

# 对基于图像分割与合并的相位展开算法的改进

王华英<sup>1,2</sup> 张志会<sup>1</sup> 刘飞飞<sup>1</sup> 宋修法<sup>2</sup> 熊南燕<sup>3</sup> 赵宝群<sup>2</sup> 于梦杰<sup>1</sup> 刘佐强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>河北工程大学信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038  
<sup>2</sup>河北工程大学理学院, 河北 邯郸 056038  
<sup>3</sup>河北工程大学医学院, 河北 邯郸 056038

**摘要** 为了提高基于图像分割与合并的相位展开算法的精度,对已有的一种算法进行多方面改进,采取区域不等分措施,使得区域信息完整、准确再现;针对不同区域的噪声及欠采样情况,分别采取不同的相位展开算法;对分块合并时重叠区域进行加权叠加处理。利用仿真和实测数据对算法进行了验证,结果表明,改进算法能更准确、快速地恢复出被测物体的相位信息。改进后的算法不但适合于超大规模图像的相位展开,也适合于部分区域条纹过密的包裹相位图的展开。

**关键词** 全息;相位解包裹算法;快速傅里叶变换;欠采样;噪声

**中图分类号** TB877 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1009002

## Improved Phase Unwrapping Algorithm Based on Image Segmentation and Mergers

Wang Huaying<sup>1,2</sup> Zhang Zhihui<sup>1</sup> Liu Feifei<sup>1</sup> Song Xiufa<sup>2</sup>  
Xiong Nanyan<sup>3</sup> Zhao Baoqun<sup>2</sup> Yu Mengjie<sup>1</sup> Liu Zuoqiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Information and Electronic Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China  
<sup>2</sup>College of Science, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China  
<sup>3</sup>Medical College, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China

**Abstract** In order to increase the accuracy of the phase unwrapping algorithm based on image segmentation and merging, an improved algorithm based on existing algorithm is proposed. The method of unequal region segmentation is taken to make the regional information complete and accurate reproduction. For different regions with noise and under sampling conditions, different phase unwrapping algorithms are taken respectively. A weighted stack approach to improve the accuracy of the phase unwrapping results of merging the overlapping region of the block is presented. Simulation and measurement are taken to test the improved algorithm. The results show that the improved algorithm recovers the phase information of the measured object more accurately and faster. It is not only suitable for dealing with the phase unwrapping of large interferogram, but also for dealing with the wrapped phase which has areas with too dense stripes.

**Key words** holography; phase unwrapping algorithm; fast Fourier transform; under sampling; noise

**OCIS codes** 090.1995; 100.5088

## 1 引言

相位测量在许多应用领域中都具有重要的意义,如合成孔径雷达、合成孔径声纳、自适应光学、光

学与微波干涉、核磁共振、生物医学检测和地震信息处理等。相位解包裹是相位测量中的一个重要环节。近年来,针对不同的干涉图特征,提出了多种相

**收稿日期**: 2012-05-29; **收到修改稿日期**: 2012-07-10

**基金项目**: 国家自然科学基金(61077001、61144005)、河北省自然科学基金(F2010001038、F2012402059)、河北省科技支撑计划项目(09277101D)和河北省教育厅科学研究重点项目(ZH2011241)资助课题。

**作者简介**: 王华英(1963—),女,博士,教授,主要从事光学信息处理及数字全息技术等方面的研究。

E-mail: pbxsiyngzi@126.com

位解包裹方法<sup>[1-9]</sup>,以提高相位解包裹的准确性。其中,针对超大幅干涉图像的相位展开占用计算机内存资源多和执行时间长的问题,不少研究者对其进行了研究<sup>[1,7,8]</sup>,其中有代表性的解决方法有两种:1)根据质量图确定的高质量点和低质量点分别采用不同的相位解包裹算法进行解包裹,但这种方法存在“阈值”不易确定且对干涉图要求较高的缺点;2)采用“分而治之”的策略,针对不同的区域采用不同的处理方法进行相位展开,然后将不同区域的展开相位进行合并。该方法可通过对所有子块进行并行处理来减少执行时间,同时还可以充分发挥不同算法的优势。然而,由于边界的影响,如果只是将各个子块简单地直接拼接到一起,那么图像的连续性必然会受到影响。为了解决这个问题,文献[1]通过设置使相邻子块之间存在交叠区域,并对各个子块施加一个增量值来保证图像的连续性。然而,由于文献[1]采取了区域等分的方法,并且分块施加的增量值计算公式存在问题,导致整幅图的展开相位存在较大误差。此外,对于如何处理重叠区域的问题,文献[1]未作任何说明。

