

# 共享内存环境下的大块干涉相位图解缠算法

钟何平<sup>1</sup> 吴浩然<sup>1</sup> 黄攀<sup>1</sup> 徐魁<sup>1</sup> 唐劲松<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海军工程大学海军水声技术研究所,湖北 武汉,430033

**摘 要:**针对大块干涉相位图解缠效率低的问题,提出了一种共享内存环境下的大块干涉相位图解缠方法。利用质量引导和最小不连续优化策略设计了复合相位解缠算法,并在共享内存环境下对算法中的质量图计算、高低质量区域分割和低质量区域优化 3 个步骤进行了并行化。为充分利用多核计算资源,针对低质量区域的并行优化,设计了动态计算任务分配方法。对仿真和干涉合成孔径雷达相位图的解缠试验结果表明,所提算法在提高相位解缠精度的同时,也极大地优化了相位解缠效率。

**关键词:**复合相位解缠;并行计算;共享内存;质量引导;最小不连续

**中图分类号:**P237 **文献标志码:**A

相位解缠是干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)和干涉合成孔径声纳(interferometric synthetic aperture sonar, InSAS)信号处理中极其关键的步骤之一,相位解缠性能直接关系到数字高程模型的重建效果。由于相位解缠问题的复杂性,目前几乎所有的工程数学方法都在相位解缠方面进行了尝试<sup>[1]</sup>。现有相位解缠算法主要分为路径跟踪算法<sup>[2-3]</sup>、最小范数法<sup>[4]</sup>和网络流法<sup>[5-6]</sup>。它们都有着自身的特点,路径跟踪算法解缠速度快,但低质量区域容易存在解缠“死区”;最小范数法解缠结果平滑,但解缠结果中误差容易向高质量区域传播;网络流法借用成熟网络流算法以达到降低相位解缠算法时间和空间复杂度的目的,但其前提是低质量区域残差点满足平衡条件,否则高质量区域会出现相位跳变现象。

随着 InSAR 成像分辨率的不断提高,用于处理的单块数据量行列数也不断增加,这极大增加了相位解缠的难度。为了解决大块干涉相位解缠的问题,传统的方法是采用“分治”策略<sup>[7-8]</sup>,即将大块干涉图分成规则小块分别进行解缠,最后对解缠后的相位进行融合。“分治”相位解缠策略虽然可以有效解决大块干涉相位图能否解缠的问题,但同时也会带来分块解缠相位合并的问题。分块相位合并是分块相位解缠方法中不可避免但

同时也很难解决的一个问题。本文提出了一种共享内存环境下的大块干涉图相位解缠算法,将干涉图分为高质量区域和低质量区域,并采用量化质量引导算法获取高质量区域解缠相位,低质量区域解缠相位则采用最小不连续准则进行并行优化,有效避免了传统分块相位解缠带来的合并问题。在算法设计过程中,充分利用共享内存环境下的多核计算能力来加速相位解缠。

## 1 相位解缠算法描述

### 1.1 量化质量引导相位解缠算法

质量引导相位解缠是一种典型的路径跟踪方法,它完全依靠质量值来确定解缠顺序,并且假定解缠路径不包括未平衡的残差点。在高质量相位区域,解缠结果可信度较高,但在低质量相位区域,由于相位质量值表征相位可靠性的准确程度下降,造成解缠路径不正确,容易在低质量区域产生累积误差。为提高质量引导速度,文献[2]通过引入优先队列极大提高了相位解缠速度。其具体步骤如下:

- 1) 计算相位质量图,并将质量值松弛到区间 $[1, 1\ 000]$ ,采用整数进行表示。
- 2) 找出具有最高相位质量值的相位点 $x_1$ ,将其缠绕相位作为解缠相位。

- 3)对  $x_1$  的未解缠邻域相位点进行解缠。
- 4)将解缠后的邻域节点按照相位质量值加入优先队列。
- 5)在优先队列中找出具有最高质量值的节点  $x_2$ 。
- 6)将  $x_2$  从优先队列中移除,并转到步骤 3)。

量化质量引导算法从运算量方面来看,主要包括两部分:①相位质量图计算;②量化质量引导过程。相位质量图的计算是在局部窗口中进行的密集型计算,并且计算效率随着局部窗口的增加而降低,适合采用并行计算。量化质量引导过程采用的是一种区域生长方法,通过引入优先队列极大提升了引导过程,但并行度较小。

