

像面数字全息的重建相位误差分析和改善

石炳川 朱竹青 王晓雷 席思星 贡丽萍

Analysis and improvement of reconstruction phase error in the image plane digital holography

Shi Bing-Chuan Zhu Zhu-Qing Wang Xiao-Lei Xi Si-Xing Gong Li-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **63**, 244201 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.244201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于涡旋光照明的暗场数字全息显微方法研究

Dark-field digital holographic microscopy by using vortex beam illumination

物理学报.2014, 63(22): 224202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224202>

基于多角度无透镜傅里叶变换数字全息的散斑噪声抑制成像研究

Research on speckle denoising by lensless Fourier transform holographic imaging with angular diversity

物理学报.2014, 63(15): 154205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154205>

双Lloyd镜数字全息显微测量术

Digital holographic microscope employing dual-Lloyd's mirror

物理学报.2014, 63(10): 104207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104207>

数字全息图取样模型的简化研究

Simplified sampling models for digital hologram

物理学报.2013, 62(12): 124203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.124203>

利用综合复用技术拓展数字全息显微系统中的记录视场

Colligated multiplexing approach to expanding the field of view in the recording process of digital holographic microscopy

物理学报.2013, 62(8): 084203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.084203>

像面数字全息的重建相位误差分析和改善*

石炳川¹⁾ 朱竹青^{2)†} 王晓雷¹⁾ 席思星¹⁾ 贡丽萍²⁾

1) (南开大学现代光学研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

2) (南京师范大学物理与科学技术学院, 江苏省光电技术重点实验室, 南京 210046)

(2014年5月5日收到; 2014年6月28日收到修改稿)

像面数字全息是数字全息技术中常用的测量和成像方式, 它通常采用离散傅里叶变换和频率滤波的方法进行物光波的重建. 本文讨论了这些算法对重建相位的影响. 首先分析了频谱泄露对于相位误差的影响, 结果表明当采样周期为整数时, 重建相位误差很小, 因此具有极高的相位重建精度; 而当不满足整周期采样时, 相位重建误差有了明显的增加. 为了改善频谱泄露所引起的相位误差, 采用 Hanning 函数对数字全息图进行了预处理, 结果表明 Hanning 窗的加入能够有效地提高重建相位的准确程度.

关键词: 像面数字全息, 相位重建误差, 频谱泄露, Hanning 窗

PACS: 42.40.-I, 42.30.Rx

DOI: 10.7498/aps.63.244201

1 引言

数字全息是利用电荷耦合元件 (CCD) 等电子感光元件代替传统的全息干板来记录物光和参考光相干涉的强度图样^[1-4]. 重建时, 利用计算机模拟光的衍射行为从而获得重建光场. 和传统的光学全息相比, 数字全息具有实时性、可定量获取相位信息、不需要化学湿处理过程等优势, 从而在显微成像^[5,6]、三维形貌测量^[7,8]、折射率测量^[9,10]等方面备受关注. 数字全息根据记录时的光路的不同, 可分为菲涅耳数字全息^[11,12]、无透镜傅里叶变换全息^[13,14]和像面显微全息^[15,16]等. 其中, 像面显微数字全息因在微小尺度测量、相位形貌检测等方面具有明显优势, 从而成为一种广泛应用的现代测量方法. 例如, 文献^[15]将超快激光作为像面数字全息的光源, 对飞秒激光烧蚀金属材料的超快微观过程进行了时间分辨诊断. 文献^[16]中利用像面全息对光纤的相位和折射率分布进行了研究. 在像面数字全息技术中, 频率滤波方法是通常采用的重建算法, 然而目前为止, 这种方法的相位重建的误差

目前仍没有定论. 无疑, 这一点对于掌控和提高数字全息的测量精度是至关重要的.

像面数字全息的相位重建误差受到从记录到重建的各个环节的影响. 从记录到重建, 光信息受到两次主要的改变, 第一次是 CCD 对数字全息图的离散抽样与量化作用; 第二次是频谱滤波的过程. 为了对整个数字记录与处理过程中所导致的误差有一个整体的把握, 本文利用计算机模拟的方法对其影响进行分析. 本文首先分析了引起相位误差的原因, 模拟数字全息的记录和相位重建过程, 并通过对重建的相位误差分布的分析研究了数字处理过程对相位重建的影响, 最后进行了实验验证.

