



双合成波长数字全息低噪声分级解包裹方法

刘磊 徐志博 钱文硕 李文杰 谢芳 钟志 单明广

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

Liu Lei Xu Zhi-Bo Qian Wen-Shuo Li Wen-Jie Xie Fang Zhong Zhi Shan Ming-Guang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 224204 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210669

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210669>

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

一种基于双波长的光声测温技术

Photoacoustic temperature measurement based on dual-wavelength method

物理学报. 2017, 66(11): 117802 <https://doi.org/10.7498/aps.66.117802>

双波长外腔面发射激光器

Dual-wavelength external-cavity surface-emitting laser

物理学报. 2019, 68(11): 114204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182261>

基于双波长时域合成技术的微波光子波形产生

Photonic microwave waveform generation based on dual-wavelength time domain synthesis technology

物理学报. 2019, 68(17): 174203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190151>

一种有效解决离轴数字全息相图倾斜畸变的数字参考平面方法

Numerical reference plane algorithm for effectively solving tilt distortion of a phase image in digital off-axis holography

物理学报. 2018, 67(9): 094202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172528>

利用相干制备的三能级原子介质实现低噪声弱光相位操控

Low-noise optical field phase-shifting manipulated using a coherently-prepared three-level atomic medium

物理学报. 2017, 66(2): 024205 <https://doi.org/10.7498/aps.66.024205>

基于增益光纤长度优化的双波长运转掺铒光纤锁模激光器

Dual-wavelength mode-locked Er-doped fiber laser based on optimizing gain fiber length

物理学报. 2017, 66(13): 134203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.134203>

双合成波长数字全息低噪声分级解包裹方法*

刘磊¹⁾ 徐志博¹⁾ 钱文硕¹⁾ 李文杰¹⁾ 谢芳¹⁾ 钟志¹⁾²⁾ 单明广^{1)2)†}

1) (哈尔滨工程大学, 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

2) (哈尔滨工程大学, 先进船舶通信与信息技术工信部重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2021年4月9日收到; 2021年6月1日收到修改稿)

双波长数字全息中差分合成波长可拓展无相位包裹测量纵深范围, 但显著放大相位噪声; 加性合成波长可抑制相位噪声, 但大幅缩小无相位包裹测量范围. 因此, 本文利用差分合成波长无包裹测量范围大与加性合成波长噪声低的特性, 提出一种双合成波长数字全息低噪声分级解包裹方法. 该方法利用由差分合成波长获得的“相位差”引导单波长包裹相位进行解包裹, 然后再利用单波长的解包裹后的光程差引导加性合成波长获得的包裹“相位和”进行解包裹, 通过分级实现双波长低噪声解包裹. 实验结果表明, 该方法可以简单、快速地实现双波长数字全息低噪声解包裹.

关键词: 双波长数字全息, 相位解包裹, 合成波长, 低噪声

PACS: 42.40.Kw, 43.60.Tj, 52.70.Kz, 47.85.lf

DOI: 10.7498/aps.70.20210669

1 引言

数字全息技术^[1-16]基于光的干涉原理, 利用相机记录由干涉形成的全息图, 并利用计算机实现相位恢复及待测物体形貌等成像测量, 具有非接触、高分辨力、全场定量等优点, 并广泛应用于生物医学、微细加工和材料工程等测试领域. 但目前的研究多集中于单波长照明^[3-11], 当待测物体引起的光程差大于照明波长时, 由于相位恢复过程的反正切函数的周期作用, 恢复出的物体相位存在着包裹问题, 使测量纵深受限, 必须利用单波长解包裹算法进行相位解包裹才能获得待测物体的真实相位. 但是, 目前单波长解包裹算法普遍计算量大、恢复速度慢, 而且当待测物体存在台阶、沟槽等边缘锐利结构时, 单波长解包裹算法会失效.

为了克服单波长解包裹算法存在的缺陷, 有研究提出了一种有效解决方案是采用双波长数字全

息技术^[12-16], 其利用两个不同波长的光源进行照明, 获取每个波长的包裹相位图, 再利用简单的相减计算恢复出差分合成波长对应的“相位差”, 实现双波长解包裹. 双波长数字全息形成的差分合成波长远大于任一单波长, 极大地拓展无相位包裹的测量纵深, 且只要待测物体引起的最大光程差不大于该差分合成波长, 就不需任何复杂的解包裹算法. 但与此同时, 差分合成波长显著放大相位噪声, 且噪声随着差分合成波长增大而增大, 从而限制测量精度和测量范围的提升. 为了解决双波长数字全息解包裹噪声放大问题, Gass等^[13]提出了免疫算法, 利用“相位差”解算出的光程差, 引导单波长的包裹相位进行解包裹; 随后, Khmaladze等^[17]和 Asundi等^[18]相继提出了线性规划法, 利用线性规划搜索使两个单波长光程差值最小的整数对, 并利用该整数对单波长包裹相位进行相位解包裹, 但这些方法噪声水平仍受限于单波长照明时的噪声水平. 因此, 赵建林等^[19]将两个单波长的包裹相位相加, 获

* 国家自然科学基金 (批准号: 61775046)、黑龙江省自然科学基金 (批准号: LC2018027) 和中央高校基本科研业务费资助的课题.