1.2 最小不连续优化算法

相位解缠过程可看作是给每个缠绕相位数据  $\varphi_{m,n}$  加上一个  $2\pi$  的整数倍  $c_{m,n}$  来恢复真实相位的过程<sup>[9]</sup>。其中,解缠相位  $\phi_{m,n}$  与缠绕相位  $\varphi_{m,n}$  之间满足:

$$\phi_{m,n} = \varphi_{m,n} + 2\pi c_{m,n}$$

式中,  $c_{m,n}$  称为缠绕数。如果相邻相位的差值在幅度上超过  $\pi$ ,就认为这两点不连续,最小不连续优化方法就是通过最小化整体解缠相位的不连续性来确定合适的缠绕系数矩阵  $C$ ,进一步推算出解缠相位。最小不连续算法的求解过程是通过“消圈”完成的,解缠结果连续性较好。

1.3 复合相位解缠算法

为充分利用量化质量引导算法和最小不连续相位解缠算法的优点,复合相位解缠算法在高质量区域采用量化质量求解,在低质量区域采用最小不连续优化。该算法通过限制优化区域,一方面可以抑制误差传播,另一方面由于优化区域减少,极大提升了相位解缠效率。复合相位解缠算法基本流程如图 1 所示,算法具体步骤如下:

- 1)根据缠绕相位计算相位质量图,并对质量图进行量化。
- 2)采用量化质量引导相位解缠算法获取高质量区域的初始解缠结果;同时采用二值化方法,根据质量图对缠绕相位进行初始高低质量区域分割,并采用形态学操作对初始分割结果进行优化。
- 3)采用区域生长方法,识别出所有低质量区域,并分别存储。
- 4)对所有低质量区域采用最小不连续准则进行优化,获取最终的解缠相位。

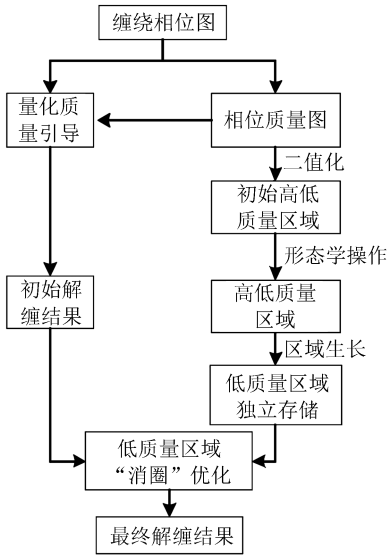


图 1 复合相位解缠算法流程图  
Fig.1 Flow Chart of the Combined Phase Unwrapping Algorithm

2 算法并行性能分析与实现

在复合相位解缠算法中,相位质量图求解、初始高低质量区域分割和高低质量区域优化这 3 个步骤的共同特点是在局部窗口中进行的操作,各个处理步骤的计算复杂度均为  $O(n^2)$ 。由于每个步骤均是对每一点进行处理,而且点与点之间的处理过程是完全独立的,因此可以直接将这 3 个处理步骤的外层 for 循环采用 OpenMP 中的 parallel for 命令进行并行化。通过正确指定并行区域变量类型,即可完成上述 3 个处理步骤的并行化。

量化质量引导和低质量区域识别与存储都是采用区域生长方法,其主要操作是进队列和出队列操作,是一个典型的顺序过程。因此在共享内存环境下,区域生长算法并行能力有限,对这两部分不进行并行化。

采用区域生长算法将低质量区域识别并独立存储后,不同低质量区域的优化过程是完全独立的,满足并行化条件。为充分利用多核 CPU 的计算能力,采用如图 2 所示的计算任务分配方法。低质量区域分别存储后,设置一个当前待处理区域指示器,该指示器用于指示当前待处理的低质量区域,每次指向一个低质量区域。程序初始化时,指示器指向第一个低质量区域。CPU 的每个计算核称为一个处理单元,处理单元通过临界区从当前待处理单元指示器获取需要优化的低质量

区域。由于不同处理单元获取待优化区域时受临界区约束,因此有效避免了低质量区域的重复优化。每当处理单元取走当前待优化的低质量区域后,指示器立即指向下一个待优化区域。当处理单元判断当前待优化区域编号大于总的低质量区域个数时,处理单元结束处理,所有低质量区域优化完毕。

