

## 基于正交全息的台阶相位原位重建\*

郝爱花<sup>†</sup> 黄静燕 张世纪 王志俊 王笑龙

(西安邮电大学电子工程学院, 西安 710061)

(2024 年 11 月 23 日收到; 2024 年 12 月 15 日收到修改稿)

滤波技术是数字离轴全息精确相位重建的关键. 由于 CCD 分辨本领和离轴全息技术本身的限制, 台阶型相位物体在全息滤波过程常常伴随频谱损失、频谱混叠, 以及全息图被截取非整数周期时的频谱泄漏问题. 目前频域滤波在针对单幅全息图的自适应滤波方面已有很多研究, 但上述问题都无法得到根本解决. 本文在分析一维空间滤波成像特性的基础上, 提出了一种在对两个正交全息图分别进行一维傅里叶变换和一维全谱滤波的基础上, 对重构的物光波利用泊松方程进行精确相位解缠绕的相位原位重建技术. 该方法从根本上避免了滤波引起的频谱损失、频谱混叠和频谱泄漏问题, 且运算过程简单、重建精度高、适合于任何形状台阶物体的三维轮廓重建, 为离轴全息的高精度相位重建提供了切实可行的途径.

**关键词:** 数字全息, 台阶相位, 原位重建**PACS:** 42.30.-d, 42.30.Rx, 42.40.Kw**DOI:** 10.7498/aps.74.20241629**CSTR:** 32037.14.aps.74.20241629

## 1 引言

数字全息对相位变化敏感, 常作为微小物体形貌测量技术的理想选择. 数字全息的相位提取技术可以大致分为两类: 一类是时间相移 (temporal phase-shifting, TPS) 法<sup>[1-3]</sup>, 另一类则是空间载波法, 具体处理手段又分为空间载波相移 (spatial carrier-frequency phase shifting, SCPS) 法<sup>[4,5]</sup>和傅里叶变换法 (Fourier transform method, FTM)<sup>[6-19]</sup>. TPS 是一种较为成熟的光学波前相位测量方法, 一般需要借助压电陶瓷等位移元件引入定量的相移, 捕捉 3 幅以上的相移干涉图像. 由于相移参量引入, TPS 的空间相位提取相对容易, 但相移不准确时会引入 2 倍于干涉条纹空间频率的相位误差<sup>[20]</sup>. 此外, 对振动和湍流比较敏感, 不能在动态环境进行相位测量. 空间载波技术具有从单幅全息图中提取相位信息的能力, 适时性好. 其中, SCPS 技术可

以认为是 TPS 技术在空间相位测量中的直接应用, 需要恰当的载波频率引入固定的条纹相移, 如每个像素相移  $\pi/2$  rad. 因此, 频率不准确也会产生残余相位误差, 这一点很考验硬件技术水平. 实际研发过程中, 通常采用 FTM 技术. FTM 是一种频域处理技术, 通过滤波技术提取出一级频谱, 而后反演出物波相位, 方法相对简单、快速.

滤波技术是实现 FTM 准确相位提取的关键, 目前在自适应滤波方面已有很多研究, 如通过种子点区域生长<sup>[6]</sup>、通过全局阈值迭代<sup>[7]</sup>、通过直方图阈值<sup>[8]</sup>、小波变换及形态学<sup>[9]</sup>、主成分分析<sup>[10]</sup>等方法, 以及在自适应滤波的基础上进行高斯滤波、巴特沃斯滤波<sup>[11]</sup>、加权滤波<sup>[12]</sup>、自适应双边滤波<sup>[13]</sup>、自适应中值滤波<sup>[14]</sup>、压缩感知稀疏采样<sup>[15,16]</sup>等方法弱化噪声和振铃效应. 由于受 CCD 分辨本领的限制, 实际的全息图的频谱通常离得比较近, 所有这些方法都不可避免地伴随着频谱混叠、滤波高频损失和频谱搬移过程中的频谱泄漏<sup>[21]</sup>等问题. 近年来, 随着机器学习等先进技术的引入, 出现了利

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12304329) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: haoaihua@xupt.edu.cn

用卷积神经网络的滤波窗口优化设计<sup>[17]</sup>、基于无监督机器学习的  $K$  均值聚类的空间滤波方法<sup>[18]</sup>、以及深度学习和传统数字图像处理相结合的滤波方法<sup>[19]</sup>, 这些方法一定程度上优化了滤波方法, 依然不可比避免地存在频谱损失和频谱泄漏问题. 此外, 模型训练过程是个相当耗时耗力的过程, 且一般不具备不同种类样本的普适性. 本文根据一维傅里叶变换及频谱特点和泊松方程相位求解方法, 提出了一种通过两个正交全息图实现频谱无损、相位原位重建的离轴数字全息相位重建方法.

## 2 理论和方法

### 2.1 空间滤波对台阶相位重建精度的影响

研究台阶的一维分布情况, 令台阶宽度为  $a$ , 间距为  $d$ , 高度相位为  $\varphi_1 - \varphi_0$ , 不失一般性, 令台阶处的振幅为  $A_1$ , 凹陷处的振幅为  $A_0$ , 物面宽度为  $L$ , 建模反射光场分布为

$$t(x) = [A_1 \exp(j\varphi_1) - A_0 \exp(j\varphi_0)] \times \left[ \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \frac{1}{d} \text{comb}\left(\frac{x}{d}\right) \right] \text{rect}\left(\frac{x}{L}\right) + A_0 \exp(j\varphi_0) \text{rect}(x/L), \quad (1)$$

式中, 第 2 项为背景项, 可视作常数. 从 (1) 式可以看出, 台阶相位仅仅是矩形函数前面的复常数, 故台阶相位的恢复精度完全取决于台阶轮廓的恢复精度, 台阶变形时, 原本没有相位的地方也变得有了相位. 因此, 理论上追求相位精度的问题就转换成了追求空间高分辨的问题.