† 通信作者. E-mail: smgsir@gmail.com

得加性合成波长对应的“相位和”，从而获得比单波长照明时更低的噪声水平，但因为加性合成波长比任何单波长均小，缩减了无包裹测量纵深。受其启发，吕晓旭等^[20]利用“相位差”、“相位和”以及免疫算法改进了双波长解包裹过程，在获得差分合成波长无包裹测量纵深的同时，获得了加性合成波长的低噪声水平，但其需要通过复杂计算获得多个中间变量，造成解包裹速度慢的问题。随后，单明广等^[21]以及刘乾等^[22]基于直接线性规划引导法，利用“相位差”和“相位和”直接实现双波长低噪声解包裹，虽然思路简单，但是需要最小二乘法在二维空间搜索约束边界条件，计算过程耗时。

因此，本文结合利用差分合成波长与加性合成波长的优势，提出双合成波长数字全息低噪声分级解包裹方法，在实现双波长低噪声解包裹的同时，避免复杂中间量计算，以提升双波长解包裹速度。

2 理论方法

假设双波长数字全息中照明激光的波长分别为 λ_1 和 λ_2 ($\lambda_1 < \lambda_2$)，且均小于待测物体引起的光程差，但其差分合成波长 λ_{ds} 大于该物体引起的光程差；同时，从双波长全息图中恢复获得单波长包裹相位图分别为 φ_1 和 φ_2 ，则由此获得“相位差” φ_{ds} 与“相位和” φ_{as} 分别为

$$\varphi_{ds}(x, y) = \begin{cases} \varphi_2(x, y) - \varphi_1(x, y), & \text{if } \varphi_2(x, y) - \varphi_1(x, y) > 0, \\ \varphi_2(x, y) - \varphi_1(x, y) + 2\pi, & \text{if } \varphi_2(x, y) - \varphi_1(x, y) < 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\varphi_{as}(x, y) = \varphi_2(x, y) + \varphi_1(x, y), \quad (2)$$

其中， φ_{ds} 为解包裹的相位但噪声高，对应差分合成波长 λ_{ds} ， $\lambda_{ds} = \lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 - \lambda_2)$ ； φ_{as} 为包裹的相位但噪声低，对应加性合成波长 λ_{as} ， $\lambda_{as} = \lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2)$ 。

利用光程差与相位之间的物理关系，可获取解包裹相位 φ_{ds} 对应的光程差 h_{ds} ，即：

$$h_{ds}(x, y) = \frac{\varphi_{ds}(x, y)}{2\pi} \times \lambda_{ds}. \quad (3)$$

虽然由于 λ_{ds} 的噪声放大作用， h_{ds} 蕴含大量噪声，但 h_{ds} 能够反映待测物体的真实形貌分布。

而两个照明波长对应的光程差可以表示如下：

$$h_i(x, y) = \lambda_i \times \left[\frac{\varphi_i(x, y)}{2\pi} + k_i(x, y) \right]. \quad (4)$$

若不考虑折射率的影响，单波长对应的光程差与差分合成波长对应的光程差理论上应相等，即 $h_i = h_{ds}$ ，因此，可以利用 h_{ds} 引导对 φ_i 进行解包裹，这里仅以波长 λ_1 为例，并由 (4) 式可得：

$$k_1(x, y) = \text{round} \left[\frac{h_{ds}(x, y)}{\lambda_1} - \frac{\varphi_1(x, y)}{2\pi} \right], \quad (5)$$

其中，round 表示取最近整数操作。

利用上式计算的 k_1 ，便可直接计算出单波长 λ_1 对应的无包裹光程差 h_1 ，即

$$h_1(x, y) = \lambda_1 \times \left[\frac{j_1(x, y)}{2\pi} + k_1(x, y) \right]. \quad (6)$$

相对于 h_{ds} ， h_1 在反映待测物体真实形貌分布的同时，降低了噪声，但其仍局限于单波长水平。因此，继续以 h_1 为基准引导低噪声的“相位和” φ_{as} 解包裹，即：

$$k_{as}(x, y) = \text{round} \left[\frac{h_1(x, y)}{\lambda_{as}} - \frac{\varphi_{as}(x, y)}{2\pi} \right]. \quad (7)$$

在确定 k_{as} 之后，便可利用该值计算出加性合成波长对应的无包裹光程差，即：

$$h_{as}(x, y) = \lambda_{as} \times \left[\frac{\varphi_{as}(x, y)}{2\pi} + k_{as}(x, y) \right]. \quad (8)$$