为了提高相位展开的准确性,本文在文献[1]的基础上作了两个方面的改进,利用仿真和实测数据比较了原有算法和改进算法。结果证实了改进算法的有效性。

## 2 改进的基于图像分割与合并的相位展开算法

原算法的具体步骤参见文献[1]。改进算法的步骤主要包括三步:

1) 将整幅图像分割成若干个子块。这里需要注意的是,由于相位展开都是从每个子块的第一个元素开始的,且任何相位展开都存在一定误差。因此,如果只是简单、直接地将整幅图像分割,然后再简单地再将各个子块合并,必然会出现较大误差,甚至出现错误。为了避免各个子块只是简单地合并出现错误,可以让每两个相邻分块之间都有  $\Delta m$  行和  $\Delta n$  列的重叠区域,在得到各个子块的相位展开结果后,对每个子块都加上一个增量  $2\delta_{i,j}\pi$ ,其中  $\delta_{i,j}$  为一个很小的待定参量,且其取值由重叠区域的相位平均值决定,这样就可以使得各分块变得连续。

定义子块  $A_{i,j}$  可表示为

$$A_{i,j} = \{(a,b) \mid mi \leq a < m(i+1) + \Delta m, nj \leq b < n(j+1) + \Delta n\}, \quad (1)$$

式中  $A_{i,j}$  ( $i = 0, 1, \dots, L; j = 0, 1, \dots, K$ ) 的大小为  $(m + \Delta m)\text{pixel} \times (n + \Delta n)\text{pixel}$ ;  $L$  为  $x$  方向上的分块数目;  $K$  为  $y$  方向上的分块数目; 分块  $A_{i+1,j}$  和  $A_{i,j}$  有  $\Delta m$  行重叠区域,分块  $A_{i,j+1}$  和  $A_{i,j}$  有  $\Delta n$  列重叠区域,如图 1 所示。

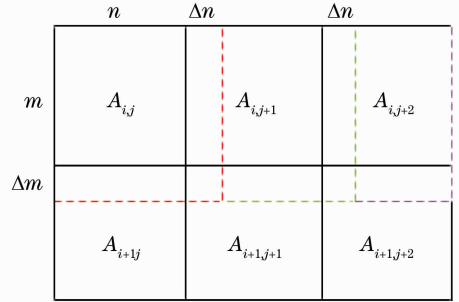


图 1 分块示意图

Fig. 1 Schematic diagram of segment block

2) 对各个子块分别利用误差小、一致性好的相位展开算法进行展开。此处,可以利用不同的算法针对具有不同干涉特征的分块分别选取不同的算法,比如,对于噪声少、包裹条纹调制度较好的子块,可以采用运算速度较快的基于离散余弦的最小二乘相位展开算法(DCT)<sup>[5]</sup>;对于含有噪声较多、包裹相位条纹有混叠(即存在欠采样)的分块,可以采用基于横向剪切干涉的最小二乘相位展开算法(LS-LS)<sup>[6]</sup>。

3) 求出各个子块的解包裹相位后,根据相邻子块  $A_{i,j+1}$  和  $A_{i+1,j}$  的重叠区域来确定增量  $\delta_{i,j}$ ,然后对子块  $A_{i,j}$  进行修正,使整幅图像保持较好的连续性。

改进算法主要是从两个方面进行的:

改进方面一:通过研究原算法,发现合并子块的公式对于边界分块和最后一个分块是错误的,并且每个子块处理时的结果都是从各自的第一个元素开始,所以合并时对于存在相位跳变区域的连续性并不是很好,因此本文针对不同情况的子块分别利用不同的公式进行计算,可以更准确地给出各个子块的增量值。

