

数字差分-积分快速相位解包裹算法研究*

王子硕¹⁾ 刘磊^{1)2)†} 刘晨博¹⁾ 刘珂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)

(2023 年 3 月 28 日收到; 2023 年 7 月 4 日收到修改稿)

数字全息技术是目前应用最广泛的定量相位成像技术之一, 但是当测量相位较大的物体时, 需要解包裹算法才能计算出正确的相位信息. 目前, 已有的解包裹算法均面临计算量巨大、耗时的问题. 为了解决上述问题, 本文基于傅里叶变换相位恢复算法, 利用复振幅相位信息的完整性, 提出针对薄相位和连续大相位的基于数字差分-积分的快速直接解包裹算法. 该算法首先通过基本的傅里叶变换相位恢复算法操作后, 得到含有物体完整相位的复振幅信息; 随后, 从中提取两幅子复振幅信息, 并将二者相除, 再相位提取出其中信息, 便可得到一个物体真实相位差分信息; 最后, 沿差分方向对提取的相位差分信息进行积分, 便可得到解包裹后的相位信息. 同时通过仿真与具体实验对该算法进行了验证. 结果表明, 本文算法可以实现快速准确的解包裹相位直接恢复.

关键词: 离轴数字全息, 相位恢复, 傅里叶变换, 相位解包裹**PACS:** 42.40.Kw, 42.30.Rx, 02.30.Nw, 43.60.Tj**DOI:** 10.7498/aps.72.20230473

1 引言

数字全息技术是目前应用最广泛的定量相位成像技术之一, 它具有无需标记、大视场、非接触和无损等优点. 目前为止, 国内外众多课题组针对数字全息技术开展了大量的研究工作, 并取得了丰富的成果^[1–11]. 其中, 相位重建算法^[12,13]是数字全息领域的一个极重要的研究方向.

数字全息技术按照重建算法的区别可分为同轴数字全息^[14–16]和离轴数字全息^[9–11]两类全息技术. 同轴数字全息一般需要采集多幅同轴全息图消除共轭像, 因此耗时较长, 而且对实验装置要求很高, 实验过程中实现难度较大. 而离轴数字全息技术仅需一张离轴数字全息图便可完成相位恢复,

使其成为最具效率的数字全息技术. 学者曾提出一系列基于傅里叶变换的相位恢复算法^[12,13]对离轴数字全息进行快速且准确相位恢复. 基于傅里叶变换的相位恢复算法通常都包含二维傅里叶变换、带通滤波、二维逆傅里叶变换和求取相位等步骤. 其中带通滤波会损失很多高频信息, 降低了成像的分辨率. 因此, 也有学者研究同-离轴混合数字全息恢复方法, 以兼顾离轴数字全息和同轴数字全息的优势^[17,18]. 但是, 无论采用哪种数字全息技术进行测量, 由于相位的周期性, 仅能提取包裹的相位信息. 因此, 那些算法恢复出的相位存在着包裹问题, 需要解包裹算法对包裹相位进行解包裹才能得到准确的相位信息. 目前, 解包裹算法主要分为路径跟踪法^[19–21]、最小范数法^[22–24]和基于深度学习方法^[25–27]三大类. 其中, 枝切法是最经典的路径跟踪

* 国家自然科学基金 (批准号: 62175048)、船舶振动噪声重点实验室基金 (批准号: 6142204220206) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: 3072022QBZ0807) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liulei2015@hrbeu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: smgsir@gmail.com