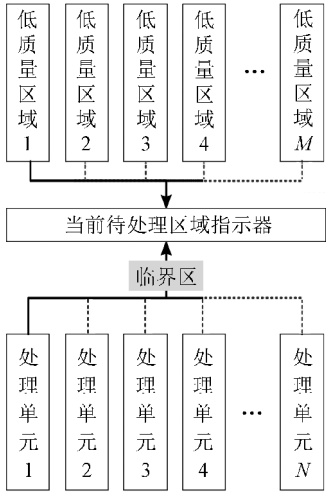


图2 计算任务分配方法  
Fig.2 Method of Task Allocation

3 试验结果分析

为验证本文算法在共享内存环境下的大块干涉相位图解缠的性能,对仿真和真实 InSAR 干涉

相位图进行了解缠试验,试验环境为:处理器 Intel(R) Pentium(R) CPU G840 @ 2.80 GB (1 处理器 2 核);内存 4 GB;操作系统 Windows Server 2008 R2 标准版 32 位;软件环境 Visual Studio 2008。试验过程中,质量图选用的是相位梯度变化质量图,质量等级设置为 1 000,局部计算窗口大小设置为 5×5。

图 3(a)是一幅调用 Matlab 中 peaks 函数生成的仿真干涉相位图,图中包含 3 个低质量相位区域,分别为 2 个圆形和 1 个正方形区域,相干系数为 0.5。图 3(a)所对应的相位质量图如图 3(b)所示,低质量区域在质量图上很好地进行了表征,并且被高质量区域分割为 3 个独立区域。直接采用图 3(b)所示的质量图和量化质量引导算法获取的解缠结果如图 3(c)所示,低质量区域所对应的解缠相位误差累积现象严重,与仿真真实相位存在较大误差。采用高、低质量区域分割方法获得的低质量区域分割结果如图 3(d)所示,3 个低质量区域分别采用整数 1、2、3 进行了标识,与仿真低质量区域位置一致。复合相位解缠算法求解的解缠结果如图 3(e)所示,有效消除了低质量区域解缠相位的累积误差,高质量区域的解缠相位如图 3(f)所示,与原始仿真相位一致。

图 4(a)是一幅复杂地形的 InSAR 干涉相位图,图中存在各种形状不规则的低质量区域,增加了相位解缠的难度。图 4(a)所对应的相位质量

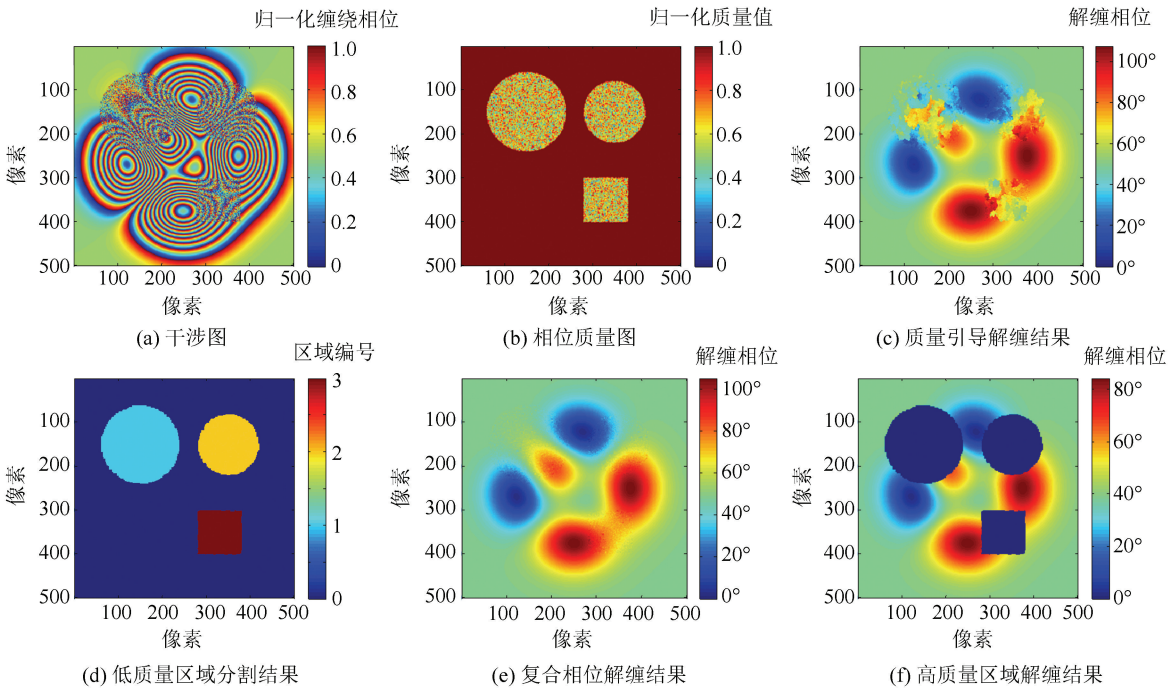


图3 仿真干涉图解缠试验  
Fig.3 Unwrapping Test on the Simulated Interferogram



图和质量引导相位解缠结果分别如图 4(b)和图 4(c)所示,可以看出低质量区域解缠相位误差累积现象严重。低质量区域的识别结果如图 4(d)所示,完成了对图 4(b)中的低质量区域的有效区

