

# 谱域相位显微成像的相位解包裹

周红仙<sup>1</sup>, 朱礼达<sup>2</sup>, 赵玉倩<sup>3</sup>, 马振鹤<sup>3</sup>, 王毅<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> 东北大学秦皇岛分校实验教育中心, 河北 秦皇岛 066004;

<sup>2</sup> 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

<sup>3</sup> 东北大学秦皇岛分校控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 提出了一种应用于谱域相位显微成像的相位解包裹方法。利用傅里叶变换及合成波长相位计算方法分别得到具有较小噪声的包裹相位和具有较大噪声的解包裹相位, 利用解包裹相位与包裹相位之差计算包裹相位的包裹次数, 以此对具有较小噪声的包裹相位进行解包裹。该方法消除了现有方法引入的边界分段错误。建立了一种基于合成波长的谱域相位显微成像系统, 使用压电位移台定量验证了该系统可以用于大梯度边界的相位解包裹, 并进行了红细胞和倾斜镜面的相位成像。该系统在空气中的位移灵敏度为 0.043 nm。

**关键词** 成像系统; 谱域相位显微成像; 定量相位成像; 相位解包裹; 合成波长

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0211004

## Phase Unwrapping in Spectral Domain Phase Microscopy

Zhou Hongxian<sup>1</sup>, Zhu Lida<sup>2</sup>, Zhao Yuqian<sup>3</sup>, Ma Zhenhe<sup>3</sup>, Wang Yi<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Experiment Education Center, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

<sup>2</sup> School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

<sup>3</sup> School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

**Abstract** A phase unwrapping method used in the spectral domain phase microscopy (SDPM) is proposed. A wrapped phase with a small noise and an unwrapped phase with a big noise are obtained by using respectively the Fourier transform (FT) method and the synthetic-wavelength phase calculation method. The wrapped number of the wrapped phase is calculated from the difference between the unwrapped and wrapped phases, and thus the unwrapping of the wrapped phase with a small noise is conducted. The presented method eliminates the boundary segmentation error introduced in the existing phase unwrapping methods. An SDPM system based on synthetic-wavelength is established. A piezoelectric translation stage is used to quantitatively verify that this system is capable of accurately unwrapping the phase with a large gradient boundary. The phase imaging of red blood cells and tilted mirror surfaces is also performed. The displacement sensitivity of this system in air is 0.043 nm.

**Key words** imaging systems; spectral domain phase microscopy; quantitative phase imaging; phase unwrapping; synthetic wavelength

**OCIS codes** 110.4500; 100.5088

## 1 引 言

定量相位成像(QPI)可以提供纳米精度的结构及动态信息, QPI 技术在微观表面轮廓成像及细胞成像方面得到了广泛的关注<sup>[1-6]</sup>, 利用 QPI 可以实现活体细胞无标记成像, 得到细胞三维尺寸信息。相衬显微镜和微分干涉显微镜将相位转换为强度,

由于相位与强度呈非线性关系, 这两种技术仅能进行定性的相位成像<sup>[7-8]</sup>。相移干涉成像、数字全息、傅里叶相位显微镜及希尔伯特相位显微镜能够实现细胞纳米精度的定量相位成像<sup>[9-15]</sup>, 相位成像利用细胞内源性折射率及结构差异, 结合干涉测量技术的高灵敏度, 具有非侵入、无损伤和可定量的优点, 为生物研究提供了一种有力工具。然而, 上述相位

收稿日期: 2018-08-16; 修回日期: 2018-09-05; 录用日期: 2018-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(61771119, 61275214, 31170956)、河北省自然科学基金(A2015501065, H2015501133)、中央高校基本科研业务费(N172304034)

\* E-mail: wangyi@neuq.edu.cn

成像技术均存在相位包裹问题。相位包裹是干涉技术的一种固有现象,干涉耦合项的周期性导致无法解调真实相位,只能给出位于 $[-\pi, \pi]$ 区间的主值部分(包裹相位),而包裹相位与真实相位之间相差 $2\pi$ 的整数倍<sup>[16]</sup>。目前,已有多种数值解包裹方法被提出<sup>[17]</sup>,数值解包裹是根据样品相位的连续性,对解调结果进行相应的相位补偿,但是当样品相位变化较大或噪声较大时,数值解包裹会出现错误,而且,当相邻两点的相位差大于 $\pi$ 时,数值解包裹无法恢复真实相位<sup>[18-19]</sup>。