1) 当  $i = 0, j = 0$ , 在这里,  $\delta_{0,0}$  不再假设为 0, 如果第一子块的相位展开算法本身就和真实值存在一定的误差,后面子块的增量又都是以前面子块为基准的,因此后面的也会存在误差。改进算法则将  $\delta_{0,0}$  的值取为子块  $A_{0,0}$  展开相位的重包裹相位与原始包裹相位的差值。

2) 当  $i = 0, j = 1 \sim (K - 2)$  时,

$$\delta_{0,j} = S_1 / [\Delta n(m + \Delta m)], \quad (2)$$

$$S_1 = \sum_{l=mi}^{m(i+1)+\Delta m-1} \sum_{k=nj}^{n(j+1)+\Delta n-1} [\phi_2(l, k) - \phi_1(l, k)]. \quad (3)$$

3) 当  $i=1 \sim (L-2), j=0$  时,

$$\delta_{i,0} = S_2 / [\Delta m(n + \Delta n)], \quad (4)$$

$$S_2 = \sum_{l=mi}^{mi+\Delta m-1} \sum_{k=nj}^{n(j+1)+\Delta n-1} [\phi_3(l, k) - \phi_1(l, k)]. \quad (5)$$

4) 当  $i=L-1, j=K-1$  时,

$$\delta_{L-1, K-1} = (S_1 + S_2) / (\Delta mm + \Delta mn). \quad (6)$$

5) 其他情况,

$$\delta_{i,j} = (S_1 + S_2) / [\Delta m(n + \Delta n) + \Delta n(m + \Delta m)], \quad (7)$$

式中  $\phi_1(l, k)$  为没有经过修正的子块  $A_{i,j}$  的解包裹相位,  $\phi_2(l, k)$  和  $\phi_3(l, k)$  分别为子块  $A_{i-1,j}$  和  $A_{i,j-1}$  经过修正后的解包裹相位, “round”代表取整操作。

通过(2)~(7)式求得依次求出每个分块的增量  $\delta_{i,j}$ , 然后把  $\delta_{i,j}$  加到子块  $A_{i,j}$  的解包裹相位上。只有子块  $A_{i-1,j}$  和子块  $A_{i,j-1}$  的增量被计算出来, 子块  $A_{i,j}$  的增量才能被计算出来。

改进方面二: 通过计算机模拟, 验证了公式分母不乘以  $2\pi$ 、不取“round”操作以及每个子块加增量时也不乘以  $2\pi$  的结果更准确, 连续性更好。

由文献[8]可知, 如果分块足够多时, 分块合并时误差就会很小; 但是, 如果分块不是很多时, 本文通过对重叠区域合并时采用加权叠加处理, 即将  $\delta_{0,0}$  的值取为子块  $A_{0,0}$  的重包裹相位与原始包裹相位的差值, 并让各个子块分别对应整幅图像的相应位置来提高分块合并时的连续性。

### 3 计算机模拟和实验验证

利用  $180 \text{ pixel} \times 180 \text{ pixel}$  的峰函数进行计算机模拟, 模拟的真实地相位分布如图2(a)所示,

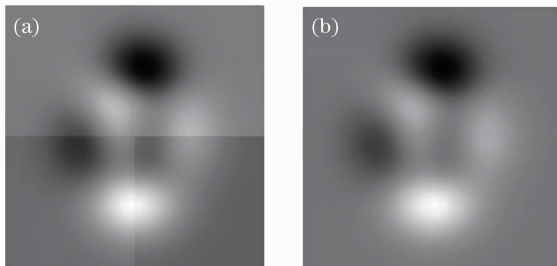


图2(b)为其包裹相位图。通过计算得出, 图2(b)中红框区域的相邻像素相位差最大值超过了  $2\pi$ , 因此存在欠采样的问题; 而其他区域条纹调制度比较好, 不存在欠采样的问题, 可见这个包裹相位图具有不同的干涉特征, 比较适合作为计算机模拟对象来验证改进算法的有效性。