傅里叶变换后物体的频谱为

$$T(f_x) = aL [A_1 \exp(j\varphi_1) - A_0 \exp(j\varphi_0)]/d \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{an}{d}\right) \text{sinc}\left[L\left(f_x - \frac{n}{d}\right)\right] + A_0 \exp(j\varphi_0) \delta(f_x), \quad (2)$$

主瓣内包含的谱线个数由占空比  $d/a$  决定. 为了分析不同占空比、不同滤波宽度对相位重建产生的影响, 我们用平均绝对误差  $\eta = \sum_{i=1}^N |t'(x) - t(x)|/N$  作为相似度评估参量. 仿真过程中, 激光波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 焦距  $f = 150 \text{ mm}$ ,  $L = 1 \text{ mm}$ ,  $d = 200 \text{ }\mu\text{m}$ , 即取 5 个台阶, 总采样点个数  $N = 1024$ ,  $a = n \times 20 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots, 9$ , 对应台阶占空比 10%—90%, 模拟的平均绝对误差曲线如图 1 所示.

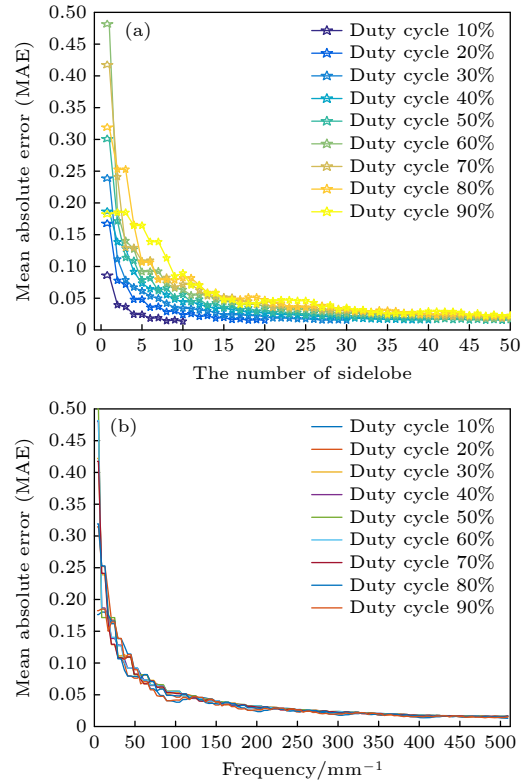


图 1 不同占空比下的平均绝对误差随 (a) 旁瓣数和 (b) 空间频率的变化

Fig. 1. Variation of average absolute error with (a) the number of side lobes and (b) the spatial frequency at different duty cycles.

图 1(a) 中, 滤波窗口  $B_x = 2k\lambda z/a$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots, 50$ , 即以旁瓣个数为横坐标模拟的平均绝对误差. 可以看出, 针对相同 CCD 像素尺寸的分辨本领限制, 不同台阶占空比对应的最大滤波旁瓣数是不同的. 按照前述模拟参数, 10% 的占空比对应最大旁瓣数为 10, 20% 占空比对应最大旁瓣数为 20, ……., 但是不难发现, 无论旁瓣多少 CCD 分辨本领对应的平均绝对误差都是相等的, 约 0.015 (由于模拟过程中台阶轮廓高度为 1, 故相对误差约 1.5%), 即 CCD 全谱滤波也不能完全保留物体的频谱信息. 这一点, 也反映在图 1(b) 中, 图中滤波窗口以频率为单位,  $B_x/2 = 1-512 \text{ mm}^{-1}$ , 可以看出, 不同占空比的误差曲线随空间频率的变化趋势基本一致.

此外, 离轴全息图记录过程中, 考虑零级项和共轭项的干扰, 以及香农定理的限制, 实际我们的参考光频率通常在 CCD 决定的最大频率的 1/4 处, 滤波带宽约为最大频率的 1/12, 图中对应  $512/12 \approx 43 \text{ mm}^{-1}$ , 此时对应的相对误差约 10% 左右. 这种情况滤波重建后的图像 Gibbs 效应显著, 平滑滤波

后细节信息丢失, 边缘出现模糊, 微小结构甚至无法分辨, 这些都是传统滤波固有的缺陷.

## 2.2 正交全息台阶相位重建原理

根据离散傅里叶变换的定义, 对二维函数进行

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= |O(x, y)|^2 + |R_1(x, y)|^2 + O^*(x, y)R_1(x, y) + O(x, y)R_1^*(x, y) \\ &= I_O(x, y) + I_R + 2\sqrt{I_O(x, y)I_R} \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} [\text{OPD}(x, y) - y \sin(\theta_{z1})] \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} I_2(x, y) &= |O(x, y)|^2 + |R_2(x, y)|^2 + O^*(x, y)R_2(x, y) + O(x, y)R_2^*(x, y) \\ &= I_O(x, y) + I_R + 2\sqrt{I_O(x, y)I_R} \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} [\text{OPD}(x, y) - x \sin(\theta_{z2})] \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $I_1$  形成的是水平方向的干涉条纹,  $I_2$  形成的是竖直方向的干涉条纹,  $O(x, y)$  为物光波,  $R(x, y)$  为参考光波,  $I_O(x, y)$  和  $I_R$  分别为物光强和参考光强,  $\text{OPD}(x, y)$  为物体表面光程差. 两个方向的参考光偏离角分别为  $\theta_{z1}$  和  $\theta_{z2}$ . 对两个离轴全息图沿垂直于条纹方向进行一维傅里叶变换可得

$$\begin{aligned} F_{1D}(x, \nu) &= \frac{1}{M} \sum_{y=0}^{M-1} I_1(x, y) \exp(-j2\pi \frac{\nu y}{M}), \\ F_{1D}(u, y) &= \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} I_2(x, y) \exp(-j2\pi \frac{ux}{N}). \end{aligned} \quad (5)$$

