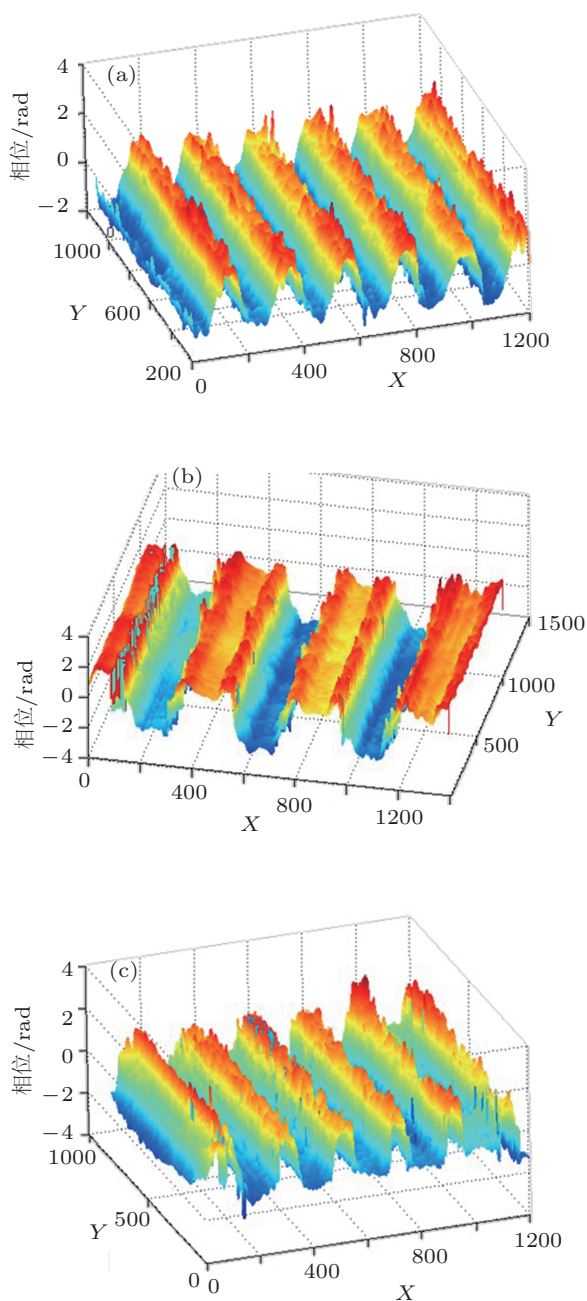


图 10 全息图数值重建光栅三束物光波相位图 (a) 0° 视角; (b) 60° 视角; (c) 120° 视角

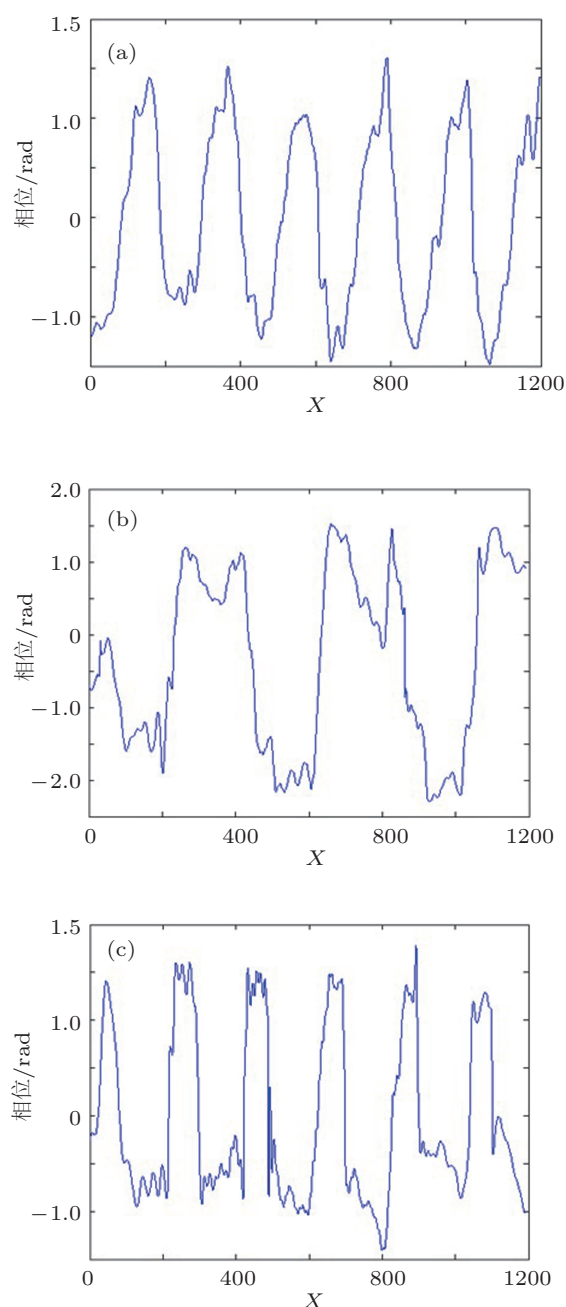


图 11 图 10 中各相位图沿 X 轴的横截线分布 (a) 0° 视角; (b) 60° 视角; (c) 120° 视角

4.2 实验结果分析

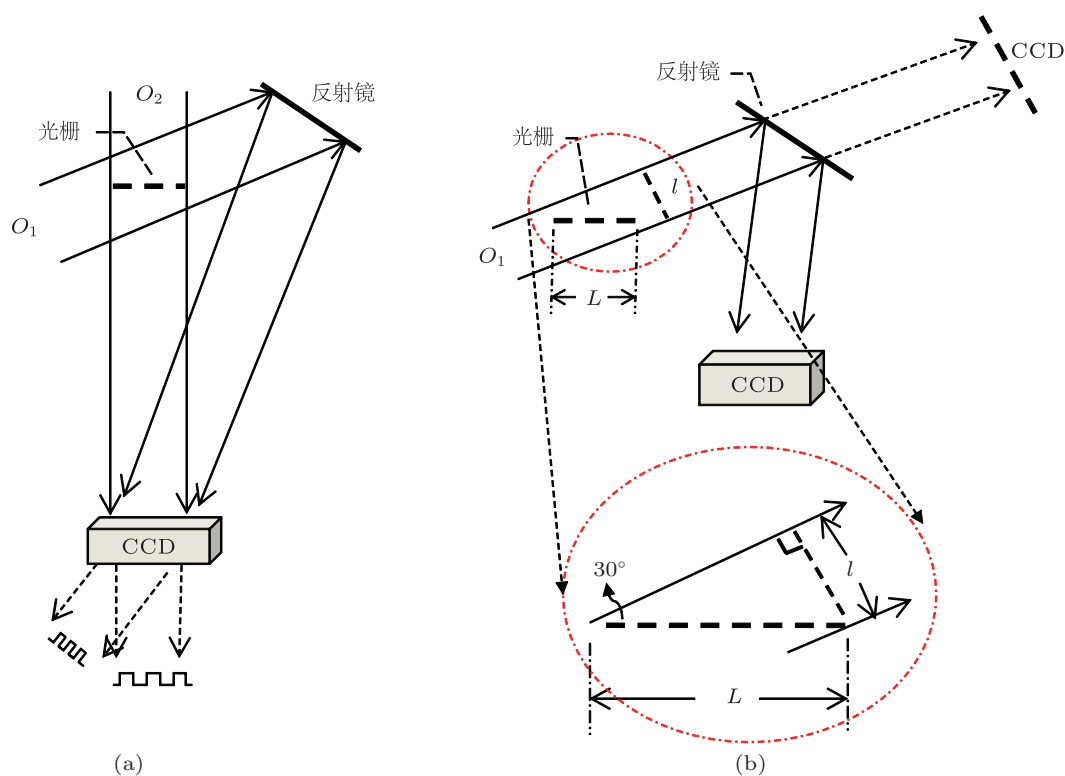
从图 10 可看出, 虽然三束物光波来自同一个被测样本, 但重建所得光栅的周期并不相同, 下文针对每束物光波的入射角度分析其原因.

图 12 是物光波 O_1 和 O_2 的光路示意图, 物光波 O_2 正面垂直入射光栅, 物光波 O_1 从左侧入射光栅. 两束物光波光轴夹角为 60° , 物光波 O_1 与光栅表面夹角为 30° (物光波 O_3 光路分析同

物光波 O_1 , 在此不赘述). 