在反射式双波长数字全息中，由于光波照射待测物体并被反射回来， h_{as} 等于待测物体物理高度 h 的两倍，即 $h = h_{as}/2$ ；而在透射式双波长数字全息中， h_{as} 等于 h 与待测物体折射率 $(n - 1)$ 的乘积，即 $h = h_{as}/(n - 1)$ 。因为 h_{as} 由低相位噪声的 φ_{as} 计算，所以待测物体的 h 测量精度大大提升。

上述的解包裹过程可定义为分级解包裹法，其流程如图 1 所示，按照差分合成波长-单波长-加性

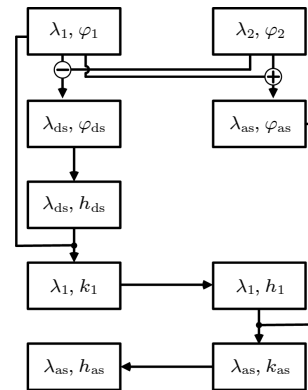


图 1 分级解包裹流程图

Fig. 1. Flowchart of Hierarchical phase unwrapping.

合成波长的顺序逐级实现解包裹, 整个过程未采用循环计算, 也无需像直接线性规划导引法采用最小二乘法在二维空间搜索约束边界条件, 因此, 整个解包裹过程计算量小, 速度快.

3 模拟验证与分析

为了验证所提方法的有效性, 利用计算机进行一系列的仿真实验, 其中采用的计算机 CPU 为 Intel i5-4590, 主频 3.30 GHz, 内存容量 16 GB, 计算过程仅使用 CPU 单核处理. 实验使用的照明波长分别为 $\lambda_1 = 632.8 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$, 为了便于仿真过程描述, 仿真实验中不考虑折射率影响, 由此可得加性合成波长 $\lambda_{as} = 289.0 \text{ nm}$ 和差

分合成波长 $\lambda_{ds} = 3339.8 \text{ nm}$. 首先, 利用 PEAK 函数生成待测物体, 其分布如图 2(a) 所示, 尺寸为 $500 \text{ pixel} \times 500 \text{ pixel}$, 高度峰谷值为 2198.6 nm ; 由此生成一个双波长复合全息图, 并在归一化后的全息图中添加均值为 0, 方差为 0.001 的高斯白噪声, 如图 2(b) 所示; 利用除法相位恢复算法^[23] 恢复出两个波长 λ_1 和 λ_2 对应的相位, 分别如图 2(c) 和图 2(d) 所示, 从图中可以看出, 两幅相位图均产生了明显的包裹.

为了展示本文算法的优越性, 将传统双波长解包裹算法 (算法 I)、线性规划算法 (算法 II) 和直接线性规划算法 (算法 III), 与本文所提算法 (算法 IV) 进行比较. 4 种算法的恢复结果如图 3(a)—3(d) 所示, 与原始值的残差如图 3—3(h) 所示. 为了定量

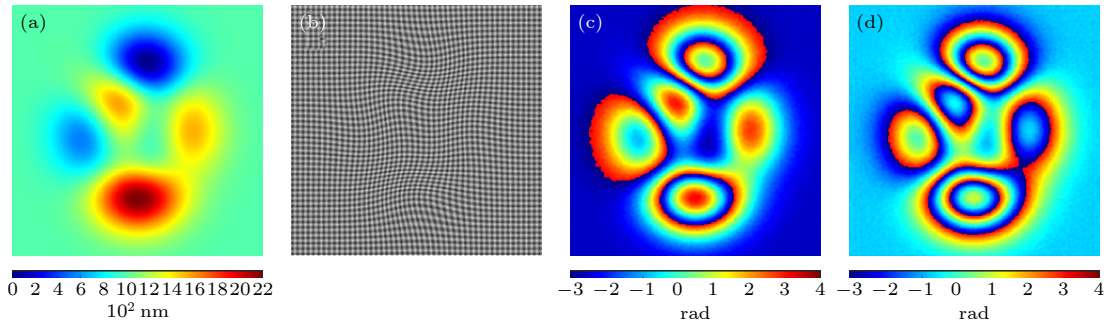


图 2 (a) 待测物体高度图; (b) 离轴全息图; (c) λ_1 和 (d) λ_2 对应的包裹相位

Fig. 2. (a) Original height map of the simulated sample; (b) simulated multiplexed off-axis hologram; and corresponding wrapped phase maps at (c) λ_1 and (d) λ_2 .