2 像面数字全息中的频谱泄露

在数字全息中, 物光和参考光干涉所形成的全息图被 CCD 离散采样并存储于计算机中. 设 CCD 的像素数为 $M \times N$, 像元间隔为 Δx 和 Δy , 每个感光面二维尺寸分别为 L_x 和 L_y , 以上各参数间具有以

* 国家自然科学基金 (批准号: 61275133) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: njzqzhu@163.com

下关系:

$$\Delta x = \frac{L_x}{M}, \quad \Delta y = \frac{L_y}{N}. \quad (1)$$

干涉场被 CCD 的感光面离散采样为二维矩阵, 这个过程可以表示为

$$\begin{aligned} I(m, n) &= I(x, y) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \\ &\times \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \delta(x - m\Delta x, y - n\Delta y) \\ &= I(x, y) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \\ &\times \text{comb}\left(\frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

其中, m 和 n 均为整数 ($0 \leq m \leq M - 1, 0 \leq n \leq N - 1$), 分别表示在 x 和 y 方向的像素序数. (2) 式表明光强连续分布的全息图经过 CCD 的采集被转化为 M 列 N 行的二维矩阵. 在像面数字全息的重建过程中, 需要对 CCD 采集到的数字全息图进行傅里叶变换得到其频谱分布, 因此对 (2) 式进行傅里叶变换可得

$$\begin{aligned} I_S(\xi, \eta) &= \mathfrak{F}\left\{\text{comb}\left(\frac{x}{\Delta x}, \frac{y}{\Delta y}\right)\right\} \\ &\otimes \mathfrak{F}\left\{\text{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right)\right\} \\ &\otimes I(\xi, \eta) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} I\left(\xi - \frac{n}{\Delta x}, \eta - \frac{m}{\Delta y}\right) \\ &\otimes \text{sinc}(L_x \xi, L_y \eta). \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式说明抽样作用导致了频谱的周期性重复, 这将构成一系列具有相同频谱结构的频谱岛, 它们的频率间隔分别为 $1/\Delta x$ 和 $1/\Delta y$; 由于每一个频谱岛均包含了相同的信息, 因此在实际离散傅里叶变换中, 只需考虑 $m = 0, n = 0$ 的频谱岛. 同时, 采样空间的宽度 L_x 和 L_y 决定了系统的频率分辨率分别为 $\Delta \xi = 1/L_x$ 和 $\Delta \eta = 1/L_y$. 因此, 在离散傅里叶变换中, 所有频率被离散化为一系列等间隔的频点, 即

$$\begin{aligned} I_{DS}(i\Delta \xi, j\Delta \eta) \\ = \{I(\xi, \eta) \otimes \text{sinc}(L_x \xi, L_y \eta)\} \\ \times \text{comb}\left(\frac{i}{\Delta \xi}, \frac{j}{\Delta \eta}\right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \left\{I(\xi, \eta) \otimes \text{sinc}\left(\frac{\xi}{\Delta \xi}, \frac{\eta}{\Delta \eta}\right)\right\} \\ &\times \text{comb}\left(\frac{i}{\Delta \xi}, \frac{j}{\Delta \eta}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, i 和 j 均为整数 ($0 \leq i \leq M - 1, 0 \leq j \leq N - 1$). 从 (4) 式可以看出, 物体的离散频谱是物体频谱经过卷积与离散抽样后得到的. 当 $I(\xi, \eta)$ 的频率恰好与某一频点对应时, 其离散频谱与 sinc 函数卷积后, sinc 函数主瓣中心被平移至 $I(\xi, \eta)$ 所在频点位置, 而其他抽样点恰对应 sinc 函数的零值点, 因此, $I(\xi, \eta)$ 与 sinc 函数卷积的结果将不会影响其他频点的值. 然而, 当 $I(\xi, \eta)$ 频率恰好位于两个频谱点之间时, 此时频谱 $I(\xi, \eta)$ 与 sinc 函数卷积后再经过各频点抽样将使频谱非线性地扩散到整个离散频谱空间, 即造成了频谱泄露, 如图 1 所示. 由于数字全息重建的滤波操作只对某一频段选通, 因此频谱泄露必然造成部分频率信息的丢失, 使重建的相位具有一定的误差.

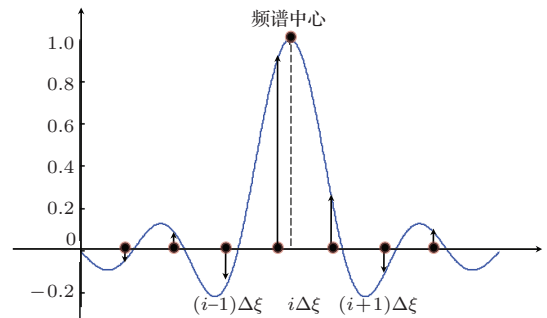


图 1 频谱泄露示意图

由于 sinc 函数的能量集中在主瓣内, 而其主瓣宽度两倍于离散频点的频率间隔, 因此其频谱能量将主要泄露到与频谱中心相邻的两个频点. 由于 sinc 函数旁瓣具有周期归零的特点, 且其各个周期内极值点均在中心附近; 因此, 当物体的频谱恰位于两个频点中间时, 各级旁瓣对应的频谱能量将具有最高的权重, 此时频谱泄露最严重. 将以上频域的情况对应到空域我们将发现, 当频谱中心恰好落在某个频谱点上时, 恰好对应空域的整数周期采样, 此时无频谱泄露; 当空域采样不是整数周期时, 必然导致频域的频谱泄露; 当空域存在半周期采样时, 频谱泄露的情况最为严重.