随着光学相干层析(OCT)技术的发展,相位分辨谱域 OCT 也被用于定量相位成像,即谱域相位显微成像(SDPM),结合共光路技术,SDPM 具有亚纳米的稳定性和灵敏度<sup>[20-21]</sup>。另外,SDPM 具有深度分辨的优点,可以用于多层样品的相位成像,这是其他 QPI 技术无法实现的。然而,与其他干涉方法类似,SDPM 也存在相位包裹问题。目前,已提出多种方法以解决 SDPM 的相位包裹,在本课题组前期研究中,将相邻两点相位差绝对值的限制条件由目前的 $\pi$ 扩大到 $2\pi$ <sup>[1]</sup>;Hendargo 等<sup>[22]</sup>将合成波长方法用于 SDPM,Zhang 等<sup>[23]</sup>提出利用线性拟合的谱域方法计算相位,这两种方法都可以消除相位包裹,但是得到的非包裹相位噪声较大,因此需要使用非包裹相位对具有较小噪声的包裹相位进行分段补偿<sup>[22-24]</sup>。与数值解包裹方法不同,这种方法不受相邻两点相位差不能大于 $\pi$ 的限制。但是,在对非包裹相位进行分段的过程中,当非包裹相位接近 $2\pi$ 分段边界时,噪声的影响会导致 $2\pi$ 的补偿误差,即使较小的噪声,这种错误也会出现。

为了消除 SDPM 中的相位解包裹错误,本文提出了一种改进的相位补偿方法,首先利用傅里叶变换和合成波长方法分别得到包裹相位和非包裹相位,以此对具有较小噪声的包裹相位进行解包裹。现有方法是针对非包裹相位进行 $2\pi$ 分段,确定包裹次数;与现有方法不同,所提方法是在非包裹相位中减去主值,再对非包裹相位中的 $2\pi$ 整数倍部分进行判断,这种方法消除了现有分段方法引入的边界分段错误。

## 2 方法及装置

### 2.1 相位解包裹方法

在 SDPM 或 OCT 中,当样品具有单一反射面时,干涉光谱可以表示为

$$I(k) = S(k)[I_s + I_r + 2\sqrt{I_s I_r} \cos(2\pi kd + \theta)], \quad (1)$$

式中: $k$ 为波数; $S(k)$ 为光源光谱强度分布函数; $I_s$ 和 $I_r$ 分别为来自于样品臂和参考臂的背向散射光强;样品面和参考面之间的光程差(OPD)由 $d$ 和 $\theta$ 决定, $d = n\Delta d$ , $n$ 为整数, $\Delta d$ 为傅里叶变换频域分辨率, $\Delta d = 1/(\Delta k N)$ , $\Delta k$ 和 $N$ 分别为光谱的波数采样间隔和采样数目; $\theta = \theta_0 + 2m\pi$ , $\theta_0$ 为相位主值, $m$ 为整数。OPD 可表示为 $n\Delta d + \delta$ , $\delta$ 表示光程差小于 $\Delta d$ 的部分, $\delta = \theta/(2\pi k_c)$ 。 $\Delta d$ 决定于光源带宽,通常为几微米, $\delta$ 的精度可以达到亚纳米,SDPM 用两种尺度表示光程,可以实现大范围、高灵敏度的检测。但是,由傅里叶变换只能得到 $\theta$ 的主值 $\theta_0$ ,其范围仅为 $[-\pi, \pi]$ ,对应的光谱范围为 $[-\lambda_c/2, \lambda_c/2]$ , $\lambda_c$ 表示光谱的中心波长。

首先利用合成波长法计算相位<sup>[22]</sup>,把干涉光谱分成两部分,假定两部分光谱的中心波长分别为 $\lambda_{c1}$ 和 $\lambda_{c2}$ ,经傅里叶变换得到两部分光谱的包裹相位 $\theta_{c1,w}$ 、 $\theta_{c2,w}$ ,假定由全部光谱计算的包裹相位为 $\theta_{c,w}$ 。为了描述方便,令 $\theta_{c1,w}$ 、 $\theta_{c2,w}$ 和 $\theta_{c,w}$ 分别对应波长 $\lambda_{c1}$ 、 $\lambda_{c2}$ 和 $\lambda_c$ 的结果, $\lambda_c$ 表示全部光谱的中心波长。将 $\theta_{c1,w}$ 和 $\theta_{c2,w}$ 作差,得到

$$\theta_s = \theta_{c1,w} - \theta_{c2,w} = 2\pi\delta(1/\lambda_{c1} - 1/\lambda_{c2}) = 2\pi\delta/[\lambda_{c1}\lambda_{c2}/(\lambda_{c2} - \lambda_{c1})], \quad (2)$$

式中: $\lambda_s$ 为合成波长, $\lambda_s = \lambda_{c1}\lambda_{c2}/(\lambda_{c2} - \lambda_{c1})$ ,由于 $\lambda_s$ 远大于单一波长 $\lambda_{c1}$ 、 $\lambda_{c2}$ 及 $\lambda_c$ ,因此相位包裹的范围不会增大,但是噪声被放大。由合成波长的非包裹相位 $\theta_s$ 计算得到波长 $\lambda_c$ 对应的非包裹相位 $\theta'_{c,uw} = \theta_s \lambda_s / \lambda_c$ , $\theta'_{c,uw}$ 可以表示为