此时, 可以对一维频谱  $F_{1D}(x, \nu)$  和  $F_{1D}(u, y)$  进行一维全谱段滤波 (即让平行于条纹方向的频谱全部通过), 提取+1级谱, 使频谱中心化, 再进行一维反傅里叶变换则可以恢复物函数  $\hat{O}_1(x, y)$  和  $\hat{O}_2(x, y)$ .

$$\begin{aligned} \hat{O}_1(x, y) &= \text{IFFT} \{ \text{Filter} [F_{1D}(x, \nu)] \}, \\ \hat{O}_2(x, y) &= \text{IFFT} \{ \text{Filter} [F_{1D}(u, y)] \}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, Filter 表示一维全谱段滤波, IFFT 表示一维反傅里叶变换.

此时两个物函数沿条纹方向的分布应遵循原物函数原位分布, 没有受到空间频率滤波的影响, 包括高频信息损失、频谱泄漏、频谱混叠等. 对物函数  $\hat{O}_1(x, y)$  提取梯度相位  $\Delta\varphi(x) = \varphi_1(x + \Delta x, y) - \varphi_1(x, y)$ , 对  $\hat{O}_2(x, y)$  提取梯度相位  $\Delta\varphi(y) = \varphi_2(x, y + \Delta y) - \varphi_2(x, y)$ , 即可构建离散泊松方程, 用经典的余弦变换求解展开相位的最小二乘解<sup>[22]</sup>.

## 2.3 实验光路

离轴全息的记录光路如图 2 所示. He-Ne 激光

一维傅里叶变换时只在一维方向进行积分, 另一维保持不变. 以 CCD 靶面建立  $XOY$  坐标系, 靶面边缘平行于  $X$  轴和  $Y$  轴, 靶面中心法线平行于  $Z$  轴, 令两列参考光波的离轴角分别位于  $XOZ$  和  $YOZ$  平面, 物光波主光线平行于  $Z$  轴, 记录两幅干涉条纹相互正交的全息图, 强度分布表示如下:

器发出光束经空间滤波器 SF 滤波, 滤波针孔形成的点光源经会聚透镜 L1 和 5:5 分光棱镜 BS, 分别将点光源成像于显微物镜 MO1 和 MO2 的前焦点. 显微物镜 MO1, MO2 将光束准直, 入射到物体 Object 和反射镜 Mirror. 从物面反射的光经 MO1 和 L2 组合成像到 CCD 靶面, 从反射镜反射的光经 MO2 和 L2 扩束, 形成参考光束. 由于 MO1 和 MO2 关于 BS 对称放置, 物镜球差得到相互补偿, 最终在 CCD 靶面形成干涉直条纹. Mirror 镜架后有二维调节旋钮, 可以控制反射镜的倾斜方位, 进而控制干涉条纹的方位和密度, 最终生成两幅干涉条纹密度合理、相互正交的全息图.

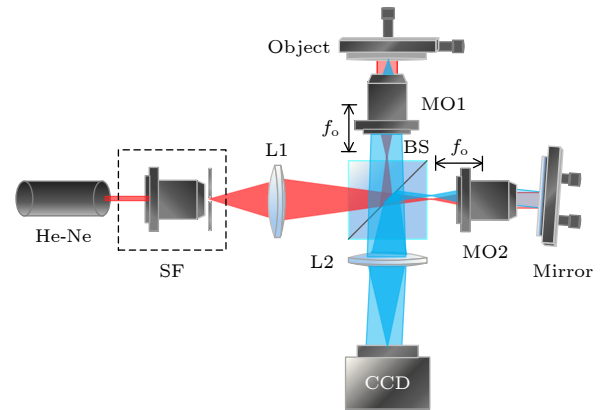


图 2 正交全息记录光路 (He-Ne 为氦氖激光器, SF 为空间滤波器, L1 和 L2 为透镜, BS 为 5:5 分光棱镜, MO1 和 MO2 为显微物镜, CCD 为电荷耦合器件, 返回光束用蓝色表示)

Fig. 2. Optical configuration for recording two orthogonal holograms. He-Ne represents helium-neon laser, SF represents spatial filter, L1 and L2 represent lens, BS represents 5:5 beam splitter, MO1 and MO2 represent microscope objective, CCD represents charge-coupled device, the return light is shown in blue.

## 2.4 相位重建算法

相位重建算法用到了一维傅里叶变换 (one-dimensional fast Fourier transform, 1DFFT) 和一维重采样两种技术. 假设记录第 1 幅全息图的参考波位于  $XOZ$  平面, 与沿  $Z$  轴传播的物光波干涉形成平行于  $Y$  方向的干涉条纹. 为了滤波窗口近似为矩形, 首先沿条纹方向对全息图进行 4 倍下采样, Girshovitz 和 Shaked<sup>[23,24]</sup> 指出合理的下采样不会对图像的重建质量产生影响. 对下采样后的全息图沿  $X$  轴完成 1DFFT、+1 级频谱提取、中心频移等一系列操作, 而后对中心位于坐标原点的 +1 级频谱进行一维反傅里叶变换 (one dimensional inverse fast Fourier transform, 1DIFFT), 重建物光波, 最后再沿  $Y$  方向 4 倍上采样还原物光波大小. 整个过程物体  $Y$  方向的结构信息并没有受到滤波的影响, 原位保留. 同理, 当参考光在  $YOZ$  平面, 与  $X$  轴夹角  $90^\circ$ , 则形成条纹平行于  $X$  方向的全息图, 经重采样及频域滤波还原后, 原位保留了  $X$  方向的物体结构信息. 具体重建流程图如图 3 所示, 图右列是干涉条纹为  $Y$  方向的全息图在重建过程中的每一步的结果示意图.