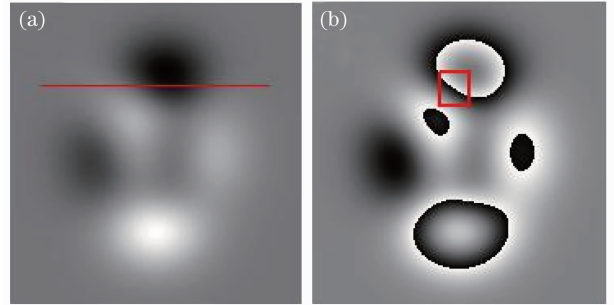


图2 模拟的峰函数。(a)真实相位;(b)包裹相位

Fig. 2 Peaks for simulations. (a) Real phase distribution of peaks; (b) wrapped phase

计算机模拟结果是从上述两个改进方面分别叙述的, 结果如下所示:

1) 图3(a)、(b)为从公式分母乘不乘以  $2\pi$  和取整操作方面进行比较: 它们都是将图2(b)的包裹相位图等分成四块, 并且每一块都是采用 LS-LS 算法<sup>[10]</sup>得到的解包裹相位; 其中图3(a)为原算法的结果, 即乘以  $2\pi$  和取整操作的结果; 图3(b)为改进的结果, 即没有乘以  $2\pi$  和取整操作的结果。

比较图3(a)和3(b)可知, 图3(a)的连续性没有图3(b)的好, 并且由图3(c)中的曲线可知, 乘以  $2\pi$  的结果在欠采样区域出现了很大的误差, 而不乘以  $2\pi$  的效果更好, 所以得出改进算法在改进方面二的得到的结果比原算法更准确。

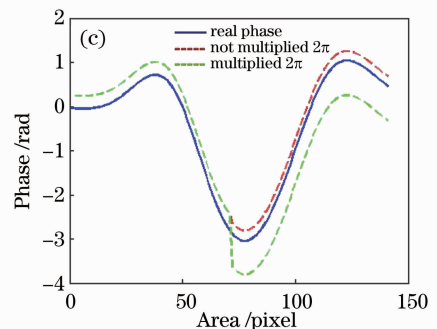


图3 改进方面二的比较结果

Fig. 3 Comparison of the results with the second improving aspects

2) 图4(a)、(b)是将图2(b)的包裹相位图等分成四块得到的结果。其中, 图4(a)为用原算法得到

的结果, 而图4(b)为通过不乘以  $2\pi$  和未做取整操作以及上述改进方面一的综合操作得到的结果, 重

叠区域合并时采用加权叠加的方法降低误差。由图 4(a)、(b)可知改进算法与原算法的优劣,因此接下来将通过定量的方法来比较。图 4(c)是图 2(a)中线段 1 上的解包裹相位分布曲线,其中蓝色(彩图请见网络电子版)实线表示相位真实值,红色和绿色

虚线分别表示原算法、改进算法得到的结果。比较图 4(c)中的红色和绿色虚线可知,绿色虚线代表的改进算法得到的结果比红色虚线代表的原算法更接近真实值。因此,可知改进算法比原算法更准确。