$$\theta'_{c,uw} = \theta_{c0} + 2a\pi + \theta'_{cn}, \quad (3)$$

式中: $a$ 为整数,即包裹次数; $\theta_{c0}$ 为主值,可近似为 $\theta_{c,w}$ ; $\theta'_{cn}$ 为噪声。由于 $\theta'_{cn}$ 远大于单一波长 $\lambda_c$ 对应的相位噪声(噪声被放大 $2\lambda_s/\lambda_c$ 倍)<sup>[25]</sup>,因此由合成波长得到的非包裹相位 $\theta'_{c,uw}$ 只能用于计算包裹次数 $a$ ,对噪声较小的单一波长的包裹相位 $\theta_{c,w}$ 进行修正。现有的修正方法是对合成波长的非包裹相位 $\theta'_{c,uw}$ 直接进行 $2\pi$ 分段<sup>[22-24]</sup>,以确定包裹次数 $a = \text{floor}[(\theta'_{c,uw} + \pi)/2\pi]$ <sup>[22-24]</sup>, $\text{floor}[\ ]$ 表示向下取整,但是当合成波长的相位接近 $2\pi$ 分段的边界时(即 $\theta'_{c,uw}$ 的主值 $\theta_{c0}$ 接近 $\pi$ 的奇数倍),噪声的影响会导致包裹次数出现 $\pm 1$ 的错误,在对单一波长的相位修正中出现 $\pm 2\pi$ 的错误,即使较小的噪声也会导致这种分段错误发生。为了消除边界分段错误,在本研究中,在非包裹相位中减去主值部分,再进行包裹次数计算。因此,波长 $\lambda_c$ 的低噪声解包裹相位 $\theta_{c,w}$ 可表示为

$$\theta_{c,uw} = \theta_{c,w} + 2\pi \left[ \text{round} \left( \frac{\theta_s \lambda_s / \lambda_c - \theta_{c,w}}{2\pi} \right) \right] \approx \theta_{c,w} + 2\pi \left[ \text{round} \left( \frac{2a\pi + \theta'_{cn}}{2\pi} \right) \right], \quad (4)$$

式中:round()表示最近取整; $\theta_s$ 为合成波长的非包裹相位; $\theta_{c,w}$ 为由全部干涉光谱计算得到的包裹相位。从(3)式和(4)式可以看出,这种补偿方法不存在边界问题,仅受噪声 $\theta'_{cn}$ 的影响,当 $|\theta'_{cn}|$ 大于 $\pi$ 时,才会导致包裹次数的计算错误,当噪声过大时,可以首先对 $\theta'_{c,uw}$ 进行滤波降噪。

对 $\theta_{c,w}$ 的解包裹步骤为:

1) 经傅里叶变换,由全部干涉光谱(中心波长为 $\lambda_c$ )计算得到包裹相位 $\theta_{c,w}$ ;把干涉光谱分成两部分,两部分光谱的中心波长分别为 $\lambda_{c1}$ 和 $\lambda_{c2}$ ,由两部分光谱分别经傅里叶变换得到的包裹相位为 $\theta_{c1,w}$ 和 $\theta_{c2,w}$ 。

2) 将 $\theta_{c1,w}$ 和 $\theta_{c2,w}$ 作差,得到 $\theta'_s$ ,即合成波长的结果,由于 $\theta_{c1,w}$ 和 $\theta_{c2,w}$ 存在相位包裹,使 $\theta'_s$ 在 $\theta_{c1,w}$ 和 $\theta_{c2,w}$ 的相位包裹位置产生 $2\pi$ 的跳变,因此首先对 $\theta'_s$ 进行修正,当 $\theta'_s$ 小于 $-\pi/2$ 时加 $2\pi$ ,当 $\theta'_s$ 大于 $\pi/2$ 时减 $2\pi$ ,得到合成波长的非包裹结果 $\theta_s$ 。

3) 根据(4)式得到 $\theta_{c,uw}$ ,即全部干涉光谱对应的解包裹相位。

## 2.2 实验装置

实验系统如图1所示,主要器件为自建光纤式迈克耳孙干涉仪。该系统和本课题组以前使用的系统类似<sup>[1]</sup>,这里仅对系统进行简单说明,使用的光源为超辐射发光二极管(SLD, VLSL1310B015, 宸飞光电通讯设备有限公司,中国),光源中心波长为1310 nm,带宽为62 nm。光源发出的光进入光纤环形器(CIR-1310-50-APC, Thorlabs公司,美国),从环形器端口2输出,经准直器(F260APC-C, Thorlabs公司,美国)准直,经扫描振镜(TSH8203, 世纪桑尼科技有限公司,中国)及透镜组聚焦于样品。对于干涉测量系统,外界振动及气流扰动是影响系统稳定性的主要因素。在本系统中,用一个分光片(BSW29R, Thorlabs公司,美国)的下表面作为参考面,样品光和参考光采用共光路模式,分光片和样品置于同一平台上,参考面随样品一起振动,最大限度消除外界振动的影响。反射的样品光和参考光沿原路返回环形器,从环形器端口3进入自建光谱仪。自建光谱仪主要包括透射光栅(1145 line/mm, Wasatch Photonics公司,美国)和高速线阵相机(GL2048L, Sensors Unlimited公司,美国),由光谱仪实时采集干涉光谱,使用图像采集卡(PCI 1433,