解包裹算法, 虽然已有若干改进的基于枝切法的相位解包裹算法被提出, 但是这些解包裹算法易受局部噪声影响, 会出现拖影的解包裹失败的现象. 而最小二乘算法利用全局最小化来进行相位解包裹, 该方法可以得到整幅解包裹结果, 但是会平滑相位信息, 降低重建结果的精度. 最小二乘算法可分为无加权值^[22]和有加权值^[23]两种, 其中权值代表噪声对像素的干扰程度, 权值越大, 干扰程度越低; 反之亦然. 为了提升解包裹的精度, Wei 等^[24]将枝切法和最小二乘法相结合, 提出了留数点校准最小二乘解包裹算法, 该方法利用留数点作为最小二乘算法的加权值, 对含噪声相位图表现出卓越的抗噪性, 但需多次迭代运算才可求取最优结果, 运算时间较长. 需要注意的是, 不论是路径跟踪法还是最小范数法, 重建过程都很复杂, 计算量很大, 无法满足快速相位重建的实际需求. 此外, 基于深度学习的相位解包裹算法发展迅速, 但是这类算法不仅需要事先采集处理大量数据作为数据集, 还需要搭建网络进行长时间的训练才能生效, 增加了算法实现的难度, 也很难对不同全息系统采集到的数据实现高质量的解包裹.

为了解决数值解包裹算法计算量大、耗时长的问题, 本文提出了一种针对薄相位和连续大相位的基于数字差分-积分的快速直接解包裹算法. 该算法利用基于傅里叶变换相位恢复算法在逆傅里叶变换所得二维复数矩阵中含有完整物体相位信息的特点, 通过数字位移提取和复数相除等操作, 得到一幅含有物体相位差分信息的复振幅矩阵, 求取其相位信息便可得到无包裹的相位差分信息, 最后, 沿差分方向对提取的相位差分信息进行积分, 便可得到解包裹后的相位信息. 该算法避免了局部或全局优化过程, 因此在保证解包裹质量的同时, 大幅降低了计算量, 提高了重建速度.

2 理论方法

假设采集到一幅离轴数字全息图, 表达如下式:

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + k_1x + k_2y], \quad (1)$$

其中, $A(x, y)$ 表示全息图所含直流量, $B(x, y)$ 表示全息图调制量, $\varphi(x, y)$ 表示物体相位信息, k_1 和 k_2 表示沿 x 和 y 方向的载波.

对全息图做二维傅里叶变换、带通滤波和逆傅里叶变换, 表达式如下:

$$\begin{aligned} & \exp\{i[\varphi(x, y) + k_1x + k_2y]\} \\ &= \text{IFT}\{\text{BPF} \times \text{FT}[I(x, y)]\}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\text{FT}[\cdot]$ 表示二维傅里叶变换操作, $\text{IFT}[\cdot]$ 表示二维逆傅里叶变换操作, BPF 表示带通滤波器. 已有的傅里叶变换的相位恢复算法是直接提取复数矩阵的相位信息, 得到包裹的相位信息, 计算过程如下:

$$\varphi'(x, y) = \text{ANGLE}\left\{\frac{\exp\{i[\varphi(x, y) + k_1x + k_2y]\}}{\exp[i(k_1x + k_2y)]}\right\}, \quad (3)$$

其中, $\exp[i(k_1x + k_2y)]$ 是对无样品全息图进行 (2) 式操作得到的系统所含载波信息和背景相位; $\text{ANGLE}(\cdot)$ 表示取相位操作.

根据傅里叶变换的基本特性可知, 在 (2) 式求取的复振幅数据所含相位信息应为完整的物体相位信息, 但是由于相位的周期性和相位提取算法的局限性, (3) 式仅能恢复出 $(-\pi, \pi]$ 的包裹相位 $\varphi'(x, y)$, 必须使用解包裹算法才能完成相位重建. 但是, 目前已有的解包裹算法大多计算量大、耗时长.

为了简化解包裹过程, 提高相位重建速度, 在经 (2) 式求出复振幅信息 $\exp\{i[\varphi(x, y) + k_1x + k_2y]\}$ 后, 并不直接求取其相位信息, 而是从中提取两幅具有一个像素位移量的尺寸略小的子复振幅信息: 从第 1 列像素开始提取得到复振幅信息

$$II' = \exp\{i[\varphi(x, y) + k_1x + k_2y]\},$$

从第 2 列像素开始提取尺寸与 II' 相同的复振幅信息

$$II'' = \exp\{i[\varphi(x, y + 1) + k_1x + k_2(y + 1)]\};$$

并将 $I'(x, y)$ 与 $II''(x, y)$ 相除, 可得含待测相位沿 y 方向差分相位信息 $\Delta_y\varphi(x, y)$, 计算如下:

$$\begin{aligned} & \exp\{i[\Delta_y\varphi(x, y) - k_2]\} \\ &= \frac{\exp\{i[\varphi(x, y) + k_1x + k_2y]\}}{\exp\{i[\varphi(x, y + 1) + k_1x + k_2(y + 1)]\}}. \end{aligned} \quad (4)$$