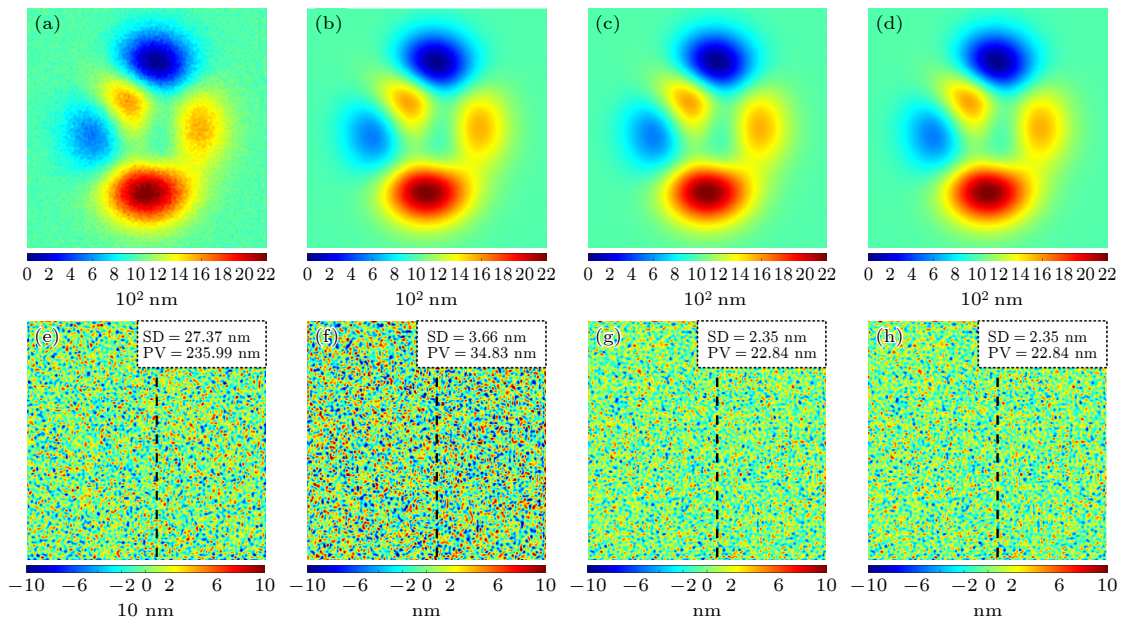


图 3 (a) 算法 I, (b) 算法 II, (c) 算法 III 和 (d) 算法 IV 的恢复结果; (e) 算法 I, (f) 算法 II, (g) 算法 III 和 (h) 算法 IV 恢复结果的残差图

Fig. 3. Reconstructed results by (a) Algorithm I, (b) Algorithm II, (c) Algorithm III, and (d) Algorithm IV; and the corresponding residue maps obtained by (e) Algorithm I, (f) Algorithm II, (g) Algorithm III, (h) Algorithm IV.

的比较 4 种算法的恢复质量, 在残差图的右上角标注了残差的标准差 (SD) 及峰谷值 (PV). 提取残差图中黑色虚线标注的数据, 所得 4 组一维数据如图 4 所示. 显而易见, 算法 III 和所提算法 IV 可获得更好的恢复质量和更低的噪声, 能达到加性合成波长的恢复质量, 且优于算法 I 和 II 的恢复质量; 但相对于算法 III 的 1989.5 ms 解包裹时间, 所提的算法 IV 解包裹时间为 20.5 ms, 从而使解包裹速度提升了 97 倍.

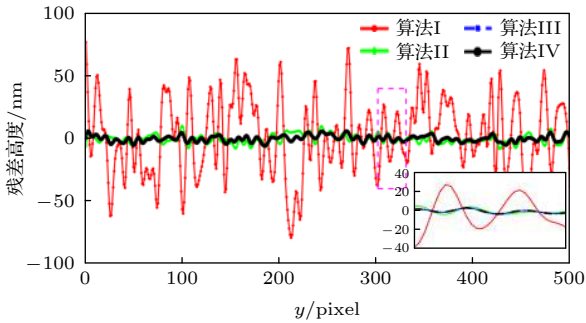


图 4 残差图 (图 3(e)—3(h)) 中黑色虚线标注数据
Fig. 4. Data marked with the black dashed lines in residue maps shown in Fig.3(e)—3(h).

为了进一步展示所提算法的抗噪性能, 针对被不同方差均值为 0 的高斯噪声污染全息图, 使用 4 种算法进行恢复, 得到它们恢复结果的标准差和峰谷值, 如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 随着方差的增大, 所有算法恢复结果的 SD 值和 PV 值均随

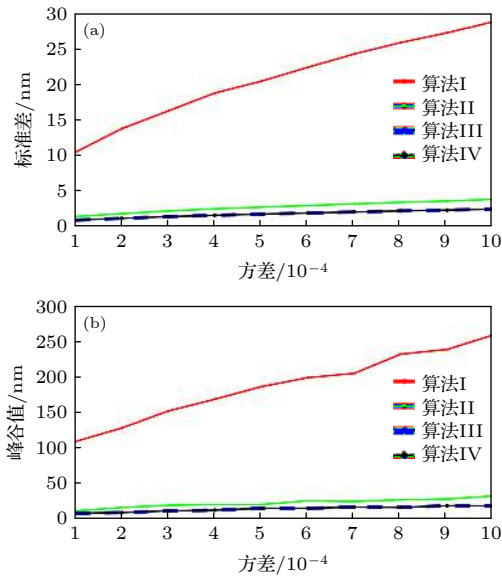


图 5 残差图 (图 3(e)—3(h)) 中 (a) 标准差和 (b) 峰谷值
Fig. 5. Standard deviation and peak-valley value of residue maps shown in Fig.3(e)—3(h).