现设样本光栅实际长度为 L , 在物光波 O_1 光轴垂直面上的投影长度为 l , 则有 $l = L \times \cos 60^\circ = 0.5L$, 所以若三束重建物光波的周期分别为 T_1, T_2, T_3 , 则理想条件下有 $T_1 = 50 \mu\text{m}, T_2 = 100 \mu\text{m}, T_3 = 50 \mu\text{m}$.

现根据图 12 所示重建相位的横截线分布计算三束物光波的实际周期, 计算公式为

$$T = \frac{N \times L_0}{n}, \quad (9)$$

图 12 物光波 O_1 和物光波 O_2 的光路图 (a) 光路示意图; (b) 光路分析图

其中 N 为 CCD 中一个光栅周期宽度所占像素个数, L_0 为像素的实际尺寸, n 为放大倍数. 根据 (10) 式可计算得到 $T_1 = 48.244 \mu\text{m}$, $T_2 = 96.255 \mu\text{m}$, $T_3 = 47.43 \mu\text{m}$, 即所得各重建光栅周期基本符合实际参数, 但存在约 4%—5% 的重建误差. 误差主要在于物光波彼此之间的干涉噪声影响了全息图数值重建质量, 从而导致重建光栅相位分布为非规则正弦分布, 最终使得波峰像素点的取值并不精确.