对 (4) 式所得复振幅信息求取其相位信息:

$$\Delta_y\varphi(x, y) = \text{ANGLE}\left\{\frac{\exp\{i[\Delta\varphi(x, y) - k_2]\}}{\exp(-ik_2)}\right\}, \quad (5)$$

其中 $\exp(-ik_2)$ 是对一幅无样品全息进行相同操作得到的一幅参考复振幅矩阵. 由于相位的周期性和相位提取算法的局限性, 所求 $\Delta_y\varphi(x, y)$ 也处于 $(-\pi, \pi]$, 因此只要所求相位 $\varphi(x, y)$ 相位中相邻相位间差值处于 $(-\pi, \pi]$, $\Delta_y\varphi(x, y)$ 便能表达真实的相位变化, 因此通过将 (5) 式计算所得 $\Delta_y\varphi(x, y)$ 沿 y 方向积分, 便可得真实的相位信息.

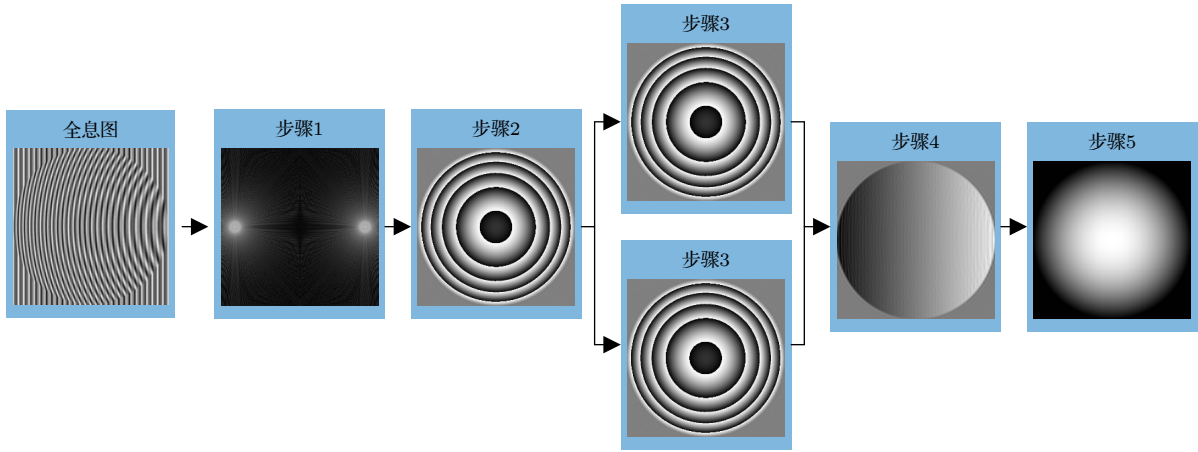


图 1 快速解包裹算法流程图

Fig. 1. Algorithm flow diagram for fast phase unwrapping.

根据上述的分析, 本文算法的计算流程 (图 1) 总结如下:

步骤 1 二维傅里叶变换. 对全息图进行二维傅里叶变换, 得其频谱图.

步骤 2 带通滤波、逆傅里叶变换. 对步骤 1 中得到的傅里叶频谱进行带通滤波、逆傅里叶变化, 得到相位中仅含物体相位信息的复振幅矩阵.

步骤 3 提取生成两幅新的具有数字位移的子复振幅信息.

步骤 4 复振幅相除及相位提取. 将步骤 2 和步骤 3 中得到的复振幅矩阵相除, 得到一幅新的复

振幅信息, 并求出其相位信息.