之增大; 由于差分合成波长的噪声放大作用, 算法 I 恢复质量最差, 且随着噪声放大恢复质量下降剧烈; 虽然算法 II 的表现稍好, 但低于算法 III 和 IV; 令人惊喜的是, 算法 III 和 IV 受噪声的影响和恢复质量基本一致, 但相对于算法 III, 所提算法 IV 具有更简单的恢复过程和更快的恢复速度.

4 实验结果及分析

为了进一步验证所提方法的有效性, 依据文献 [24] 搭建如图 6 所示的视场翻转双波长载波正交数字全息实验装置, 其中光源为 $\lambda_1 = 632.8 \text{ nm}$ 的 HeNe 激光器和 $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$ 的固体激光器, 透镜 L1 和 L2 的焦距均为 200 mm, CCD 的像素数为 1024×1280 , 像素大小为 $4.8 \mu\text{m} \times 4.8 \mu\text{m}$; 待测物体为一个高度为 2000 nm 圆柱形相位物体, 因其由熔石英玻璃制成, 相对于两光源的折射率分别为 $n_1 = 1.457$ 和 $n_2 = 1.460$. 其工作过程为: 偏振正交的双波长光束经分光棱镜 BS1 合束和准直扩束器 BE 准直扩束后, 入射至由透镜 L1 和 L2 构成的共轭 4f 系统输入平面, 其中 1/4 的光照射物体被调制成为物光, 另外 3/4 部分通过了空白窗口形成参考光; 光束经透镜 L1 傅里叶变换后被分光棱镜 BS2 分成两束, 一束被平面反射镜 M 直接反射; 另一束光经偏振分光棱镜 PBS 后分离成双波长波束, 分别被角反射镜 RR1 和 RR2 反射后, 再次经过 PBS 合束, 并经过分光棱镜 BS2 与平面反射镜反射的光汇和, 最后经透镜 L2 傅里叶变换共同到达 CCD 的靶面, 形成一幅双波长正交载波复合全息图, 并被 CCD 一次曝光采集. 所采集的复

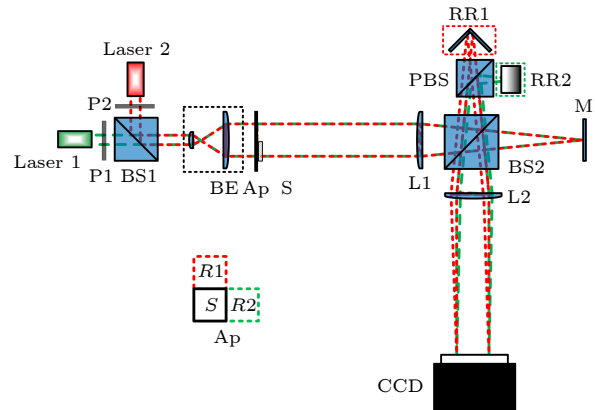


图 6 视场翻转双波长载波正交数字全息原理图
Fig. 6. Flipping dual-wavelength common-path digital holography with orthogonal carrier.

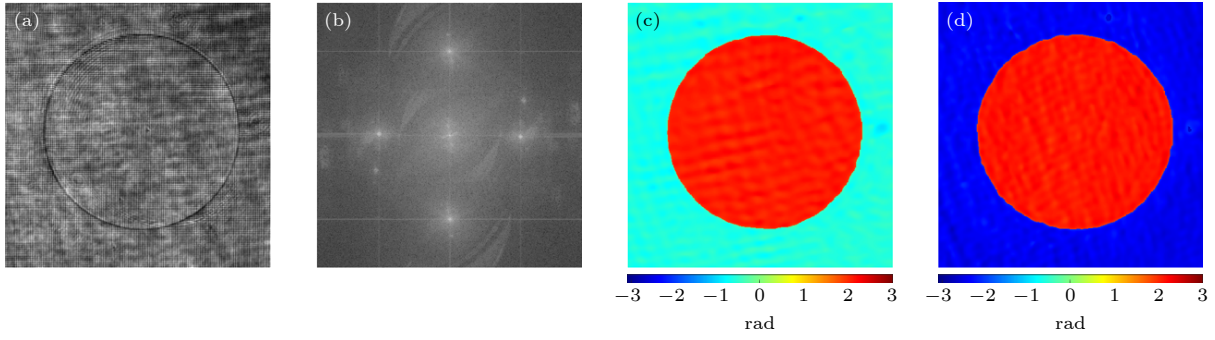


图 7 (a) 复合全息图; (b) 频谱图; (c) λ_1 和 (d) λ_2 对应的包裹相位

Fig. 7. (a) Multiplexed hologram and its (b) power spectrum; and corresponding wrapped phase maps at (c) λ_1 and (d) λ_2 .