3 像面数字全息的重建误差分析

在频谱泄露情况下, 离散傅里叶变换与频谱滤波操作将对相位重建引起怎样的误差分布, 我们通过模拟物光与参考光干涉的相位记录与重建过程对此进行了研究. 图2为两束平面光波相干涉的示意图, 其中将垂直入射的光作为参考光, 将倾斜入射的光作为带有已知倾斜相位信息的物光. 直接对这种情况下所获得的全息图进行傅里叶变换和频谱滤波则可重建出物光波的相位信息; 将重建的物光相位与初始物光的倾斜相位进行对比, 其差值即可反映数字重建过程对相位的影响.

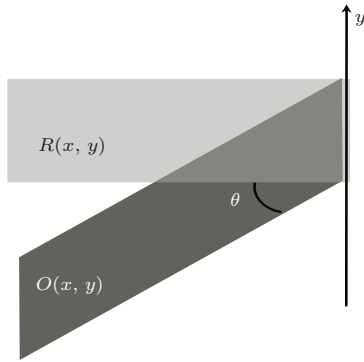


图2 两束平面波相干涉的示意图, 其中参考光为垂直入射, 物光为倾斜入射

在模拟中, 二维相位物体的大小为 $N \times N$, 第 (m, n) 点的相位值为

$$\phi(m, n) = 2\pi \frac{m+n}{N} \xi, \quad (5)$$

其中 ξ 为 $N \times N$ 全息图在一维方向上包含整周期干涉条纹的个数, 而 N/ξ 为条纹在矩阵空间的周期. 当 ξ 为整数时, 全息图满足整周期采样条件. 因此, 得到的二维干涉条纹图的强度分布为

$$H(m, n) = 0.5 \cos[\phi(m, n)] + 0.5, \quad (6)$$

其等效物光波前为

$$O(m, n) = \exp[j\phi(m, n)]. \quad (7)$$

对二维干涉条纹图进行傅里叶变换, 利用正方形滤波窗口选择频谱, 窗口中心位于频谱最大值点, 设定窗口大小为

$$\text{floor}\left(\frac{2\xi}{3}\right) \times \text{floor}\left(\frac{2\xi}{3}\right), \quad (8)$$

其中 floor 为向下取整操作. 对得到的频谱做傅里叶逆变换, 得到重建物光波前 $O_{rc}(m, n)$, 为了避免相位解包裹过程中引入的误差, 对其做波前运算

$$O_d(m, n) = O_{rc}(m, n)O^*(m, n), \quad (9)$$

则重建相位与原始相位之差为

$$\phi_d(m, n) = \text{angle}[O_d(m, n)]. \quad (10)$$

图3展示了当 $N = 512$, $\xi = 128$ 时模拟得到的二维干涉条纹图及 $N = 512$, $\xi = 128.5$ 时的误差的二维分布.

为了了解频谱泄露对重建相位的影响, 我们模拟了当 $\xi = 128.1, 128.2, \dots, 129$ 情况下的相位重建误差, 图4给出了误差分布的直方图.

从图4的误差分布可知, 即使频谱泄露最严重时(采样周期 = 128.5), 仍有 90% 以上的像素的相位误差在 $[-0.05 \text{ rad}, 0.05 \text{ rad}]$ 区间内, 而在某些情况下, 相位误差的标准差却大于 0.05, 据此可以断定存在具有较大的误差的像素点, 因为只有当 $[-0.05 \text{ rad}, 0.05 \text{ rad}]$ 区间之外占总量不到 10% 的误差点的误差值十分显著时, 整体的标准差才能高于 0.05. 根据经验, 这些误差点主要分布在边缘, 对主体的相位重建影响较小, 因此在下面的分析中我们主要关注 $[-0.05 \text{ rad}, 0.05 \text{ rad}]$ 区间内相位误差的分布情况. 在图4所列出的各种情况下, 总有超过 60% 的相位误差分布在 $[-0.01 \text{ rad}, 0.01 \text{ rad}]$ 区间内. 当采样周期为整数时 ($\xi = 128$ 和 129), 误差均分布在 $[-0.01 \text{ rad}, 0.01 \text{ rad}]$ 区间, 且其标准差在 10^{-14} rad 量级, 体现了极高的相位重建精度. 当不满足整周期采样时, 相位重建误差有了明显的增加. 随着采样周期数从 128 按 0.1 个周期的间隔逐渐增加到 129, 分布在 $[-0.01 \text{ rad}, 0.01 \text{ rad}]$ 区间内的像素点数目呈先下降后升高的过程, 且在 $\xi = 128.5$ 时达到最小值. 若以标准差作为相位重建精度的判断依据, 则在我们的模拟条件下相位重建精度约为 0.07 rad. 从整体上看, 正负误差所占比例近似相等; 当采样的周期数越接近整数, 频谱泄露越小, 具有较小误差的像素点所占的比例越大, 相位重建越准确; 当采样的周期数越接近半周期, 频谱泄露越严重, 具有较大误差的像素点所占的比例越大, 相位重建误差越大.