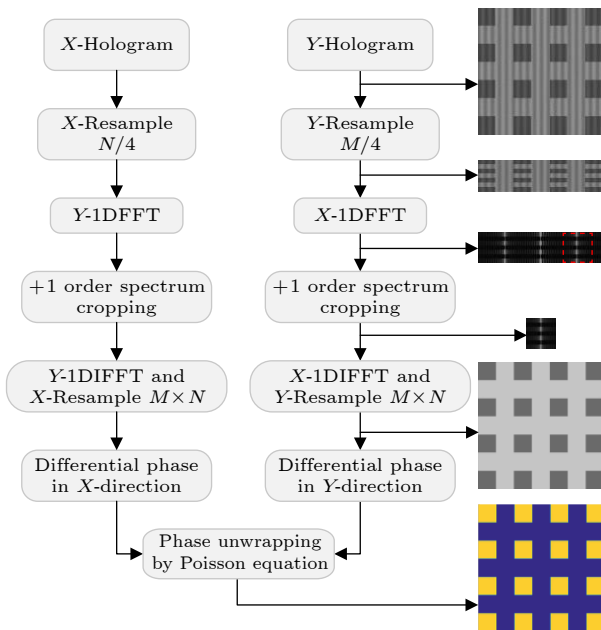


图 3 基于两个正交全息图的频谱无损相位重建算法, 其中右边一列的图形对应条纹平行于  $Y$  方向的全息图的分步运算结果, 最后一个图为二维相位解缠绕的结果

Fig. 3. Phase reconstruction algorithm without spectral losses based on two orthogonal holograms. The images in the right column correspond to the results for the  $Y$ -hologram at each step and the last image shows the two-dimensional unwrapped phase.

## 3 实验及结果

### 3.1 理想样本仿真实验

为了验证该方法的普适性, 构造了包含齿轮、圆形、V 形、菱形、水滴形、六边形、五角星等不规则图形的图形集. 相位高度设为 2 rad, 对应波长 632.8 nm 时台阶高度为 100 nm. 仿照实际 CCD 的大小, 设图像大小  $1024 \times 1024$ , 像素尺寸  $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ , 若全息图 +1 级频谱位于右半频谱中间位置, 则对应参考光的离轴角  $\theta_z = 2.34^\circ$ . 采用经典的区域识别滤波方法 (region-recognition filtering method, RRFM) 和本文提出的频谱无损相位重建方法 (spectral lossless phase reconstruction, SLPR) 分别对标准样本进行全息记录和重建. 出于条件一致性考虑, 两种方法都没有附加额外的高斯或巴特沃斯以及相位滤波.

重建结果如图 4 所示. 图 4(a) 为 RRFM 重建结果, 图 4(b) 为图 4(a) 中白色虚线对应的相位剖面图, 可以看出高/宽比较大的区域波动很厉害, 不能很好地进行高度相位数值读取; 图 4(c) 为 SLPR 重建的结果图, 相应的图 4(d), (e) 为图 4(c) 中红、黑十字线对应的相位剖面图. 很容易看出, 相比 RRFM, SLPR 图像清晰, 台面相位波动小, 对于高/宽比较大的狭窄区域也能较好地读取相位信息, 台阶高度与理想值保持了高度一致. 需要注意的是, 虽然 SLPR 相位解缠绕后极大地保留了物体原有信息, 高频信息丰富, 但存在边缘跳变, 可以通过中值滤波缓解.

### 3.2 标准板和硅晶片实验

实验中采用 632.8 nm, 1 mW 的 He-Ne 激光器, 焦距  $f_1 = 100$  mm 的透镜 L1, 焦距  $f_2 = 150$  mm 的透镜 L2 和焦距  $f_0 = 35$  mm 显微物镜 MO1, MO2 ( $4\times/0.1$  NA). 经标定 MO1 和 L2 的组合放大倍率约为 5.768 倍, 其中显微物镜 MO1 成放大的虚像, L2 成缩小的实像. 光电传感器选用 MER-132-30GM CCD, 大小为  $964 \times 1292$ , 像素尺寸  $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ . 为了证明该方法在实践中的有效性, 分别对台阶高度为 240 nm 的半导体硅晶片和台阶高度为 100 nm 表面镀铬的 USFA1951 标准分辨率板进行实验, 同样对 RRFM 和 SLPR 两种方法进行比对. 硅片检测结果如图 5 所示.