NI公司,美国)将干涉光谱传给计算机进行处理。为减小波数非线性及色散的影响,采用多项式进行光谱优化,得到以线性波数表示的干涉光谱<sup>[26]</sup>。在进行合成波长相位计算时,将干涉光谱(2048个采样点)分成1~1500和501~2000两部分,经定标,全光谱中心波长为1317 nm,合成波长为97454 nm,合成波长的非包裹范围扩大到原波长的74倍。

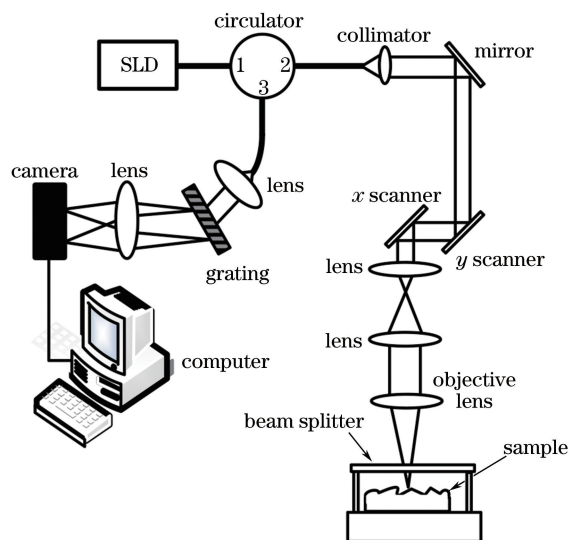


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

## 3 实验结果

相位解调仿真结果如图2所示,假定光程呈线性增加,干涉光谱的带宽为100 nm,光谱采样点数为2048,中心波长 $\lambda_c$ 为1250 nm,将光谱从中间分为两半,对这两部分光谱计算得到的包裹相位为 $\theta_{c1,w}$ 和 $\theta_{c2,w}$ ,如图2(a)中蓝线和红线所示。黑线表示 $\theta_{c1,w}$ 和 $\theta_{c2,w}$ 的差,即 $\theta'_s$ ,按照解包裹步骤2)对 $\theta'_s$ 进行修正,得到合成波长的非包裹结果 $\theta_s$ ,由 $\theta_s$ 计算波长 $\lambda_c$ 的非包裹相位 $\theta'_{c,uw} = \theta_s \lambda_s / \lambda_c$ ,如图2(b)中绿线所示。图2(b)中蓝线表示由全部干涉光谱计算得到的包裹相位 $\theta_{c,w}$ ,与 $\theta_{c,w}$ 相比, $\theta'_{c,uw}$ 显示较大的噪声。使用现有补偿方法对 $\theta_{c,w}$ 补偿的结果如图2(b)中红线所示,相位补偿量为 $2\pi \{ \text{floor} [ (\theta'_{c,uw} + \pi) / 2\pi ] \}$ <sup>[23-24]</sup>。可以看出,在分段边界(即 $\theta_{c,w}$ 发生相位包裹的位置)出现了明显的 $\pm 2\pi$ 补偿错误。图2(b)中黑线为使用(4)式补偿的结果。为了显示清楚,红线和黑线向上依次平移,可以看出,使用所提方法可得到 $\theta_{c,w}$ 的正确解包裹,有效消除了现有方

法的边界错误。增加噪声后的结果如图 2(c) 所示, 当噪声大于  $\pi$  时, 使用所提方法同样出现了补偿错误。从图 2(c) 可以看出, 现有方法的补偿错误集中在分段边界, 而所提方法的补偿错误是随机分布的, 这也说明了所提方法不存在边界问题。对  $\theta'_{c,uw}$  进行低通滤波降噪预处理, 再进行  $\theta_{c,w}$  补偿的结果如图 2(d) 所示。结果显示, 所提方法可以正确地进行补偿, 而现有方法仍然无法消除分段边界的错误, 说

明所提方法具有较好的抗噪能力。以上仿真及下面的相位计算用 Matlab 完成。

系统稳定性实验结果如图 3 所示, 连续测量经盖玻片上下表面反射光的干涉光谱, 上下表面反射光的光程差随时间的涨落如图 3(a) 所示, 涨落的最大幅度小于 0.15 nm, 相位涨落的直方图如图 3(b) 所示, 均方差为 0.043 nm, 说明该系统的灵敏度及稳定性达到亚纳米。