4 加 Hanning 窗处理对相位误差的改善

在数字全息记录中, 干涉条纹的中心频率是可以一定范围内调节的. 为了避免其中心频率正好

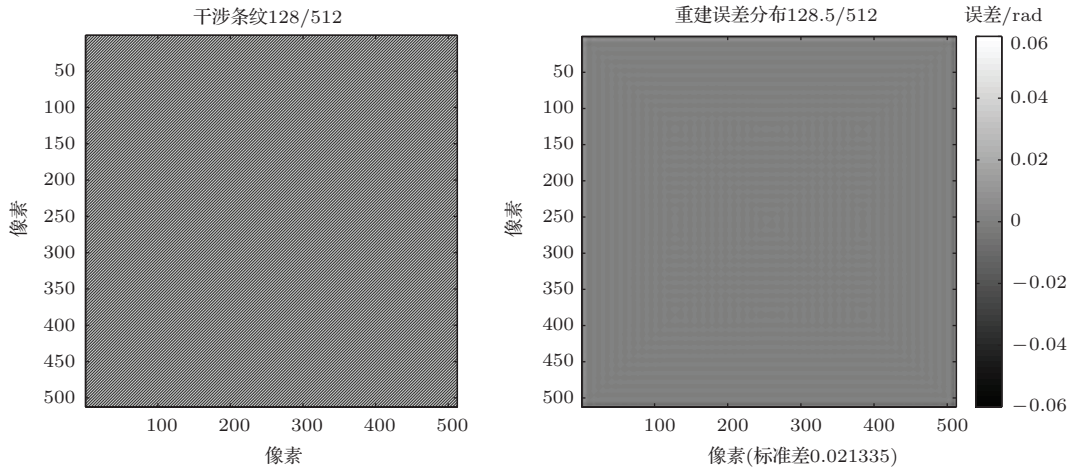


图3 干涉图及重建误差分布图

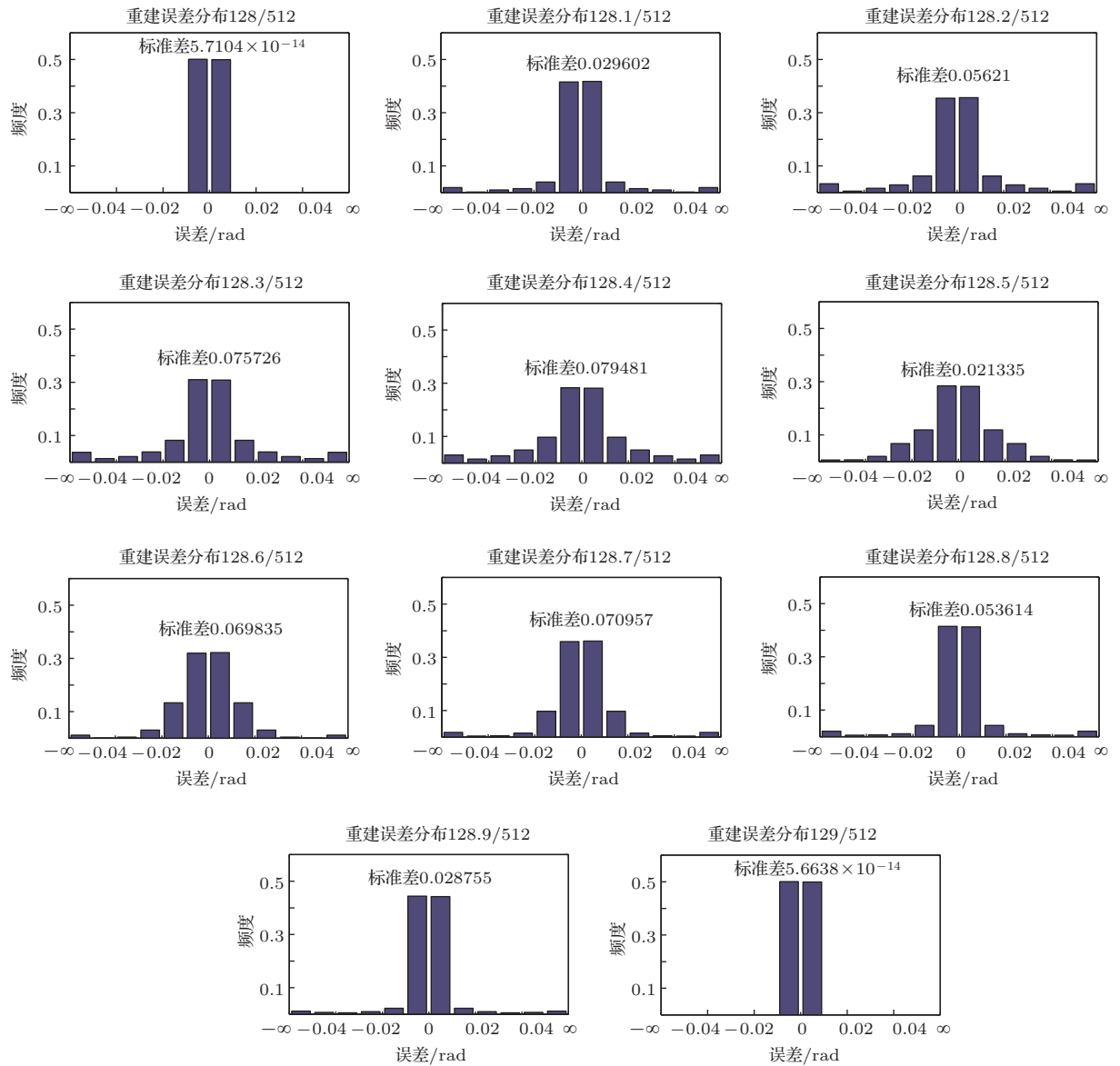


图4 不同采样周期下重建相位误差分布

位于两频谱点中心, 可以微调物光与参考光的夹角, 实现干涉条纹的整周期记录, 以防止频谱泄露的发生. 对于确定的干涉条纹, 可以通过增加采样序列的长度从而降低离散频谱点之间的频率间隔, 提高频谱分辨率, 使得被记录信息的中心频率更加接近某一频谱点, 减少频谱的泄露. 以上两种方法都是从光学的角度考虑的, 当干涉条纹较细密时将难以精确调整至整周期采样; 而增加采样点数需要利用像素数目更大的 CCD, 这受到电子器件制造水平的影响, 目前提升空间有限. 因此, 从数据处理的角度对处理过程进行优化成为一个重要的方向. 由于导致频谱泄露的 sinc 函数是空域 rect 函数的傅里叶变换, 因此频谱泄露实际上是由 rect 函

数引起的. 如果修改空域的 rect 函数的形式, 频域卷积函数的形式也会发生改变. 如果能够得到具有更好频域特性的函数, 如具有窄而高的主瓣和幅值较低的旁瓣, 那么就能在一定程度上抑制频谱向周围频点的泄露. 在数字信号处理技术中, 已经广泛地使用了窗函数优化数字信号的分析. 因此, 为了抑制频谱泄露, 我们在处理过程中首先用二维 Hanning 窗口对数字全息图做了加窗处理, 然后进行相位重建. 在这种情况下得到的相位差分布直方图如图 5 所示.

从图 5 可以看出, 超过 95% 的相位误差集中在 $[-0.01 \text{ rad}, 0.01 \text{ rad}]$ 区间内, 更大的相位误差点所占的比例被有效抑制. 从统计结果上看, 相位