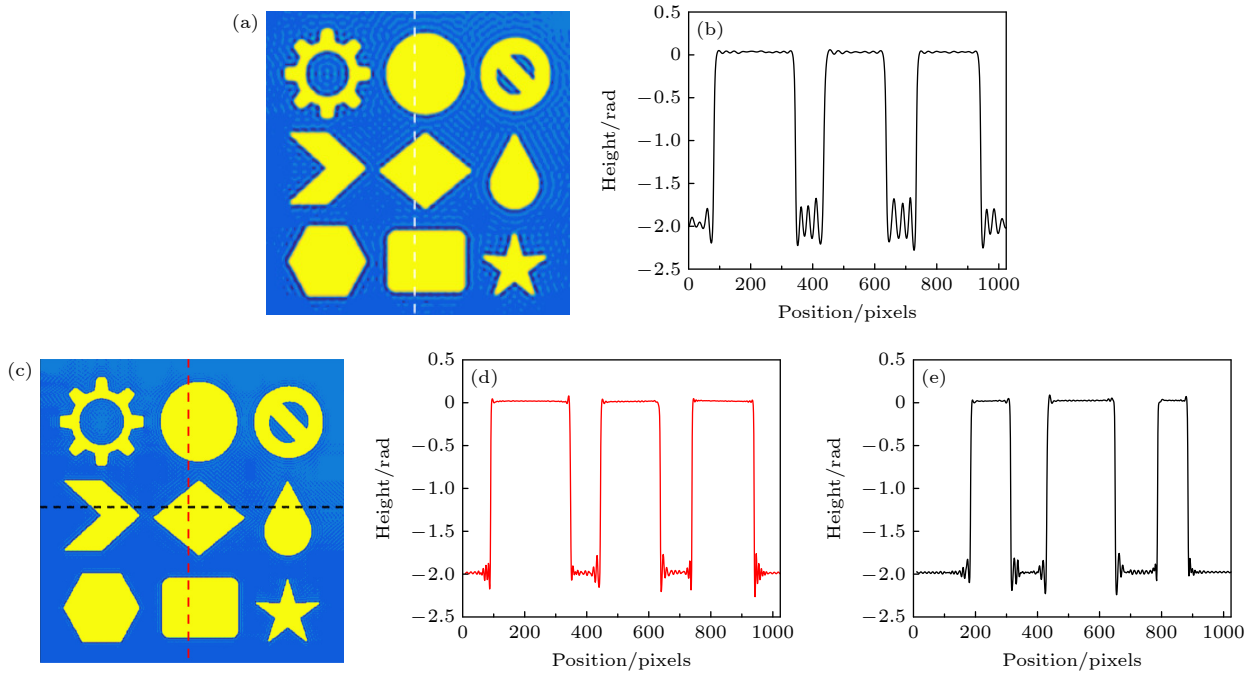


图 4 不规则图形重建结果 (a) RRFM 方法重建的相位; (b) 图 (a) 中白色虚线位置处的剖面线; (c) SLPR 方法重建的相位; (d), (e) 图 (c) 中红线和黑线位置对应的轮廓线

Fig. 4. Results of irregular image reconstruction: (a) The reconstructed phase image by FFRM; (b) the section line at white dashed line in panel (a); (c) the reconstructed phase image by SLPR; (d), (e) the profile lines at the position indicated by the red and black lines in panel (c).

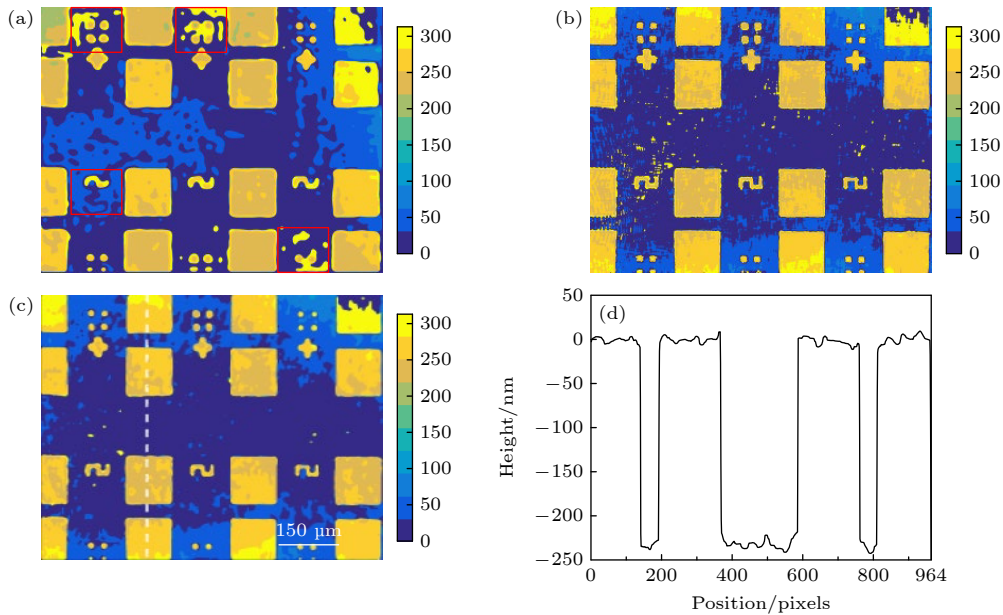


图 5 硅片相位重建 (a) RRFM 方法重建的相位; (b) SLPR 方法重建的相位; (c) 图 (b) 中值滤波后的结果; (d) 图 (c) 中白色虚线位置的轮廓图

Fig. 5. Results of wafer phase reconstruction: (a) The phase image reconstructed by RRFM; (b) the phase image reconstructed by SLPR; (c) the output of median filtering in panel (b); (d) the profile map at white dashed line in panel (c).