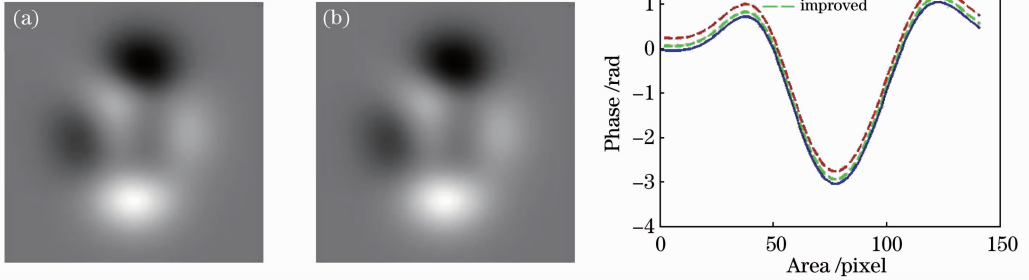


图 4 改进方面一的比较结果

Fig. 4 Comparison of the results with the first improving aspects

3) 由于图 2(b)中存在欠采样,为了解决这部分欠采样的问题,通过对该区域采用对欠采样问题处理效果比较好的 LS-LS 算法,而其他的区域采用基于离散余弦变换的最小二乘法<sup>[11]</sup>,这样不但保证了解包裹相位的精度,而且保证了速度。通过模拟进行验证,模拟结果如图 5 所示。其中图 5(a)为采用相同的 DCT 算法得到的;图 5(b)为采用 DCT 算法和 LS-LS 算法相结合得到的;图 5(c)为采用相同的 LS-LS 得到的;三种不同情况的运行时间分别为 0.197,0.200,0.421 s,这些运行时间是在同一配置的计算机下获得的;图 5(d)为图 2(a)中红线各种情

况的解包裹相位分布曲线,其中蓝色实线为真实相位,红色虚线为采用相同的 DCT 算法得到,绿色虚线为采用 DCT 和 LS-LS 相结合得到的,黑色虚线为采用 LS-LS 算法得到,由图 5(d)可知,黑色虚线所代表的 LS-LS 算法的结果更接近真实值,但是它的运行时间最长;红色虚线代表的 DCT 算法的运行时间虽然最短,但是结果与真实值误差最大;而绿色虚线所代表的采用不同算法的结果比较好,而且运行速度较快。如果处理超大规模的图像,采用 DCT 和 LS-LS 相结合的算法是最好的选择。

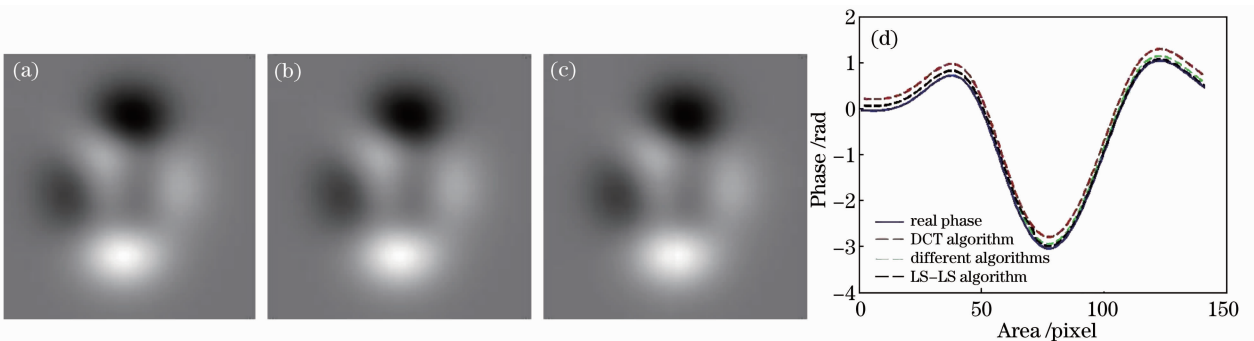


图 5 相同算法与不同算法比较结果

Fig. 5 Comparison of the results by using the same algorithm and different algorithms

通过计算机模拟可以证明改进的基于图像分割与合并的相位展开算法对于处理部分区域条纹密集的包裹相位图比原算法更有效,下面将通过实验对改进算法进行验证。

实测数据干涉图是通过采用球面参考光像面数字全息显微记录光路获得的中药饮片三七木栓细胞<sup>[12]</sup>的全息图,如图 6(a)所示。通过角谱算法对全

息图进行再现,进而获得其包裹相位分布如图 6(b)所示。通过观察图 6(b)可以发现图像中存在一次相位畸变,为了让能够得到更准确的相位真实值,利用自动相位补偿方法对相位进行补偿,补偿后的包裹相位如图 6(c)所示。由于包裹相位图具有不同的区域特征,比如含细胞的区域条纹调制度低,而其他区域条纹调制度比较好,所以对其采用不

等分分块策略,并且对每个子块采用不同的相位展开算法:将整幅图像分成6块,含有细胞的第1块、第2块和第4块采用LS-LS算法,其他子块采用DCT算法,这样既保证了精度,又保证了速度;然后