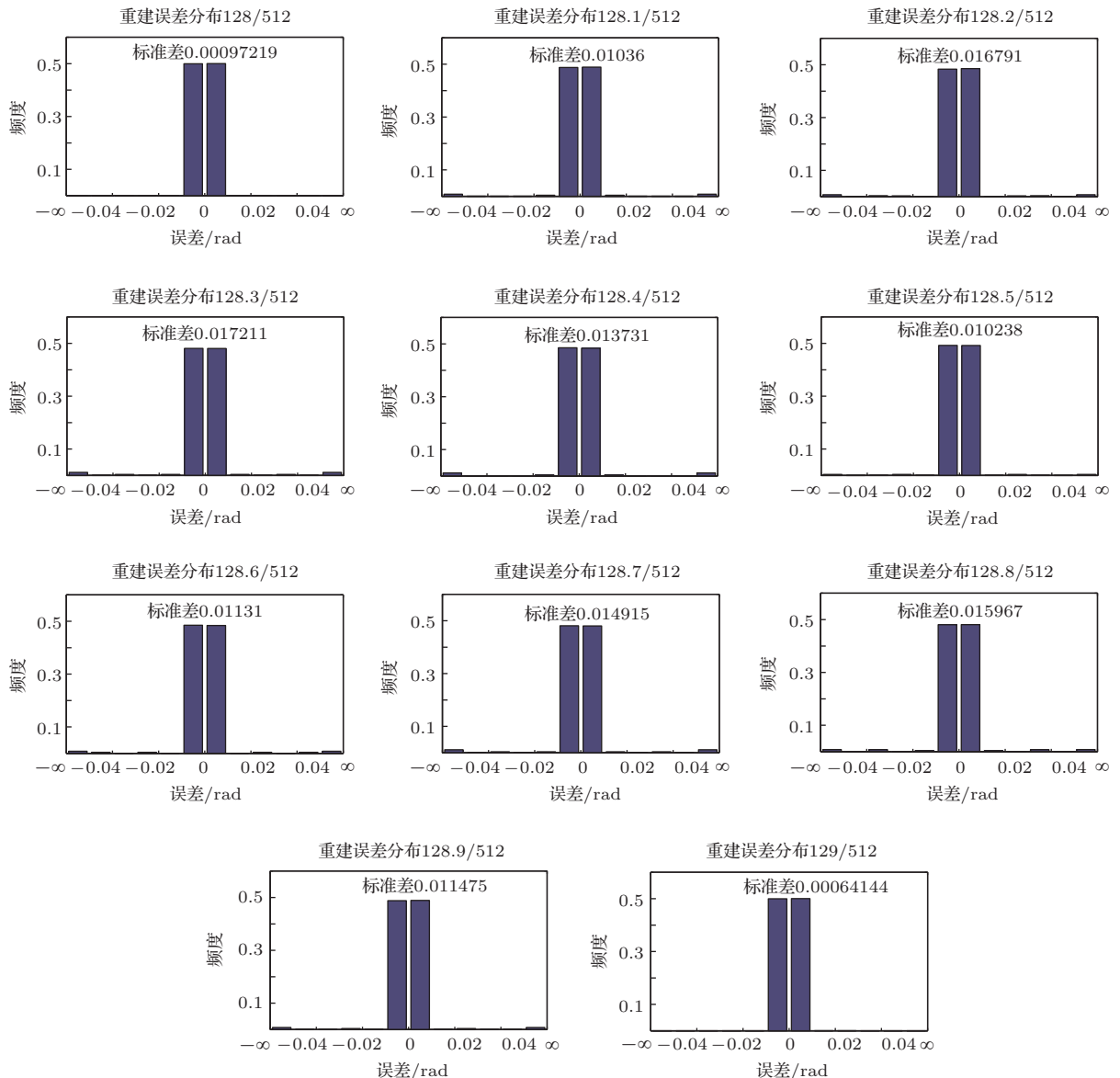


图 5 加 Hanning 窗后不同采样周期下的重建相位误差

误差的标准差均在 0.015 rad 以内, 且多在 0.01 rad 左右, 较图 4 中的结果有了明显的减小. 因此, Hanning 窗的加入有效提升了重建相位的准确程度.

对傅里叶变换进行加窗后, 频谱泄露被抑制, 重建相位的直方图分布及标准差都具有了明显的改善, 傅里叶变换滤波重建算法本身导致的相位误差进一步降低, 95% 以上的误差在 $[-0.01 \text{ rad}, 0.01 \text{ rad}]$ 区间内, 展示了更高的重建精度. 其标准差也在 0.015 rad 左右, 说明边缘的震荡也受到了很大程度的抑制, 体现了更高的重建准确性. 因此, Hanning 窗口的加入使我们模拟的相位测量精度从约 0.07 rad 提升到了 0.015 rad.

此外, 图 4 和图 5 的第一个图和最后一个图说明, 在整周期采样的情况下, 加 Hanning 窗的重建结果不如未加窗时效果好, 这是因为尽管在整周期采样的情况下频谱中心恰好落在某个频谱点上, 但由于 Hanning 窗在频域不具有类似 sinc 函数周期归 0 的特点, 因此此时是存在频谱泄露的, 所以其重建精度较未加窗时差. 但是在普遍的情况下, 即存在非整周期采样时, 加 Hanning 窗对于相位重建的改善是明显的.

5 实验研究

按照图 6 所示的光路, 我们进行了实验研究. 实验采用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器, 经 4F 针孔扩束系统获得高质量的平行光束, 再经分束镜 BS1 分为物光和参考光. 这两束光经分束镜 BS2 合束后射入 CCD 相机采集. 实验中选用的 CCD 型号为 MINTON-MTV-1881EX, 像素大小 $8.3 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$, 像素数为 576×768 . 实验中以垂直 CCD 的入射光为参考光, 斜入射光为物光, 这种情况下不存在参考光波所引入的一次相位畸变. 采集到的数据裁切边缘后得到 512×512 像素数的平行光干涉图, 如图 7 所示.