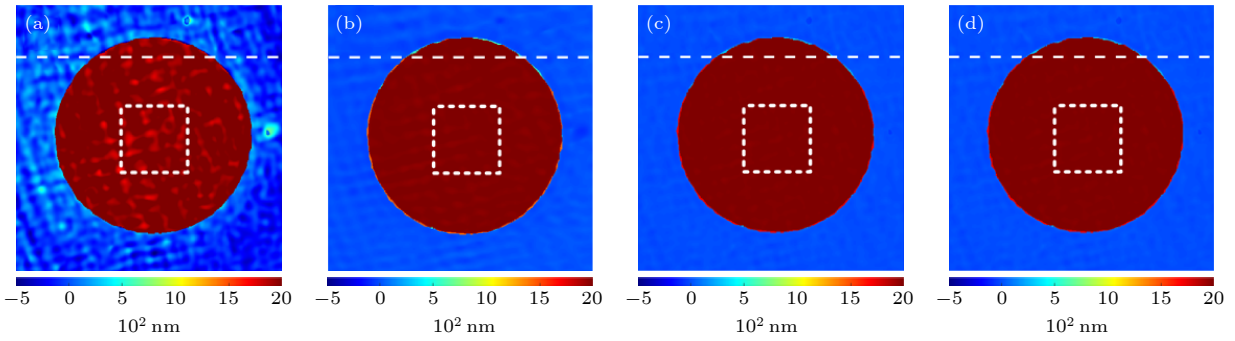


图 8 圆柱恢复结果 (a) 算法 I; (b) 算法 II; (c) 算法 III; (d) 算法 IV

Fig. 8. Reconstructed results of the step target by (a) Algorithm I; (b) Algorithm II; (c) Algorithm III; (d) Algorithm IV.

合全息图如图 7(a) 所示, 频谱图如图 7(b) 所示, 恢复出的两个波长包裹相位分别如图 7(c) 和 7(d) 所示.

如同仿真一样, 利用 4 种解包裹算法实现双波长解包裹, 恢复获得待测物体高度分布结果如图 8 所示, 而由图 8 中白色虚线处获得一维数据如图 9 所示. 为了定量分析 4 种算法, 计算 4 个恢复高度图中白色虚线方框包围区域的 SD 值和 PV 值, 其中 SD 值分别为 113.34 nm, 14.29 nm, 8.24 nm 和 8.24 nm, PV 值分别为 253.81 nm, 81.81 nm, 54.18 nm 和 54.18 nm. 从图中和计算结果可以看出, 如同仿真结果, 算法 I 恢复结果波动最严重的, 表明其噪声大, 而算法 III 和 IV 的恢复结果最为平稳, 表明它们恢复质量最好.

为了验证本算法在连续形貌物体测量上的有效性, 在第 2 个实验中, 将一滴酒精滴在载玻片上, 观察酒精的蒸发的过程, 其中某一时刻酒精形貌的恢复结果如图 10 所示, 白色虚线处的一维恢复结果如图 11 所示. 从恢复结果可以看出, 本算法可以实现连续形貌高质量恢复.

传统的双波长解包裹算法由于噪声放大问题,

在造成恢复质量下降的同时, 降低了双波长共路数字全息的系统稳定性. 因此, 在评价恢复质量的同时, 利用所提算法分析了系统的稳定性. 在实验中, 在无样品的情况下以 30 s 为间隔采集 100 幅全息图, 任意选择其中 1 点, 计算出该点在每个波长下的波动范围, 并计算其方差, 如图 12 所示. 其中, 算法 I、II、III 和 IV 对应的标准差分别是 31.02 nm, 9.32 nm, 7.72 nm 和 7.72 nm. 可见, 使用本方法不仅可以提升恢复质量, 也使系统的稳定性显著提升, 从而证明本方法可用于动态测量的低噪声解包裹.

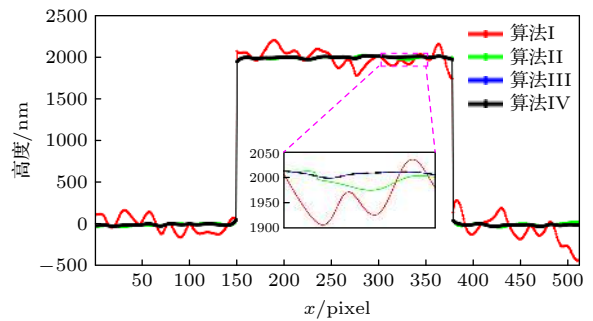


图 9 恢复结果的一维剖面图 (图 8 中白色虚线)

Fig. 9. Reconstructed result of 1 D height profiles (along the white dashed lines in Fig.8).