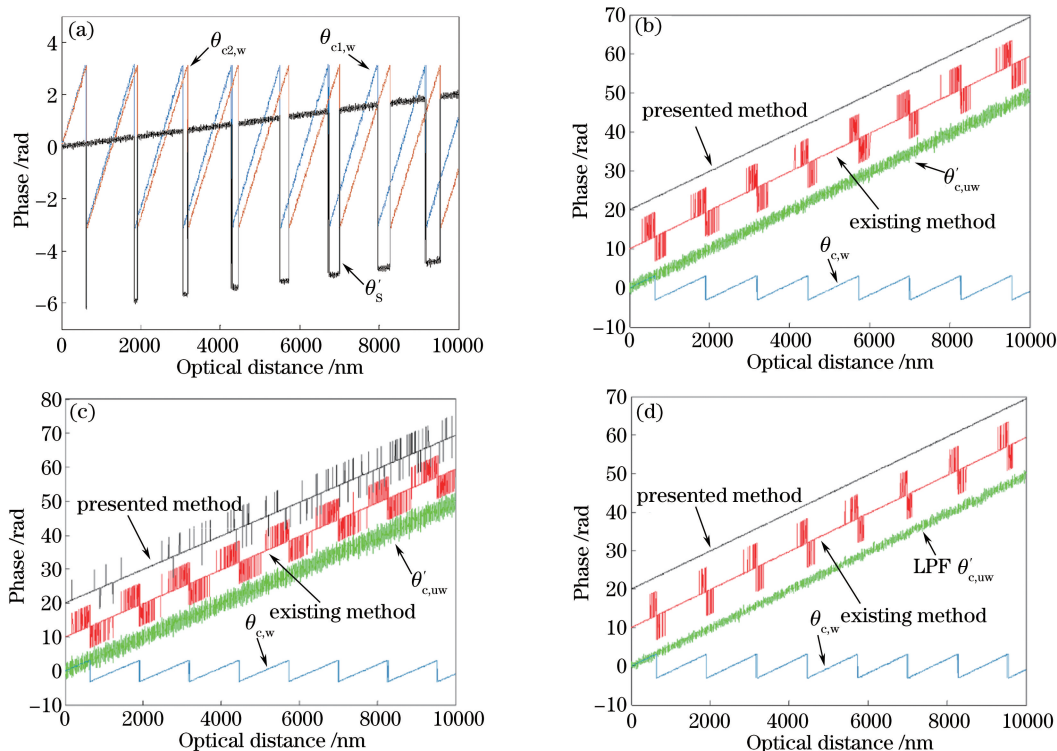


图 2 相位解包裹仿真结果。(a) 分段干涉光谱的包裹相位及两者之差; (b) 小噪声下和 (c) 大噪声下现有方法与所提方法的解包裹结果比较; (d) 经过降噪处理后的解包裹结果

Fig. 2 Simulation results of phase unwrapping. (a) Wrapped phase of segmented spectral fringes and their difference; comparison of unwrapped results between proposed and existing methods under condition of (b) small or (c) big noise; (d) unwrapped results after noise reduction

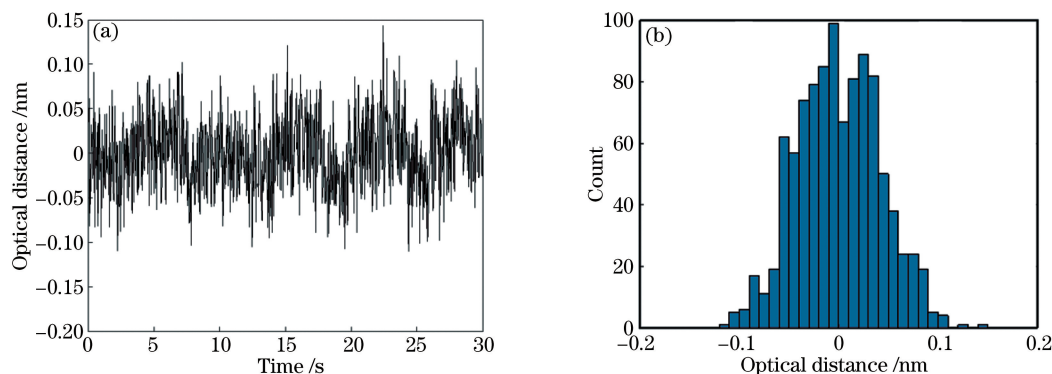


图 3 系统稳定性实验结果。(a) 相位差随时间的涨落; (b) 相位涨落直方图

Fig. 3 Experimental results of system stability. (a) Phase difference fluctuation with time; (b) histogram of phase fluctuation



为了比较现有方法和所提方法的差异,对倾斜的镜面进行成像,结果如图 4 所示。图 4(a)为直接经傅里叶变换得到的包裹相位(中心波长为 1317 nm),其范围为 $[-\pi, \pi]$ 。图 4(b)为合成波长的结果(中心波长为 97454 nm),由于合成波长远大于单一中心波长,相对于合成波长,整个待测高度的相位分布为 $-0.59 \sim -0.15$  rad,因此合成波长的结果没有产生相位包裹。图 4(c)、(d)分别为使用现有方法和所提方法的结果,可以看出,在使用现有方法进行补偿时,出现了明显的边界错误,而使用所提方法没有出现类似的错误,实验结果和前面的分析