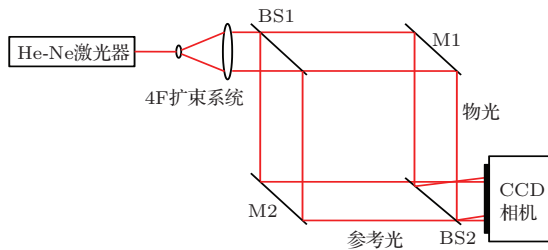


图 6 实验光路图

分别在不加窗和加 Hanning 窗的情况下对得到的直条纹进行了相位重建. 采用频率滤波相位重建方法可以得到物光波的相位分布. 由于边缘噪声的存在使得解包裹过程中产生了误差的扩散, 因此在四个边缘各裁去了 56 像素的数据, 最终分别保留了 400×400 像素数的二维相位分布数据. 由于物光波和参考光波均为平面波, 因此求得的物光相位应为平面分布, 分别用最小二乘法拟合未加窗和加窗的平面相位分布 $Z(x, y) = Ax + By + C$ (x, y 分别为矩阵列方向和行方向坐标), 则得到在未加窗时, $A = 1.3983, B = 0.0003, C = -275.2300$; 在加 Hanning 窗时 $A = 1.3983, B = 0.0003, C = -275.2287$. 由于两拟合值 A, B 均相等, 因此两拟合面平行; 而 C 值的差异与相位解包裹过程有关, 因此不会对后继的误差计算分析造成影响.

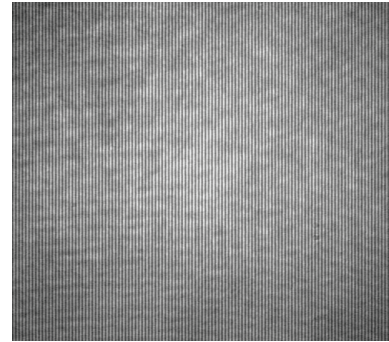


图 7 实验获得的平行光干涉图

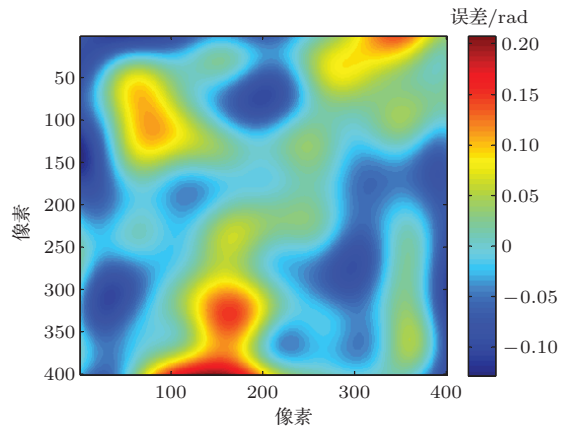


图 8 (网刊彩色) 未加窗时的相位误差分布 (单位: rad)

分别以拟合的平面相位分布为标准相位数据, 与解包裹相位数据做差, 则得到未加窗和加 Hanning 窗情况下的相位误差分布, 如图 8 和图 9 所示. 统计误差分布的标准差与峰谷值偏差, 可知在未加窗时相位误差的标准差为 0.0520 rad, 峰谷值偏差

为0.3361 rad. 而在加Hanning窗时, 相位误差的标准差为0.0478 rad, 峰谷值偏差为0.2829 rad. 因此, 从统计结果可以看出, 加Hanning窗口后重建的相位误差较小, 相位更趋于平面分布, 因此获得了更准确的相位重建结果.

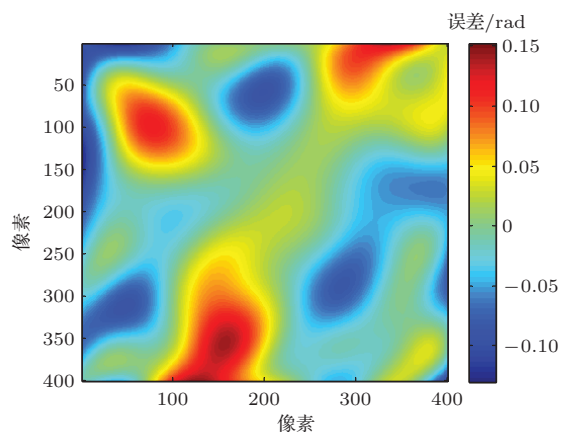


图9 (网刊彩色) 加Hanning窗时的相位误差分布(单位: rad)

6 结 论

像面数字全息是数字全息技术中常用的测量和成像方式, 因此其重建相位误差的分析至关重要. 离散傅里叶变换和频率滤波是像面数字全息中通常采用的重建算法, 本文对这些算法对重建相位的影响进行了分析. 首先讨论了频谱泄露对于相位误差的影响, 结果表明当采样周期为整数时, 重建相位误差很小, 因此具有极高的相位重建精度; 而当不满足整周期采样时, 相位重建误差有了明显的增加. 为了改善频谱泄露所引起的相位误差, 采用Hanning函数对数字全息图进行了加窗处理, 并给出在这种情况下的误差分布图, 结果表明Hanning窗的加入有效地提升了重建相位的准确程度. 本文的工作对于掌控和提高像面数字全息的测量精度

具有重要的理论指导意义和实验应用价值.