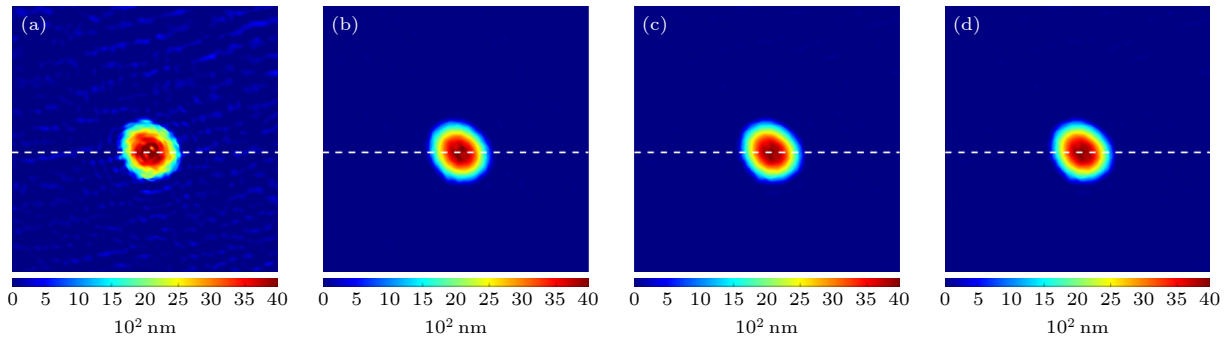


图 10 液滴酒精恢复结果 (a) 算法 I; (b) 算法 II; (c) 算法 III; (d) 算法 IV;

Fig. 10. Reconstructed result of a drop of alcohol: (a) Algorithm I; (b) Algorithm II; (c) Algorithm III; (d) Algorithm IV..

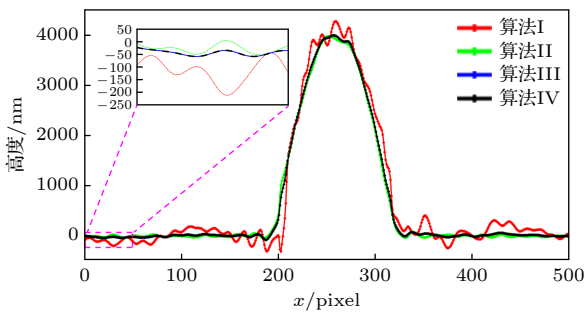


图 11 恢复结果的一维剖面图 (图 10 中白色虚线)

Fig. 11. Reconstructed result of 1D height profiles (along the white dashed lines in Fig.10).

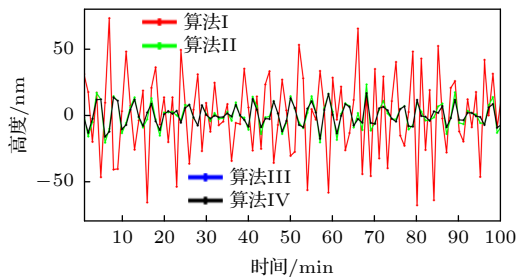


图 12 稳定性实验

Fig. 12. Stability test for the proposed method.

5 结论

本文充分利用差分合成波长和加性合成波长各自的优势, 提出一种双合成波长数字全息低噪声分级解包裹方法, 按照差分合成波长-单波长-加性合成波长的顺序, 逐级分布解包裹, 达到加性合成波长解包裹噪声水平. 实验结果表明, 所提方法不仅成像恢复质量高, 而且计算过程简单、速度快, 同时提高了双波长共路数字全息系统稳定性, 从而为双波长数字全息实现台阶、沟槽等边缘锐利物体高精度成像测量奠定了理论基础和实验基础.