及仿真结果吻合。图 4(d)中,整个待测高度的相位为 $-7.01 \sim 25.97$  rad。

对大梯度边界的测量结果如图 5 所示,选用纳米级精密压电位移台(P-620,PI 公司,美国)对所提方法进行定量验证,把反射镜固定于位移台,探测面随着位移台同步振动,设定为阶跃型振动,高度为 2000 nm。图 5(a)为直接经傅里叶变换得到的包裹相位(中心波长为 1317 nm),图 5(b)为使用所提方法得到的解包裹结果,台阶平均高度为 1987.93 nm,绝对误差为 12.07 nm,相对误差为 0.6%,误差可能主要来源于中心波长的定标误差。图 5(b)中,在台

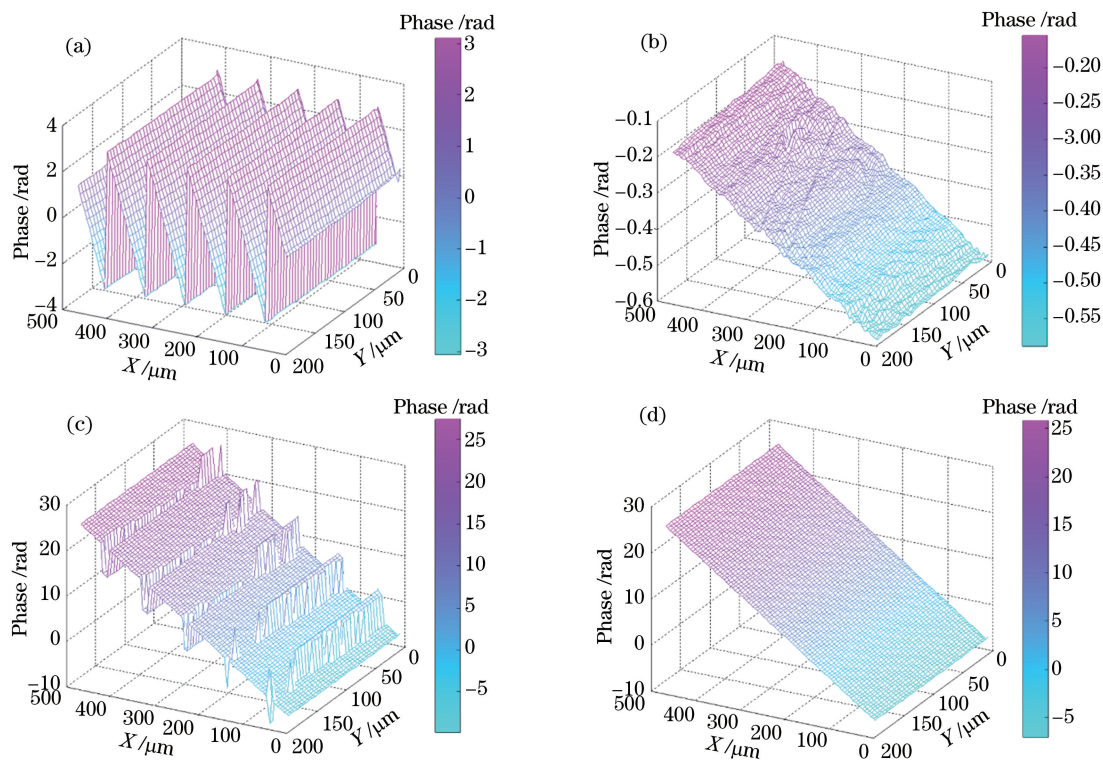


图 4 倾斜镜面的表面轮廓成像。(a)包裹相位;(b)合成波长相位;(c)使用现有方法的补偿结果;(d)使用所提方法的补偿结果  
Fig. 4 Surface profile imaging of tilted mirror. (a) Wrapped phase; (b) phase of synthetic wavelength; (c) compensation result with existing method; (d) compensation result with proposed method

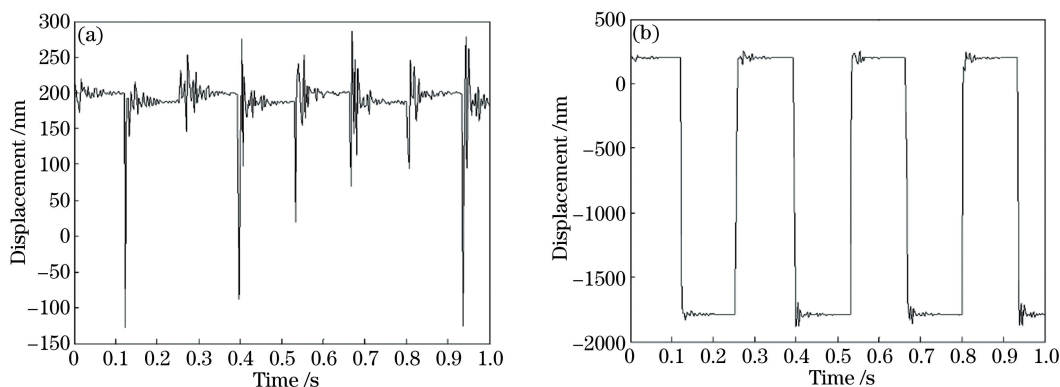


图 5 阶跃振动的测量结果。(a)包裹结果;(b)使用所提方法解包裹的结果  
Fig. 5 Measurement results of step vibration. (a) Wrapped result; (b) unwrapped result with proposed method