步骤 5 积分操作. 对步骤 4 中得到的相位信息沿步骤 3 中像素平移方向反向积分, 即可得到解包裹的相位信息.

3 仿真结果及分析

为了验证所提方法的可行性, 基于 CPU i7-8750H@2.2 GHz, 32 GB 内存的硬件平台对该方法进行计算机模拟验证. 仿真生成尺寸为 500 pixel×501 pixel 的 Peak 的相位信息, 如图 2(a) 所示. 使用

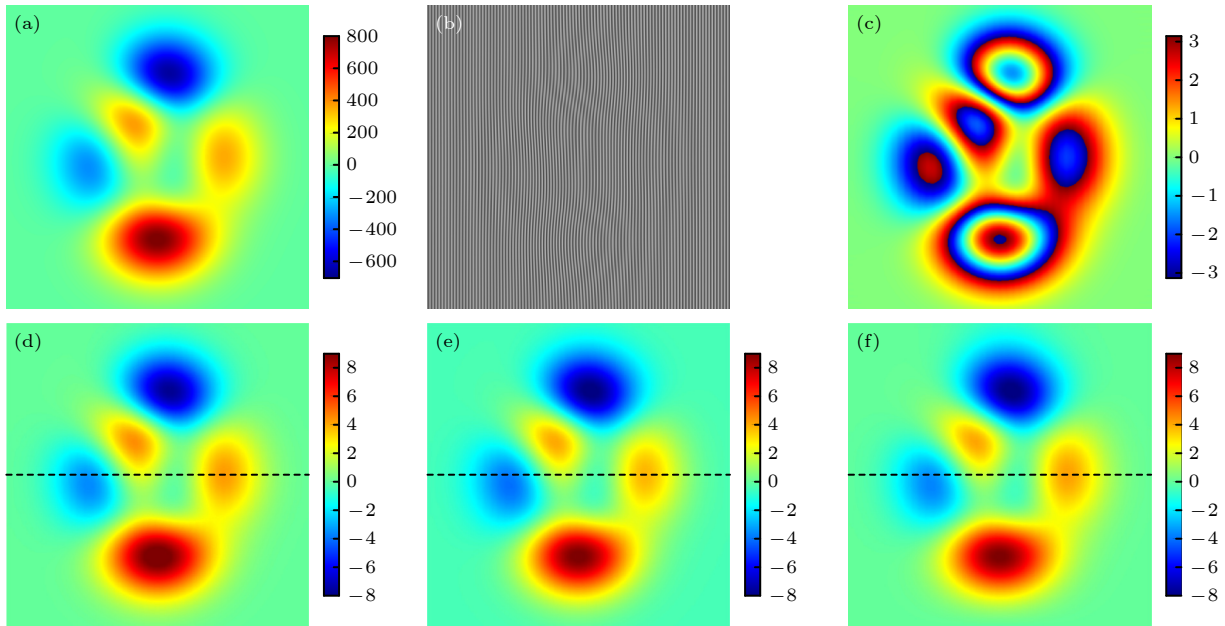


图 2 (a) Peak 值相位型物体及其 (b) 离轴全息图; (c) 傅里叶变换法的恢复结果; 使用 (d) 枝切法和 (e) 最小二乘法的解包裹结果; (f) 本文所提算法的恢复结果

Fig. 2. (a) Phase object with peak values and (b) its off-axis hologram; (c) the retrieved result of the Fourier transform; the unwrapped results by (d) branch-cut and (e) least square; (f) the retrieved result of this proposed algorithm.

波长为 532 nm 的光源,生成离轴全息图如图 2(b) 所示. 使用传统的复振幅相除的傅里叶变换相位恢复算法,得到恢复相位如图 2(c) 所示. 可见,使用传统算法恢复出的相位包裹,必须使用解包裹算法才能得到准确的解包裹信息. 分别使用枝切法和最小二乘法对图 2(c) 进行解包裹,得到解包裹相位为图 2(d) 和图 2(e) 所示. 然后,使用本文算法得到恢复相位如图 2(f) 所示. 可见,本文算法恢复出来的相位已经是解包裹相位. 为了显示统一,仅在文中显示尺寸为 500 pixel \times 500 pixel 的区域.