分别用原算法和改进算法对其进行相位展开与合并,最后通过对每个分块叠加一定的加权系数,得出最终结果如图6(d)、(e)所示。

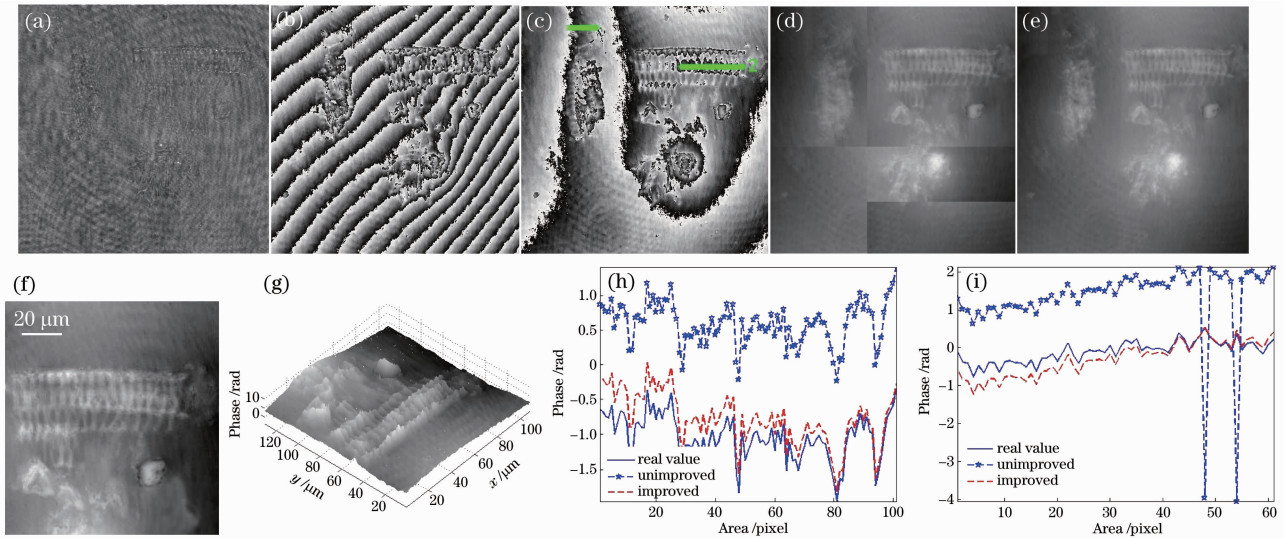


图6 三七木栓细胞的实验结果

Fig. 6 Experimental results of *Panax notoginseng* cork cell

通过观察比较图6(d)和图6(e)可知,改进算法得到的相位连续性比原算法得到的相位连续性效果更好。图6(h)和图6(i)分别是图(c)中绿线2和1上的相位曲线分布,再通过定量比较可知,由图6(h)可知,红色虚线代表的改进算法比蓝色带星虚线代表的原算法的相位值更接近真实值;由图6(i)可知,蓝色带星虚线代表的原算法在某些点上出现了严重的错误,所以得出改进算法的连续性更好、准确度更高,改进算法比原算法更接近真实值。

为了测量三七木栓细胞的大小,将含有木栓细胞的分块单独显示出来,图6(f)为其二维相位分布,图6(g)为相应的三维相位分布,可知,该木栓细胞的长度大约为85  $\mu\text{m}$ 。

虽然改进算法的效果比原算法的效果好,但是改进的算法在图像的连续性上还存在误差,因此仍需要进一步的完善。

## 4 结 论

分析了一种改进的基于图像分割与合并的相位展开算法,改进的算法分别从多个方面对原算法进行了修正,采取区域不等分措施,使得区域信息完整、准确再现;针对不同区域的噪声及欠采样情况,分别采取不同的相位展开算法,从而在保证高准确