参考文献

- [1] Gabor D 1948 *Nature* **161** 777
- [2] Lu X X, Chen J P, Liu S D, Ma Z J, Zhang Z, Zhong L Y 2012 *Opt. Las. Eng.* **50** 1431
- [3] Popescu P, Ikeda T, Dasari R R, Feld M S 2006 *Opt. Lett.* **31** 775
- [4] Girshovitz P, Shaked N T 2013 *Opt. Express* **21** 5701
- [5] Guo R L, Yao B L, Gao P, Min J W, Han J, Yu X, Lei M, Yan S H, Yang Y L, Dan D, Ye T 2013 *Appl. Opt.* **52** 3484
- [6] Hao B G, Diao M, Shan M G, Zhang Y B, Zhong Z 2013 *Opt. Express* **21** 2126
- [7] Frenklach I, Girshovitz P, Shaked N T 2014 *Opt. Lett.* **39** 1525
- [8] Rawat S, Komatsu S, Markman A, Anand A, Javidi B 2017 *Appl. Opt.* **56** D127
- [9] Hu C F, Zhu S S, Gao L, Popescu G 2018 *Opt. Lett.* **43** 3373
- [10] Picazo-Bueno J A, Trusiak M, Micó V 2019 *Opt. Express* **27** 5655
- [11] Shaked N T, Micó V, Trusiak M, Kuš A, Mirsky S K 2020 *Adv. Opt. Photon.* **12** 556
- [12] Polhemus C 1973 *Appl. Opt.* **12** 2071
- [13] Gass J, Dakoff A, Kim M K 2003 *Opt. Lett.* **28** 1141
- [14] Kühn J, Colomb T, Montfort F, Charrière F, Emery Y, Cuche E, Marquet P, Depeursinge C 2007 *Opt. Express* **15** 7231
- [15] Min J W, Yao B L, Zhou M L, Guo R L, Lei M, Yang Y L, Dan D, Yan S H, Peng T 2014 *J. Opt.* **16** 125409
- [16] Yuan F, Yuan C J, Nie S P, Zhu Z Q, Ma Q Y, Li Y, Zhu W Y, Feng S T 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 166 (in Chinese) [袁飞, 袁操, 聂守平, 朱竹青, 马青玉, 李莹, 朱文艳, 冯少彤 2014 *物理学报* **63** 166]
- [17] Khmaladze A, Matz R L, Zhang C, Wang T, Banaszak Holl M M, Chen Z 2011 *Opt. Lett.* **36** 912
- [18] Wang Z M, Jiao J N, Qu W J, Yang F, Li H R, Tian A L, Asundi A 2017 *Appl. Opt.* **56** 424
- [19] Di J L, Zhang J W, Xi T L, Ma C J, Zhao J L 2015 *J. Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS* **14** 041313
- [20] Xiong J X, Zhong L Y, Liu S D, Qiu X, Zhou Y F, Tian J D, Lu X X 2017 *Opt. Express* **25** 7181
- [21] Shan M G, Liu L, Zhong Z, Liu B, Zhang Y B 2019 *Opt. Las. Eng.* **117** 1
- [22] Liu Q, Li L L, Huang X J, Zhang H, Yue X B 2020 *J. Opt.* **22** 045701
- [23] Shan M G, Liu L, Zhong Z, Liu B, Luan G Y, Zhang Y B 2017 *Opt. Express* **25** 26253
- [24] Liu L, Shan M G, Zhong Z, Liu B, Luan G Y, Diao M, Zhang Y B 2017 *Opt. Lett.* **42** 4331

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

Liu Lei¹⁾ Xu Zhi-Bo¹⁾ Qian Wen-Shuo¹⁾ Li Wen-Jie¹⁾
Xie Fang¹⁾ Zhong Zhi¹⁾²⁾ Shan Ming-Guang^{1)2)†}

1) (*College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

2) (*Key Laboratory of Advanced Marine Communication and Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

(Received 9 April 2021; revised manuscript received 1 June 2021)

Abstract

Dual-wavelength digital holography can expand the unambiguous measurement depth in phase unwrapping by using a differential synthetic wavelength which is longer than the single illumination wavelength. However, the phase noise is significantly amplified due to the magnification of the differential synthetic wavelength, resulting in a lower measurement accuracy. On the other hand, a lower noise level can be achieved by using additive synthetic-wavelength which is shorter than the single illumination wavelength. However, the corresponding unambiguous measurement depth is greatly reduced due to the phase ambiguity. In this case, combining the merits of the differential synthetic-wavelength and the additive synthetic-wavelength, different low noise phase unwrapping algorithms have been developed in recent years. However, these algorithms are complex and time consuming because they need to calculate multiple intermediate variables or search for the constrained boundary conditions in two-dimensional space. Therefore, in this paper, we develop a hierarchical phase unwrapping algorithm by using the two synthetic wavelengths for dual-wavelength digital holography to realize low noise and fast unambiguous measurement with large depth. In this algorithm, the unwrapped phase difference obtained by the differential synthetic wavelength is used to guide the wrapped phase of one single wavelength to realize phase unwrapping, and then the optical path difference obtained by the single-wavelength unwrapped phase is employed to guide the wrapped phase sum, and thus realizing phase unwrapping. As a result, the phase noise is attenuated and the depth sensitivity is preserved for dual-wavelength phase unwrapping. After theoretical analysis, a series of simulation experiments is carried out on the reconstructed quality, anti-noise characteristics and speed through comparing with state-of-the-art dual-wavelength phase unwrapping algorithms, including the conventional algorithm, the linear programming algorithm and the direct linear programming algorithm. In this case, a flipping dual-wavelength common-path digital holography with orthogonal carrier is built to acquire multiplexed off-axis hologram in one shot and illustrate the operation of the algorithm with circular step target, and stability test of the setup. Both the simulation and experimental results show that the proposed method can be simplified and deterministic, resulting in a lower noise phase unwrapping in a time of 20.5 ms for a phase map of one megapixel. We expect that the proposed method can have practical applications in measurement that requires high accuracy, fast speed, and large depth.

Keywords: dual-wavelength digital holography, phase unwrapping, synthetic wavelength, low noise

PACS: 42.40.Kw, 43.60.Tj, 52.70.Kz, 47.85.lf

DOI: 10.7498/aps.70.20210669

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61775046), Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China (Grant No. LC2018027), and Fundamental Research Funds for the Central Universities.

† Corresponding author. E-mail: smsgsir@gmail.com