5 结论

本文定义了单幅层析全息图, 并开展了数字离轴单幅层析全息图记录及重建的模拟分析和实验研究, 分析及研究结果表明: 基于多向投影光束和

一个 CCD 的单幅层析全息图的记录是可以实现的, 光路系统布局的难点在于既要考虑四束光波彼此存在夹角, 也要考虑 CCD 有限的感光面; 由于各光束彼此离轴, 所以可以采用频域法实现有效物光波的频谱提取, 模拟分析和实验研究结果均表明本文思路的正确性及可行性; 多束物光波的实时记录影响全息图数值重建质量. 本文下一步的工作中需要对提高单幅层析全息图再现质量进行研究, 比如引入压缩传感理论. 数字全息图数值重建能获得被测物体的轮廓信息, 该轮廓信息承载的是被测物体内部的平均效果, 而不是被测物体内部的实际参数 (结构), 若利用三维层析重建算法对全息图重建结果进一步解调, 才能获得投影路径上每个单点数值, 即被测物体内部的性能参数.

- [1] Timur E G, Yakov L N, Konstantin M P, Stephen W W 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **24** 2230
- [2] Bergoend I, Pavillon N, Charriere F, Depeursinge C 2009 *3rd EOS Topical Meeting on Optical Microsystems Capri, Italy*, September 27–30, 2009 p1
- [3] Colomb T, Kuhn J, Charriere F, Depeursinge C, Marquet P, Aspert N 2006 *Opt. Express* **14** 4300

- [4] Colomb T, Charriere F, Kuhn J, Bellouard Y, Depeursinge C 2007 *Optical Society of America Vancouver, Canada*, June 18, 2007 p6
- [5] Massatsch P, Charriere F, Cuche E, Marquet P, Depeursinge C 2005 *Appl. Opt.* **44** 1806
- [6] Yu L F, Chen Z P 2007 *Opt. Lett.* **32** 3005
- [7] Montfort F, Colomb T, Charriere F, Kuhn J, Marquet P, Cuche E, Herminjard S, Depeursinge C 2006 *Appl. Opt.* **45** 8209

- [8] Zhou W J, Hu W T, Guo L, Xu Q S, Yu Y J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8499 (in Chinese) [周文静, 胡文涛, 郭路, 徐强胜, 于瀛洁 2010 物理学报 **59** 8499]
- [9] Zhou W J, Hu W T, Yu Y J, Asundi A 2010 *The International Conference on Experiment Mechanics* Kuala Lumpur, Malaysia, November 29–December 1 2010 p150
- [10] Schnars U, Juptner W 2002 *Meas. Sci. Technol.* **13** 85
- [11] Charriere F, Marian A, Montfort F, Kuehn J, Colomb T, Cuhe E, Marquet P, Depeursinge C 2006 *Opt. Lett.* **31** 178
- [12] Herman G T 1980 *Image Reconstruction from Projections: The Fundamentals of Computerized Tomography* (New York : Academic Press)
- [13] Zhuang T G 1992 *CT Principle and Algorithm* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press) (in Chinese) [庄天戈 1992 CT 原理与算法 (上海: 上海交通大学出版社)]
- [14] Zysk A M, Reynolds J J, Marks D L, Carney P S, Boppart S A 2003 *Opt. Lett.* **28** 701
- [15] Yuan C J, Zhai H C, Wang X L, Wu L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 218 (in Chinese) [袁操今, 翟宏琛, 王晓雷, 吴兰 2007 物理学报 **56** 218]
- [16] Wang L Y, Li L, Yan B, Jiang C S, Wang H Y, Bao S L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 088106

Recording and numerical reconstruction of single digital tomographic hologram*

Zhou Wen-Jing[†] Hu Wen-Tao Qu Hui Zhu Liang Yu Ying-Jie

(Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

(Received 22 December 2011; revised manuscript received 19 January 2012)

Abstract

In this paper, we study the single tomographic hologram (STH). We first define the STH and analyze the frequency spectrum of the STH containing three projections, then perform the simulation analysis including the digital recording, information separation and numerical reconstruction of the STH, and finally we rebuild an experimental setup to record the single tomographic hologram from three projections. A phase grating with 100 μm period is used as a test sample. The reconstructed period error of grating is between 4%–5%. Both simulation analyse and experimental results demonstrate the feasibility and validity of the STH. In the next work, the improvement of the reconstruction quality for single digital tomographic hologram will be discussed.

Keywords: digital holographic tomography, three projections, single digital tomography

PACS: 42.40.Kw, 42.30.Wb

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61107004), the Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission of China (Grant No. 12zz088), the Innovation Fund for Graduates of Shanghai University, China (Grant No. SHUCX112201), and the Mechatronics Engineering Innovation Group Project from Shanghai Education Commission, China.

[†] E-mail: lazybee@shu.edu.cn