图 5(a) 是 RRFM 方法的相位图像重建结果, 滤波窗口为矩形窗口, 边长与 SLPR 中的一维滤波窗口宽度一致, 均为 60 pixels. 可以看出: RRFM 方法在多个区域出现了错误解相, 出现了较大斑块

且粘连; 此外, 数字也有变形, 图中已用红色矩形框出. 图 5(b) 是 SLPR 方法的相位重建结果. 可以看出: 硅片轮廓清晰、图像逼真, 无错误解相, 数字无变形; 但该方法经过两幅全息图进行相位解缠,

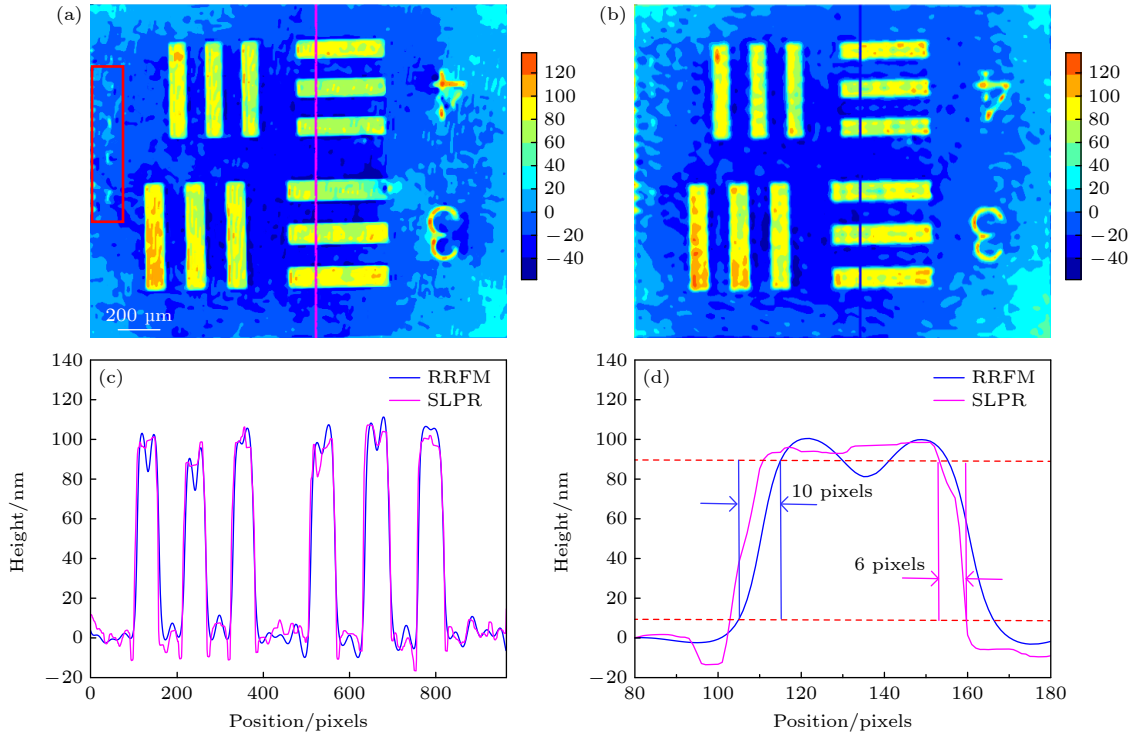


图 6 USAF1951 标准板相位重建 (a), (b) SLPR 和 RRFM 方法的重建相位图; (c) 图 (a), (b) 中相同位置的轮廓线, 分别对应图中洋红和蓝色线条位置; (d) 图 (c) 中第 1 个台阶的放大图

Fig. 6. Phase reconstruction of USAF1951 target: (a), (b) The reconstructed phase images by SLPR and RRFM; (c) the profile lines at the position indicated by the magenta line in panel (a) and blue line in panel (b); (d) the enlarged view of the first step in panel (c).

导致随机噪声有所累加, 噪声点较多. 为了滤去噪声和边缘跳变, 并极大程度保留图像原有信息, 实验中采用逐级中值滤波的方式, 滤波核从  $3 \times 3$  开始, 循环 7 次, 结果如图 5(c) 所示, 有效消除噪点. 图 5(d) 中的剖面线与图 5(c) 中的虚线对应, 曲线上的毛刺和边缘尖峰已经去除, 平均高度与标定结果基本一致.

USFA1951 标准分辨率板检测结果如图 6 所示. 成像区域为第 1 组的 3-4 区域, 为了获得合适的成像区域, 调整物、像距使得综合放大倍率为 2.438 倍, 由于标准分辨率板是在玻璃基底上镀金属铬制成的, 表面相对粗糙, 相干成像时噪声较大. 图 6(a), (b) 分别是 SLPR 和 FFRM 重建的相位图片, 图 6(c) 将图 6(a), (b) 中相同位置处的相位剖面轮廓图放在一起进行比较, 分别对应图中洋红和蓝色线条位置, 图 6(d) 为图 6(c) 中第 1 个台阶的放大图. 从相位图可以看出, SLPR 方法所得相位图中左边红色线框框出的部分可以看到部分数字和条纹细节, FFRM 方法重建的相位图未看到, 故 SLPR 方法分辨率高一些. 图 6(c) 轮廓线中, SLPR 方法重建的高度曲线整体陡峭些, 表明台阶边缘还

原性好. 如图 6(d) 所示, 上下取台阶高度 90% 和 10% 之间的台阶上升宽度进行比较, SLPR 为 6 pixels, 而 RRFM 为 10 pixels. 显然, SLPR 方法重建的台阶更加锐利.