将 3 个恢复出的相位转换成对应的光程差,并提取黑色虚线标注位置的数据展示在图 3 中,三者数据完全重合. 经计算 3 种恢复算法恢复结果标准差均为 0.5371 nm.

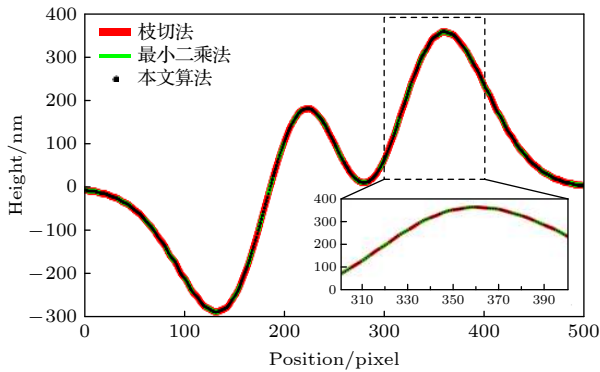


图 3 图 2(d)–(f) 中黑色虚线所标剖面数据

Fig. 3. One-dimensional (1D) phase profile along the black dashed lines in Figs. 2 (d)–(f).

此外,为了更全面评价所提算法在相位恢复方面的速度优势,使用枝切法、最小二乘法和该算法对多种尺寸 (256 pixel \times 256 pixel, 512 pixel \times 512 pixel 和 1024 pixel \times 1024 pixel) 的全息图进行恢复,所能达到的恢复速度如表 1 所列. 在处理尺寸为 256 pixel \times 256 pixel 的全息图时,相较于枝

切法和最小二乘法,本文算法分别提升了 7 倍和 2 倍,并且随着全息图尺寸的增大,速度提升越大. 可见本文算法在保证恢复质量的同时,大幅缩短计算时间.

表 1 三种算法比较

Table 1. Comparison of three algorithms.

| | 时间/s | | |
|-------|------------------|------------------|--------------------|
| | 256 \times 256 | 512 \times 512 | 1024 \times 1024 |
| 枝切法 | 0.0223 | 0.0850 | 0.3744 |
| 最小二乘法 | 0.0069 | 0.0242 | 0.0798 |
| 本文算法 | 0.0031 | 0.0087 | 0.0293 |

上述数值仿真实验验证了本文所提算法的有效性,不仅可以直接得到解包裹的真实相位信息,而且恢复质量和精度也与传统算法一致. 此外,由于仅需一幅数字位移的复振幅矩阵和一维积分等操作,整个算法所需时间远低于目前已有的单波长解包裹算法.

4 实验结果及分析

使用课题组最近提出的离轴数字全息系统^[28]采集全息图,其中使用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器作为光源,并使用 1280 pixel \times 1024 pixel (像素尺寸为 4.8 μ m \times 4.8 μ m) 的 CCD 相机记录全息图. 为了验证该技术的有效性,首先测量高度约为 580.22 nm(由 BRUKER 原子力显微镜测量所得)的相位台阶物体,该相位台阶由折射率为 1.5168 的 BK7 玻璃制成. 在本次实验中,采集的离轴全息图如图 4(a) 所示,使用基于傅里叶变换的相位恢复算法进行相位重建,恢复出的相位图如图 4(b) 所示. 由于引起光程差小于使用波长,所以并未引起包裹. 使用本文所提的算法,得到恢复结果如图 4(c) 所示.