阶的起始部分出现振荡,然后逐渐趋于平稳,这可能是由压电位移台本身的机械特性所引起。数值解包裹无法应用于梯度较大边界,而使用所提方法可以得到正确的解包裹结果。

小鼠红细胞的定量相位成像如图(6)所示,使用20倍显微物镜( $NA=0.42$ )进行观察,可以清晰看出红细胞中间凹陷的圆饼状结构,其几何尺寸和正常红细胞吻合。计算红细胞高度所用参数:细胞外生理盐水折射率为1.345,红细胞的平均折射率为1.388<sup>[6]</sup>。图6所示的红细胞边缘比较平坦,这是因为使用了分辨率较低的20倍显微物镜,使用较高倍数显微物镜可以提高横向分辨率。

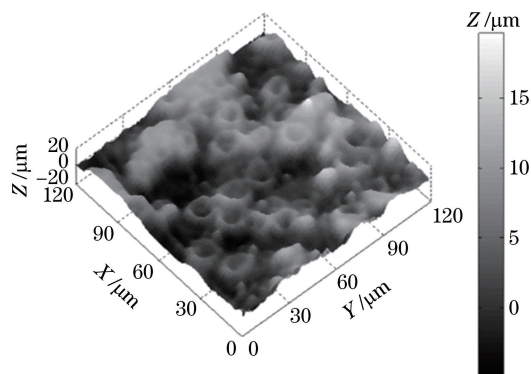


图6 红细胞定量相位成像

Fig. 6 Quantitative phase imaging of red blood cells

## 4 讨 论

尽管SDPM可以进行高灵敏度的定量相位成像,但是相位包裹限制了其应用范围,在本课题组前期研究中,将相邻两点相位差绝对值的限制条件由目前的 $\pi$ 扩大到 $2\pi$ <sup>[1]</sup>;目前的基于 $2\pi$ 分段的SDPM相位修正方法中,容易产生 $\pm 1$ 的分段错误,导致 $\pm 2\pi$ 的补偿错误,当相位接近分段边界时( $\pi$ 的奇数倍),即使较小的噪声,也会导致这种分段错误发生,特别是当相位值在分段边界连续分布时,这种错误是不可避免的,如图2(b)、(d)和图4(c)所示,在边界上的较小噪声被放大到 $\pm 2\pi$ 。从图1(b)、(d)和图4(c)可以看出,这种 $\pm 2\pi$ 错误通常在边界附近连续分布,而不是孤立点,因此这种错误不容易消除。

从以上的实验结果可以看出,提出的相位补偿方法可以有效地消除SDPM中的相位包裹。从(3)式和(4)式可知,这种方法仅对相位中 $2\pi$ 整数倍部分进行判断,不存在边界问题,仅受噪声的影响,当噪声大于 $\pi$ 时,才会导致包裹次数的计算错误,如图2(b)、(d)和图4(c)所示,在同样噪声下,所提方法

优于现有的分段补偿方法。与数值相位解包裹方法不同,这种方法不受相邻两点相位差不能大于 $\pi$ 的限制,可以对变化较大的边界进行解调,如图5(b)所示。

合成波长的结果具有较大的噪声,因此只能应用于对包裹次数的判断。这种方法并不影响测量精度,测量精度和单一波长的精度相同。当两个单一波长相差较小时,合成波长越大,形成的非包裹范围越大,但是合成波长过大时,噪声会相应增加,影响对包裹次数的判断。

使用共光路方式可以最大限度地消除外界干扰,提高系统稳定性,但是这种方法不适用于使用高分辨率显微物镜。高分辨率显微物镜的较小景深要求样品面和参考面之间具有较小的空隙,这会对系统调节带来困难;同时,也增加了参考面的离焦程度,导致参考光较弱,相应地增加了相位噪声,这是该系统需要解决的问题。

## 5 结 论

现有的 $2\pi$ 分段补偿方法可以部分消除SDPM的相位包裹,但是这种方法会在分段边界引入 $\pm 2\pi$ 误差,导致噪声放大。提出的相位解包裹方法对相位的 $2\pi$ 整数倍部分进行判断,不存在边界问题。以合成波长SDPM系统对这种相位解包裹方法进行了实验验证,使用压电位移台验证了该方法可以用于大梯度边界的测量;进行了镜面表面轮廓成像,与现有的补偿方法进行比较,结果显示所提方法可以消除现有方法存在的边界错误。该方法也可应用于其他基于 $2\pi$ 分段的相位解包裹技术,如合成波长数字全息及谱域相位解包裹。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Y, Guo Z, Zhu L D, *et al.* Nanoscale surface topography imaging using phase-resolved spectral domain optical coherence tomography [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(15): 154202.  
王毅, 郭哲, 朱立达, 等. 基于谱域相位分辨光学相干层析的纳米级表面形貌成像[J]. *物理学报*, 2017, 66(15): 154202.
- [2] Groot P D. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 1-65.
- [3] Bruzzone A A G, Costa H L, Lonardo P M, *et al.* Advances in engineered surfaces for functional performance[J]. *CIRP Annals*, 2008, 57(2): 750-769.