性的基础上提高了处理速度;提出了分块合并时重叠区域的处理方法;纠正了原算法中的部分公式错误。利用仿真和实测数据对其进行验证,结果表明,改进算法能更准确地恢复出被测物体的相位信息,图像的连续性更好;并且该算法不但适合于处理超大规模图像的相位展开,也适合于处理部分区域条纹过密的包裹相位图的展开,用基于横向剪切干涉的最小二乘相位展开算法来处理处于条纹过密的区域,保证了相位展开的精度;利用基于离散余弦的最小二乘相位展开算法,保证了相位展开的速度。虽然该算法在相位跳变剧烈的区域合并时连续性并不是很好,但是可以通过加权叠加来降低误差,所以该算法对于处理特殊干涉图像和超大规模图像的相位展开仍具有一定的价值。

## 参 考 文 献

- 1 Yu Yong. Study on the Phase Unwrapping Algorithm Based on Regular Network in Interferometric Synthetic Aperture Radar [D]. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2002. 50~54  
于 勇. 基于网络规划的干涉雷达相位解缠算法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2002. 50~54
- 2 Pan Feng, Xiao Wen, Liu Shuo. A kind of digital holographic microscopy suite for long-term quantitative observing living cells [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0509001  
潘 锋, 肖 文, 刘 烁. 一种适用于长期定量观察生物活细胞的数字全息显微方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0509001
- 3 Zhao Jie, Wang Dayong, Li Yan *et al.*. Experimental study on the quantitative phase contrast imaging of the biological samples

- by digital holographic microscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2906~2911
- 赵 洁, 王大勇, 李 艳 等. 数字全息显微术应用于生物样品相衬成像的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2906~2911
- 4 Fan Qi, Yang Hongru, Li Gaoping *et al.*. Method for phase recovery from a single under-sampled wrapped phase map[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0310002
- 范 琦, 杨鸿儒, 黎高平等. 欠采样包裹相位图的恢复方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0310002
- 5 Guo Renhui, Li Jianxin, Zhu Rihong. Seed Point Unwrapping algorithm based on DCT algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0212006
- 郭仁慧, 李建欣, 朱日宏. 基于 DCT 算法的种子点相位解包算法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0212006
- 6 Qian Xiaofan, Wang Zhanliang, Hu Te *et al.*. Reconstructing the phase of wavefront using digital hologram and the principle of shearing interferometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1821~1826
- 钱晓凡, 王占亮, 胡 特 等. 用单幅数字全息和剪切干涉原理重构光场相位[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1821~1826
- 7 W. C. Curtis, A. Z. Howard. Phase unwrapping for large SAR interferograms; statistical segmentation and generalized network models[J]. *IEEE Trans. Geosc. & Remote Sensing*, 2002, **40**(8): 1709~1719
- 8 Wu Nan, Feng Dazheng, Liu Baoquan. Phase unwrapping approach for extremely large interferograms[J]. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2007, **34**(4): 570~576
- 武 楠, 冯大政, 刘宝泉. 一种超大规模干涉图的相位展开方法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2007, **34**(4): 570~576
- 9 Wang Huaying, Zhao Baoqun, Liao Wei *et al.*. Reconstruction method of three-dimensional information in digital micro-holography[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(10): 2263~2266
- 王华英, 赵宝群, 廖 薇 等. 显微数字全息中的 3 维信息重建方法[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(10): 2263~2266
- 10 Wang Huaying, Zhang Zhihui, Liao Wei *et al.*. Phase unwrapping algorithms in image plane digital holographic Microscopy[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2012, **23**(2): 402~407
- 王华英, 张志会, 廖 薇 等. 像面数字全息显微中的相位解包裹算法研究[J]. *光电子·激光*, 2012, **23**(2): 402~407
- 11 Wang Huaying, Guo Zhongjia, Zhang Zhihui *et al.*. Image-plane digital holography for quantitative imaging of cells of Chinese medical decoction pieces [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0209002
- 王华英, 郭中甲, 张志会 等. 基于像面数字全息术的中药饮片细胞定量成像技术[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0209002
- 12 Zhang Zhihui, Wen Guosong, Xiao Fenghui *et al.*. Study progress in tissue and cell culture of Panax notoginseng [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2004, **19**(4): 369~372
- 张智慧, 文国松, 萧凤回 等. 三七组织与细胞培养研究进展[J]. *云南农业大学学报*, 2004, **19**(4): 369~372

栏目编辑: 李文喆