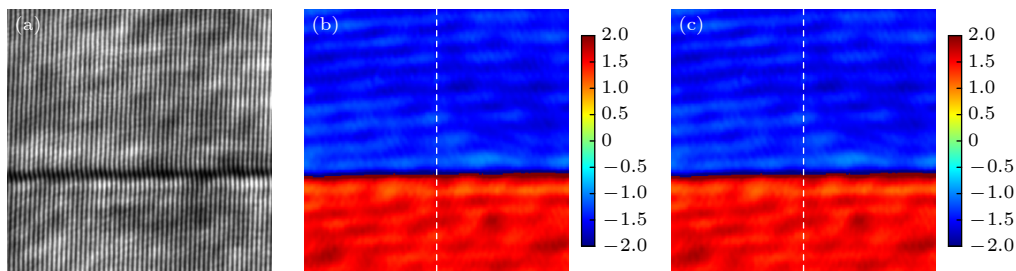


图 4 (a) 全息图; (b) 傅里叶变换法恢复结果; (c) 本文算法恢复结果

Fig. 4. (a) A hologram; (b) the retrieved result by Fourier transform; (c) the retrieved result by the proposed algorithm.

将两个恢复结果中白色虚线标注的相位信息提取出来, 计算出对应的高度信息, 一维高度剖面如图 5 所示, 二者恢复结果完全重合. 高度剖面的高度差为 583.24 nm, 与原子力显微镜测量结果基本吻合. 此外, 一维高度剖面的标准差 (standard deviation, SD) 分别为 20.997 nm 和 20.997 nm. 本实验验证了该技术可以实现精确测量.

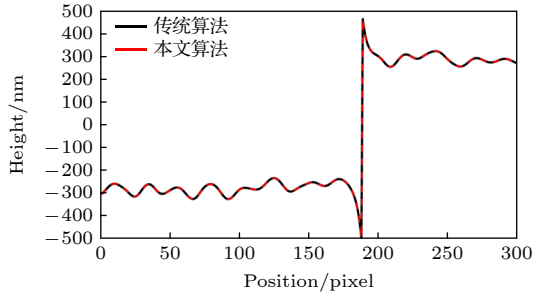


图 5 图 4(b) 和图 4(c) 中白色虚线所标剖面数据

Fig. 5. 1D phase profile along the black dashed lines in Fig. 4(b) and (c).

为了进一步验证本文算法对连续大相位物体的相位重建能力, 使用本文算法对酒精蒸发过程中某一时刻的状态进行处理. 图 6(a) 显示了记录的酒精蒸发过程中的全息图之一, 图 6(b), (c) 显示了经过枝切法和最小二乘解包裹后的两个相位信息, 图 6(d) 显示了本文算法直接恢复的相位信息. 为了更好地验证本文算法的有效性, 将图 6(b)—(d) 中白色虚线标注的数据提取出来, 展示在图 7 中, 二者高度一致.

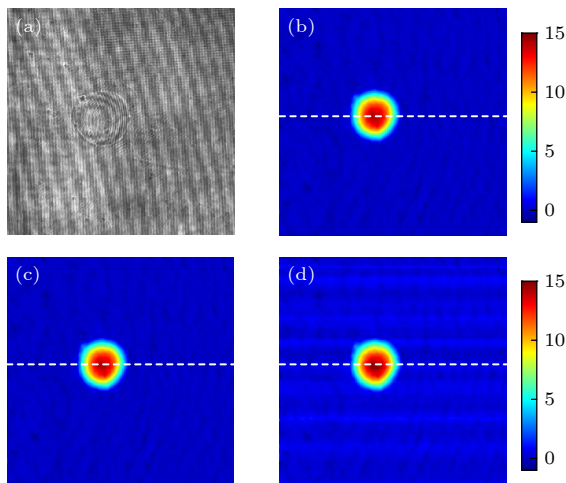


图 6 (a) 全息图; 使用 (b) 枝切法和 (c) 最小二乘的恢复结果; (d) 本文算法恢复结果

Fig. 6. (a) A hologram; the retrieved results by (b) branch-cut and (c) least square; (d) the retrieved results by the proposed algorithm.

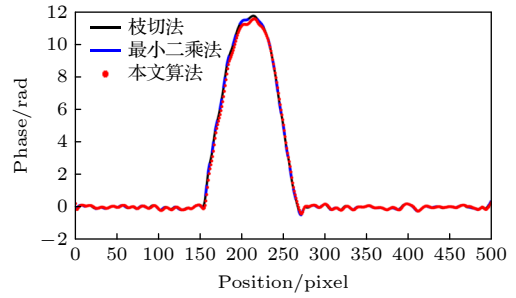


图 7 图 6(b)—(d) 中白色虚线所标剖面数据

Fig. 7. 1D phase profile along the black dashed lines in Fig. 6 (b)–(d).