- [4] Leach R, Giusca C L, Naoi K. Development and characterization of a new instrument for the traceable measurement of areal surface texture [J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(12): 125102.
- [5] Wang D P, He C L, Stoykovich M P, *et al.* Nanoscale topography influences polymer surface diffusion[J]. ACS Nano, 2015, 9(2): 1656-1664.
- [6] Park Y K, Diez-Silva M, Popescu G, *et al.* Refractive index maps and membrane dynamics of human red blood cells parasitized by plasmodium falciparum[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(37): 13730-13735.
- [7] Richards O W. Phase difference microscopy [J]. Nature, 1944, 154(3917): 672-672.
- [8] Gundlach H. Phase contrast and differential interference contrast instrumentation and applications in cell, developmental, and marine biology [J]. Optical Engineering, 1993, 32(12): 3223-3228.
- [9] Creath K. Phase-shifting speckle interferometry[J]. Applied Optics, 1985, 24(18): 3053-3058.
- [10] Cuche E, Bevilacqua F, Depeursinge C. Digital holography for quantitative phase-contrast imaging [J]. Optics Letters, 1999, 24(5): 291-293.
- [11] Mann C J, Yu L F, Lo C M, *et al.* High-resolution quantitative phase-contrast microscopy by digital holography [J]. Optics Express, 2005, 13(22): 8693-8698.
- [12] Popescu G, Deflores L P, Vaughan J C, *et al.* Fourier phase microscopy for investigation of biological structures and dynamics [J]. Optics Letters, 2004, 29(21): 2503-2505.
- [13] Lue N, Choi W, Popescu G, *et al.* Quantitative phase imaging of live cells using fast Fourier phase microscopy [J]. Applied Optics, 2007, 46(10): 1836-1842.
- [14] Ikeda T, Popescu G, Dasari R R, *et al.* Hilbert phase microscopy for investigating fast dynamics in transparent systems [J]. Optics Letters, 2005, 30(10): 1165-1167.
- [15] Popescu G, Ikeda T, Best C, *et al.* Erythrocyte structure and dynamics quantified by Hilbert phase microscopy [J]. Journal of Biomedical Optics, 2005, 10(6): 060503.
- [16] Zhang B, Wang K R, Yan B B, *et al.* Phase unwrapping method based on dual wavelength and  $3 \times 3$  fiber coupler with interferometric measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0412004.
- 张冰, 王葵如, 颜纷纷, 等. 基于双波长和  $3 \times 3$  光纤耦合器的干涉测量相位解卷绕方法 [J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0412004.
- [17] Qian X F, Rao F, Li X H, *et al.* Accurate least-squares phase unwrapping algorithm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(2): 0209001.
- 钱晓凡, 饶帆, 李兴华, 等. 精确最小二乘相位解包裹算法 [J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0209001.
- [18] Liu S, Yang L X. Regional phase unwrapping method based on fringe estimation and phase map segmentation [J]. Optical Engineering, 2007, 46(5): 051012.
- [19] Goldstein G, Creath K. Quantitative phase microscopy: automated background leveling techniques and smart temporal phase unwrapping [J]. Applied Optics, 2015, 54(16): 5175-5185.
- [20] Joo C, Akkin T, Cense B, *et al.* Spectral-domain optical coherence phase microscopy for quantitative phase-contrast imaging [J]. Optics Letters, 2005, 30(16): 2131-2133.
- [21] Choma M A, Ellerbe A K, Yang C, *et al.* Spectral-domain phase microscopy [J]. Optics Letters, 2005, 30(10): 1162-1164.
- [22] Hendargo H C, Zhao M T, Shepherd N, *et al.* Synthetic wavelength based phase unwrapping in spectral domain optical coherence tomography [J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5039-5051.
- [23] Zhang J, Rao B, Yu L F, *et al.* High-dynamic-range quantitative phase imaging with spectral domain phase microscopy [J]. Optics Letters, 2009, 34(21): 3442-3444.
- [24] Yan Y Z, Ding Z H, Shen Y, *et al.* High-sensitive and broad-dynamic-range quantitative phase imaging with spectral domain phase microscopy [J]. Optics Express, 2013, 21(22): 25734-25743.
- [25] Gass J, Dakoff A, Kim M K. Phase imaging without  $2\pi$  ambiguity by multiwavelength digital holography [J]. Optics Letters, 2003, 28(13): 1141-1143.
- [26] Ma Z H, He Z H, Wang S. Practical approach for dispersion compensation in spectral-domain optical coherence tomography [J]. Optical Engineering, 2012, 51(6): 063203.