#### 4 一维滤波对 SLPR 相位重建精度的影响

假设物函数用  $O(x, y) = A_o(x, y) \exp[j\varphi(x, y)]$  来表示, 经一维滤波、反傅里叶变换后得到重建光场:

$$\hat{O}(x, y) = A_o(x, y) \exp[j\varphi(x, y)] * h(x, y), \quad (7)$$

其中  $h(x, y)$  为与滤波器相关的点扩散函数,

$$h(x, y) = F^{-1} \left\{ \text{rect} \left( \frac{f_x}{L_x} \right) \right\} = L_x \text{sinc}(L_x x) \delta(y). \quad (8)$$

滤波后  $Y$  方向的脉冲响应为理想脉冲函数. SLPR 正是利用了这个理想脉冲响应进行物体相位重建, 原则上其结构信息没有遭到任何破坏, 尤其是边缘信息. 然而从 (8) 式不难发现,  $X$  方向的卷积一定程度上会影响  $Y$  方向的数值大小. 就如一块玻璃砖立方体经过打磨变成柱透镜一样, 只在

一维方向进行打磨, 另一维方向的形状不变, 切面依然为矩形, 但其整体高度会受到打磨的影响. 实际上, 滤波恰当的情况下此影响很小. 因此, SLPR 算法对结构分辨本领的提升具有绝对优势, 但台阶边沿的分辨本领会受到空间滤波的影响. 具体表现为: 横向滤波使得台阶的横向边缘一定程度被平滑, 但纵向滤波很好地保留了台阶的横向边缘, 这使得二维相位解缠绕时边缘出现了一定的不连续, 引起跳变, 如图 4(d), (e) 所示, 这一问题实验中通过中值滤波得到较好的缓解. 总得来说, SLPR 极大地提高了台阶相位的解相精度, 使得: 1) 基本实现了重建物体的原位信息重建, 相比 FFRM, 解相后的台阶中间平坦, 几乎没有波动, 边沿陡峭; 2) 避免了传统方法滤波引起的错误解相; 3) 实验过程中一维滤波窗口大小选取无特殊要求, 约 1/24 CCD 分辨本领大小的窗口依然可以得到较为完美的结果, 该操作具有很好的鲁棒性, 给实验带来了很大便利. 此外, 虽然该方法需要获取两幅图, 相比传统离轴全息图的单幅图采集, 随机噪声进行了累加, 但基于随机噪声的散点特性, 其很容易通过中值滤波进行滤除, 基本不破坏原有的图像信息. 对表面粗糙, 噪声较大的物体, 该方法优势不明显.

## 5 结 论

本文针对当前数字全息滤波技术中存在的确定性问题的不确定性问题, 如频谱损失、频谱泄露、频谱混叠等, 通过构建两幅干涉条纹相互正交的全息图, 通过一维傅里叶变换、一维滤波保留物体另一维方向的完整信息, 并通过泊松方程求解二维相位分布, 最终构建频谱无损的物体原位相位信息, 实现高分辨三维轮廓重建. 该方法简单、有效, 且适应于任何形状的台阶物体, 适用范围广. 此外, 对台阶高度较大, 需要相位矫正的物体, 能很好地避免错误解相. 虽然目前实现两幅全息图采集的光路还较为繁琐, 影响重建速度. 但后续可以在参考臂中增加分光棱

镜构建两个相互正交的反射参考光, 通过电子快门实现分步快速采集全息图, 提升系统整体运行速度. 理论上除了台阶物体, 该方法还适用于任何连续相位分布得物体, 包括光学元件、微电子元件, 以及变化不是很快的生物样品的三维轮廓实时检测, 应用前景较好.

## 参考文献

- [1] Zhang T, Yamaguchi I 1998 *Opt. Lett.* **23** 1221
- [2] Li E B, Yao J Q, Yu D Y, Xi J D, Chicharo J 2005 *Opt. Lett.* **30** 189
- [3] Atlan M, Gross M, Absil E 2007 *Opt. Lett.* **32** 1456
- [4] Takeda M 1990 *Industrial Metrology* **1** 79
- [5] Debnath S K, Park Y 2011 *Opt. Lett.* **36** 4677
- [6] Li J S, Wang Z, Gao J M, Liu Y, Huang J H 2014 *Opt. Eng.* **54** 031103
- [7] He X, Nguyen C V, Pratap M, Zheng Y, Wang Y, Nisbet D R, Williams R J, Rug M, Maier A G, Lee W M 2016 *Biomed. Opt. Express* **7** 3111
- [8] Weng J, Li H, Zhang Z, Zhong J 2014 *Optik* **125** 2633
- [9] Xiong H, Zhang D 2023 *Photonics* **10** 194
- [10] Ma Z, Long J L, Ding Y, Zhang J M, Xi J T, Li Y R, Peng Y Y 2025 *Opt. Laser Technol.* **181** 111807
- [11] Matriano M, Memmolo P, Miccio L, Persano A, Quaranta F, Siciliano P, Ferraro P 2015 *Appl. Opt.* **54** 3428
- [12] Hong Y, Shi T, Wang X, Zhang Y, Chen K, Liao G 2017 *Opt. Commun.* **382** 624
- [13] Yu H Q, Jia S H, Lin Z H, Gao L M, Zhou X 2023 *J. Mod. Opt.* **70** 77
- [14] Wei J, Wu J, Wang C 2024 *Sensors* **24** 5928
- [15] Lin Z H, Jia S H, Zhou X, Zhang H J, Wang L N, Li G J, Wang Z 2023 *Opt. Lasers Eng.* **166** 107571
- [16] Lin Z H, Jia S H, Wen B, Zhang H J, Yang Z H, Zhou X, Wang L N, Wang Z, Li G J 2024 *Opt. Laser Technol.* **179** 111366
- [17] Xiao W, Wang Q, Pan F, Cao R, Wu X, Sun L 2019 *Biomed. Opt. Express* **10** 1613
- [18] Sun Q Y, Liu Y W, Chen H, Jiang Z Q 2022 *Opt. Continuum* **1** 475
- [19] Kim H W, Cho M, Lee M C 2024 *Sensors* **24** 1950
- [20] Cheng Y Y, Wyant J C 1984 *Appl. Opt.* **23** 4539
- [21] Shi B C, Zhu Z Q, Wang X L, Xi S X, Gong L P 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 244201 (in Chinese) [石炳川, 朱竹青, 王晓雷, 席思星, 贡丽萍 2014 物理学报 **63** 244201]
- [22] Ghiglia D C, Pritt M D 1998 *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software* (New York: Wiley-Interscience)
- [23] Girshovitz P, Shaked N T 2014 *Opt. Lett.* **39** 2262
- [24] Girshovitz P, Shaked N T 2015 *Opt. Express* **23** 8773