参考文献

- [1] Wang X L, Zhai H C, Wang Y, Mu G G 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1137 (in Chinese) [王晓雷, 翟宏琛, 王毅, 母国光 2006 物理学报 **55** 1137]
- [2] Yamaguchi I, Zhang T 1997 *Opt. Lett.* **22** 1268
- [3] CuChe E, Bevilacqua F, Depeursinge C 1999 *Opt. Lett.* **24** 291
- [4] Javidi B, Nomura T 2000 *Opt. Lett.* **25** 28
- [5] Ferraro P, Grilli S, Alfieri D, Nicola S D, Finizio A, Pierattini G, Javidi B, Coppola G, Striano V 2005 *Opt. Express* **13** 6738
- [6] Mann C, Yu L, Lo C M, Kim M 2005 *Opt. Express* **13** 8693
- [7] 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]
- [8] Javidi B, Tajahuerce E 2000 *Opt. Lett.* **25** 610
- [9] Deng L J, Yang Y, Shi B C, Ma Z H, Gai Q, Zhai H C 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0312006 (in Chinese) [邓丽军, 杨勇, 石炳川, 马忠洪, 盖琦, 翟宏琛 2014 光学学报 **34** 0312006]
- [10] Charrière F, Marian A, Montfort F, Kuehn J, Colomb T, CuChe E, Marquet P, Depeursinge C 2006 *Opt. Lett.* **31** 178
- [11] Rosen J, Brooker G 2007 *Opt. Lett.* **32** 912
- [12] Picart P, Leval J 2008 *JOSA* **A25** 1744
- [13] Yuan C J, Zhong L Y, Zhu Y, Wang Y P, Lü X X 2004 *Laser J.* **25** 59 (in Chinese) [袁操今, 钟丽云, 朱越, 王艳萍, 吕晓旭 2004 激光杂志 **25** 59]
- [14] Zhong L Y, Lü X X 2004 *J. Kunming Univ. Sci. Technol. (Science and Technology)* **29** 226 (in Chinese) [钟丽云, 吕晓旭 2004 昆明理工大学学报(理工版) **29** 226]
- [15] Hu H F, Wang X L, Li Z L, Zhang N, Zhai H C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7662 (in Chinese) [胡浩丰, 王晓雷, 李智磊, 张楠, 翟宏琛 2009 物理学报 **58** 7662]
- [16] Deng L J, Yang Y, Gai Q, Ma Z H, Wu Y L 2013 *J. Optoelectron. Laser* **9** 1774 (in Chinese) [邓丽军, 杨勇, 盖琦, 马忠洪, 吴永丽 2013 光电子·激光 **9** 1774]

Analysis and improvement of reconstruction phase error in the image plane digital holography*

Shi Bing-Chuan¹⁾ Zhu Zhu-Qing^{2)†} Wang Xiao-Lei¹⁾ Xi Si-Xing¹⁾ Gong Li-Ping²⁾

1) (*Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

2) (*Jiangsu Provincial Key Laboratory of Optoelectronic Technology, School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China*)

(Received 5 May 2014; revised manuscript received 28 June 2014)

Abstract

The image plane digital holography is commonly used in digital holographic measurement and imaging. The methods of the discrete Fourier transform and the frequency filtering are usually used for reconstructing the object wave in image plane digital holography, and the influence of these algorithms on phase reconstruction is discussed in this paper. Firstly, the influence of the frequency spectrum leakage on phase reconstruction error is analyzed. The results show that the error of the phase reconstruction is very small when the sampling periodicity is an integer, so high accuracy of phase reconstruction can be achieved in this case. But when the sampling periodicity is not an integer, the phase reconstruction error is increased obviously. In order to reduce the phase error caused by the frequency spectrum leakage, the Hanning window is used in the pretreatment of the digital hologram. The result shows that the Hanning window can improve the accuracy of the reconstruction phase effectively.

Keywords: image plane digital holography, phase reconstruction error, frequency spectrum leakage, Hanning window

PACS: 42.40.-I, 42.30.Rx

DOI: [10.7498/aps.63.244201](https://doi.org/10.7498/aps.63.244201)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61275133).

† Corresponding author. E-mail: [njzqzhu@163.com](mailto:njqzhu@163.com)