分。复合相位解缠结果和高质量区域的解缠结果分别如图 4(e)和图 4(f)所示,可以看出复合相位解缠算法在消除低质量区域解缠误差累积的同时,有效保持了高质量区域的解缠精度。

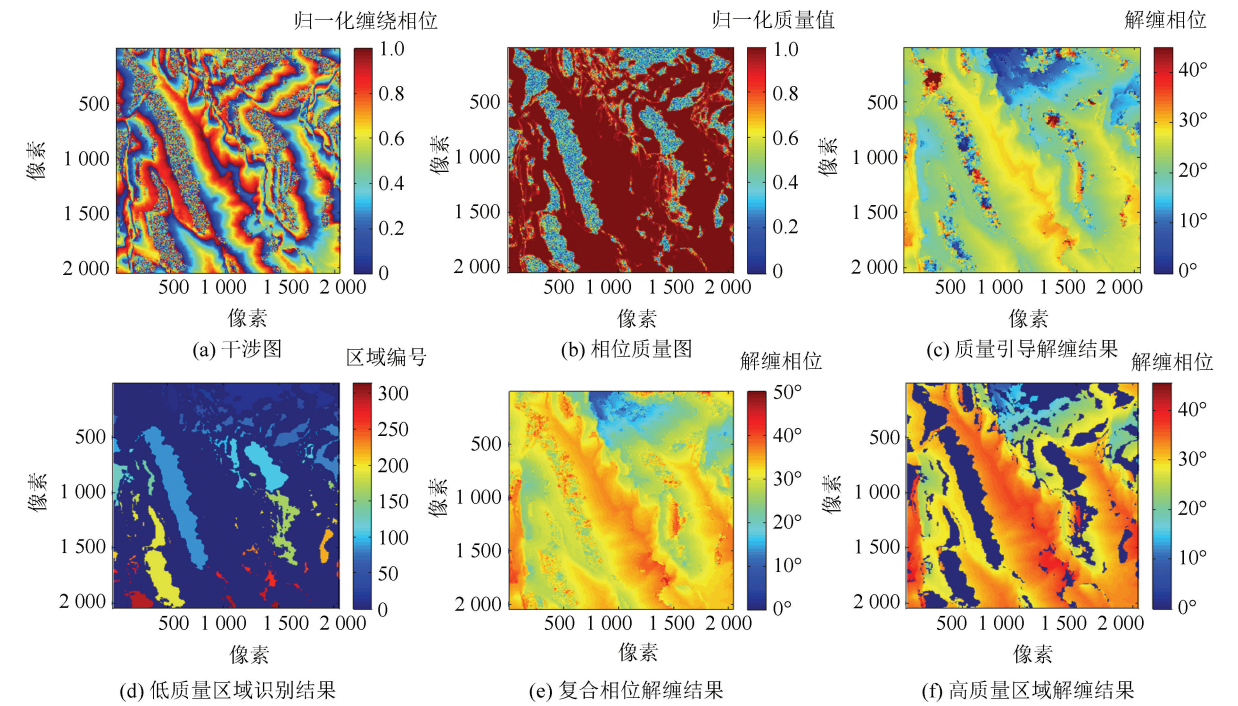


图 4 InSAR 干涉图解缠试验

Fig.4 Unwrapping Test on InSAR Interferogram

复合相位解缠算法并行化前后算法效率比较如表 1 所示。算法并行化主要体现在质量图计算、高低质量区域分割和低质量区域优化这 3 个计算步骤,而对于量化质量引导和低质量区域识别两个计算步骤,因其计算特点不满足共享内存并行计算要求,没有进行并行化。对于仿真干涉相位图,并行化前(即串行),解缠时间为 1 045 ms,而并行化后,解缠时间降为 697 ms,加速比为 1.50。对于 InSAR 干涉图,解缠时间从并行化前的 56 100 ms 降为并行化后的 36 896 ms,加速比为 1.52。并行复合相位解缠算法的加速比主要由质量图计算、高低质量区域分割和低质量区域优化这 3 个步骤的加速比共同决定,主要与计算核数和低质量区域的分布情况有关。其中质量图计