# *In-situ* reconstruction of step phase based on orthogonal holograms\*

HAO Aihua<sup>†</sup> HUANG Jingyan ZHANG Shiji WANG Zhijun  
WANG Xiaolong

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710061, China)

( Received 23 November 2024; revised manuscript received 15 December 2024 )

## Abstract

Filtering technology is the key to accurate phase reconstruction in off-axis digital holography. Due to the limitations of resolution of charge coupled device (CCD) and off-axis digital holography itself, the filtering process of the step-phase objects is often accompanied by spectral loss, spectral aliasing and spectral leakage when non-integer periods are intercepted. At present, much research has been done on adaptive filtering in the frequency domain, but the above problems have not been fundamentally solved. In this work, the influence of spatial filtering on the accuracy of step-phase reconstruction is first analyzed theoretically. The analysis shows that even if the size of the filter window is equal to the sampling frequency of the CCD, the reconstructed object cannot retain all the spectral information of the object due to the limitation of the resolution power of the CCD itself. In addition, in the off-axis holographic recording process, considering the interference of zero-order terms and conjugate terms, the actual filter width is usually only 1/24 of the sampling frequency of the CCD, at which the average absolute error of the step is about 10% of the height of the step, the oscillation is relatively severe, and after further smoothing filtering, the details of the object are lost, the edge is blurred, and the tiny structure cannot be resolved. Second, according to the definition of discrete Fourier transform, the one-dimensional Fourier transform of a two-dimensional function integrates only in one direction, while the other dimension remains unchanged. When performing one-dimensional Fourier transform along the direction perpendicular to the holographic interference fringes and performing one-dimensional full-spectrum filtering, the distribution of reconstructed object light waves in the direction parallel to the fringes follows the original distribution, is not affected by the filtering, and has high accuracy. Therefore, by combining the reconstructed light waves obtained from one-dimensional full-spectrum filtering of two orthogonal off-axis holograms, an accurate two-dimensional differential phase can be obtained, which provides a basic guarantee for the accurate phase unwinding of Poisson equation. On this basis, a spectral lossless phase reconstruction algorithm based on orthogonal holography and optical experiment method is proposed. In this paper, the ideal sample simulation, including irregular shapes such as gear, circle, V, diamond, drop, hexagon and pentagram, and the corresponding experiment based on USFA1951 standard plate and silicon wafer are carried out. The AFM-calibrated average step heights of the standard plate and the silicon wafer are 100 nm and 240 nm, respectively. The experimental results show that compared with the currently widely used adaptive filter phase reconstruction, the proposed method naturally avoids spectrum loss, spectrum aliasing and spectrum leakage caused by filtering, the reconstruction accuracy is high, and it is suitable for three-dimensional contour reconstruction of any shape step object, which provides a practical way for reconstructing the high-precision phase of off-axis holography.

**Keywords:** digital holography, step phase, *in-situ* reconstruction

**PACS:** 42.30.-d, 42.30.Rx, 42.40.Kw

**DOI:** [10.7498/aps.74.20241629](https://doi.org/10.7498/aps.74.20241629)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20241629](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20241629)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12304329).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [haoaihua@xupt.edu.cn](mailto:haoaihua@xupt.edu.cn)



## 基于正交全息的台阶相位原位重建

郝爱花 黄静燕 张世纪 王志俊 王笑龙

### *In-situ* reconstruction of step phase based on orthogonal holograms

HAO Aihua HUANG Jingyan ZHANG Shiji WANG Zhijun WANG Xiaolong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 064204 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241629

CSTR: 32037.14.aps.74.20241629

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241629>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 远心同-离轴混合数字全息高分辨率重建方法

Telecentric in-line-and-off-axis hybrid digital holographic high-resolution reconstruction method

物理学报. 2021, 70(15): 154202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210190>

#### 结合线性回归的离轴数字全息去载波相位恢复算法

Off-axis digital holographic decarrier phase recovery algorithm combined with linear regression

物理学报. 2022, 71(4): 044202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211509>

#### 金属基复合材料原位反应相场模型

A phase-field model for *in-situ* reaction process of metal-matrix composite materials

物理学报. 2022, 71(9): 096401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211737>

#### 双合成波长数字全息低噪声分级解包裹方法

Low-noise hierarchical phase unwrapping method for dual-wavelength digital holography using two synthesical wavelengths

物理学报. 2021, 70(22): 224204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210669>

#### 原位液相透射电子显微镜及其在纳米粒子表征方面的应用

*In-situ* liquid phase transmission electron microscope and its application in nanoparticle characterization

物理学报. 2021, 70(8): 086701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201899>

#### 原位表征技术在全固态锂电池中的应用

Application of *in-situ* characterization techniques in all-solid-state lithium batteries

物理学报. 2021, 70(19): 198102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210531>