通过上述两个实验验证了所提算法能够对具体实验中所采集到富含噪声的全息图进行有效正确的相位解包裹, 充分验证了本文算法的有效性和抗噪能力.

5 结 论

为了解决单波长数字全息解包裹算法计算量大、速度慢等问题, 本文利用复振幅中相位信息完整性的特点, 通过数字位移结合复振幅相除, 提出数字差分-积分的快速解包裹算法. 本文从数值仿真和具体实验两方面验证了所提算法, 不仅恢复质量和精度与已有算法高度一致, 而且恢复速度也得到了大幅提升. 并且, 本文算法简单便于实现, 为数字全息的快速、高质量重建提供有利的条件.

参考文献

- [1] Popescu G, Ikeda T, Dasari R R, Feld M S 2006 *Opt. Lett.* **31** 775
- [2] Du Y Z, Feng G Y, Li H R, Vargas J, Zhou S H 2012 *Opt. Lett.* **37** 3927
- [3] Shaked N T 2012 *Opt. Lett.* **37** 2016
- [4] Gabai H, Baranes-Zeevi M, Zilberman M, Shaked N T 2013 *Opt. Lett.* **38** 3017
- [5] Girshovitz P, Shaked N T 2014 *Light Sci. Appl.* **3** e151
- [6] Mahajan S, Trivedi V, Vora P, Chhaniwal V, Javidi B, Anand A 2015 *Opt. Lett.* **40** 3743
- [7] Nativ A, Shaked N T 2017 *Opt. Lett.* **42** 1492
- [8] Jiao Y H, Kandel M E, Liu X J, Lu W L, Popescu G 2020 *Opt. Express* **28** 34190
- [9] Rajput S K, Matoba O, Kumar M, Quan X Y, Awatsuji Y 2021 *Opt. Las. Eng.* **137** 106331
- [10] Zhang J W, Dai S Q, Ma C J, Xi T L, Di J L, Zhao J L 2021 *Light Adv. Manuf.* **2** 333
- [11] Barojas-Gutierrez E, Flores-Meneses C, Meneses-Fabian C 2023 *Opt. Las. Tech.* **157** 108691
- [12] Pham H V, Edwards C, Goddard L V, Popescu G 2013 *Appl. Opt.* **52** A97
- [13] Hao B G, Shan M G, Zhong Z, Diao M, Wang Y, Zhang Y B

- 2015 *J. Opt.* **17** 035602
- [14] Gao P, Harder I, Nercissian V, Mantel K, Yao B L 2010 *Opt. Lett.* **35** 712
- [15] Bai H Y, Shan M G, Zhong Z, Guo L L, Zhang Y B 2015 *Opt. Las. Eng.* **75** 1
- [16] Bai H Y, Shan M G, Zhong Z, Guo L L, Zhang Y B 2015 *Appl. Opt.* **54** 9513
- [17] Huang Z Z, Memmolo P, Ferraro P, Cao L C 2022 *Photonix* **3** 3
- [18] Zhong Z, Zhao W T, Shan M G, Liu L 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 154202 (in Chinese) [钟志, 赵婉婷, 单明广, 刘磊 2021 物理学报 **70** 154202]
- [19] Ma L H, Li Y, Wang H, Jin H Z 2012 *Appl. Opt.* **51** 8800
- [20] Arevalillo-Herráez M, Villatoro F, Gdeisat M 2016 *IEEE T. Image Process.* **25** 2601
- [21] de Souza J C, Oliveira M E, dos Santos P A M 2015 *Opt. Lett.* **40** 3456
- [22] Pritt M D, Shipman J S 1994 *IEEE T. Geosci. Remote* **32** 706
- [23] Li B Y, Tang C, Zhou Q L, Lei Z K 2019 *Appl. Opt.* **58** 219
- [24] Wei C, Ma J, Miao X Y, Wang N F, Zong Y, Yuan C J 2022 *Opt. Express* **30** 1686
- [25] Spoorthi G E, Gorthi R K S S, Gorthi S 2020 *IEEE T. Image Process.* **29** 4862
- [26] Wang K Q, Qian K M, Di J L, Zhao J L 2022 *Adv. Photonics Nexus* **1** 014001
- [27] Xu M, Tang C, Shen Y X, Hong N, Lei Z K 2022 *Opt. Las. Eng.* **151** 106824
- [28] Zhong Z, Wang C, Liu L, Yu L, Shan M G 2022 *J. Mod. Optics* **69** 219

Fast phase unwrapping using digital differentiation-integration method*

Wang Zi-Shuo¹⁾ Liu Lei^{1)2)†} Liu Chen-Bo¹⁾ Liu Ke¹⁾

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 28 March 2023; revised manuscript received 4 July 2023)

Abstract

Digital holography is one of the most widely used quantitative phase imaging technologies at present, owing to its non-contact, high-accuracy and full-field measurement. However, when the optical path difference induced by the measurement sample is larger than the used wavelength, a phase unwrapping algorithm has to be utilized to unwrap the phase and retrieve the actual phase. And the existing phase unwrapping algorithms suffer huge computational burden and slow retrieval speed. Although they have been greatly improved, their retrieval speed is limited by the phase unwrapping. In order to solve the above-mentioned problems, a digital differentiation-integration based phase unwrapping is proposed in this paper. This algorithm is based on the fact that the actual phase information is contained in the complex-valued function after Fourier transform, band-pass filter and inverse Fourier transform. After Fourier transform, band-pass filter and inverse Fourier transform, a complex-valued function containing the actual phase is retrieved, and two sub complex-valued functions can be extracted with just one-pixel shift digitally. Then, two functions are divided pixel by pixel, and another complex-valued function containing the differentiation of the actual phase is obtained. So the differential phase can be retrieved easily by the phase extraction. Finally, the retrieved differential phase is integrated along the inverse direction of shifting, and the unwrapped phase can be obtained directly. This algorithm can work effectively when the variation of the measurement phase is in a range of $(-\pi, \pi]$. This algorithm is just based on the Fourier transform and the complex-valued division. Unlike the existing unwrapping algorithms, this algorithm is much easier to conduct and has light computation burden. Therefore, this algorithm can realize fast and accurate phase reconstruction directly. Several simulation and experimental results can verify the effectiveness of this algorithm.

Keywords: off-axis digital holography, phase retrieval, Fourier transform, phase unwrapping

PACS: 42.40.Kw, 42.30.Rx, 02.30.Nw, 43.60.Tj

DOI: 10.7498/aps.72.20230473

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62175048), the Foundation of National Key Laboratory on Ship Vibration and Noise, China (Grant No. 6142204220206), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 3072022QBZ0807).

† Corresponding author. E-mail: liulei2015@hrbeu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: smgsir@gmail.com

数字差分-积分快速相位解包裹算法研究

王子硕 刘磊 刘晨博 刘珂 钟志 单明广

Fast phase unwrapping using digital differentiation-integration method

Wang Zi-Shuo Liu Lei Liu Chen-Bo Liu Ke Zhong Zhi Shan Ming-Guang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 184201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230473

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230473>

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

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>

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 synthetical wavelengths

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

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>

一种基于图像融合和卷积神经网络的相位恢复方法

Phase retrieval wavefront sensing based on image fusion and convolutional neural network

物理学报. 2021, 70(5): 054201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201362>

基于分数阶螺旋相位片的定量相位显微成像

Quantitative phase microscopy imaging based on fractional spiral phase plate

物理学报. 2021, 70(15): 158702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201884>

基于单一分光棱镜干涉仪的双通路定量相位显微术

Dual-channel quantitative phase microscopy based on a single cube beamsplitter interferometer

物理学报. 2018, 67(14): 140704 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172722>