算和高低质量区域分割两个步骤加速比主要与计算核数有关,理论上与计算核数成线性关系。低质量区域优化步骤加速比主要与低质量区域相位分布有关,当低质量区域大小相同,并且个数与计算核数成整数倍关系时,可以最大化利用多核计算能力,提升加速比。本文试验中,低质量区域个数大于机器核数,加速比主要受测试机核数限制。

复合相位解缠算法与质量引导相位解缠算法的解缠性能比较如表 2 所示,本文主要从解缠结果中所包含的不连续性大小和不连续性长度来衡量解缠性能。对于仿真干涉相位图和 InSAR 干涉图解缠,复合相位解缠结果与质量引导相位解缠结果相比,解缠结果中的不连续性长度和不连续大小都显著减小,解缠精度得到极大改善。

表 1 算法并行化前后效率比较/ms

Tab.1 Efficiency Comparison of the Algorithm Before and After Parallelization/ms

测试数据	计算方式	质量图 计算	量化质量 引导	高质量 区域分割	低质量区 域识别	低质量区 域优化	总时间
仿真数据	串行	52	17	81	7	888	1 045
	并行	37	18	52	7	583	697
InSAR	串行	896	666	1 371	136	53 031	56 100
	并行	515	655	810	142	34 774	36 896

表 2 两种解缠算法性能比较

Tab.2 Performance Comparison of the Two Phase Unwrapping Algorithms

测试数据	解缠方法	不连续长度	不连续大小
仿真数据	质量引导算法	18 577	25 590
	复合算法	8 519	8 526
InSAR	质量引导算法	283 099	371 100
	复合算法	156 688	157 111

4 结 语

本文提出了一种共享内存环境下的大块干涉相位图解缠算法。通过限制优化区域和并行计算的方式,在优化相位解缠精度的同时,极大提升了相位解缠效率。对仿真和 InSAR 干涉图的相位解缠试验结果表明,并行复合相位解缠算法可充分利用共享内存环境下的多核计算能力提升相位解缠效率,并有效抑制解缠误差。下一步研究工作主要对低质量区域的并行方法进行优化,消除不同大小区域优化时间长短所造成的计算任务分配不均的问题,进一步提升大块干涉相位图的解缠效率。

参 考 文 献

[1] Ghiglia C D, Pritt D M. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithm and Software[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1998

[2] Zhong Heping, Tang Jinsong, Zhang Sen, et al. A Fast Phase Unwrapping Algorithm Based on Quantized Quality Map and Priority Queue[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(3): 342-345(钟何平,唐劲松,张森,等.利用量化质量图和优先队列的快速相位解缠算法[J].

武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(3): 342-345)

[3] Zheng D L, Da F P. A Novel Algorithm for Branch Cut Phase Unwrapping[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(5): 609-617

[4] Chen Qiang, Yang Yinghui, Liu Guoxiang, et al. InSAR Phase Unwrapping Using Least Squares Method with Integer Ambiguity Resolution and Edge Detection [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3): 441-448(陈强,杨莹辉,刘国祥,等.基于边界探测的 InSAR 最小二乘整周相位解缠方法[J]. *测绘学报*, 2012, 41(3): 441-448)

[5] Zhang K, Ge L, Hu Z, et al. Phase Unwrapping for very Large Interferometric Data Sets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 4 048-4 061

[6] Chen C W, Zebker H A. Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms: Statistical Segmentation and Generalized Network Models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1 709-1 719

[7] Carballo G F. Statistically-Based Multiresolution Network Flow Phase Unwrapping for SAR Interferometry [D]. Sweden: Kungliga Tekniska Hogskolan, 2000

[8] Chen C W. Statistical-Cost Network-Flow Approaches to Two-Dimensional Phase Unwrapping for Radar Interferometry[D]. California: Stanford University, 2001

[9] Flynn T J. Two-Dimensional Phase Unwrapping with Minimum Weighted Discontinuity[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(10): 2 692-2 701

Phase Unwrapping Algorithm for Large Interferogram in Shared Memory Environment

ZHONG Heping<sup>1</sup> WU Haoran<sup>1</sup> HUANG Pan<sup>1</sup> XU Kui<sup>1</sup> TANG Jinsong<sup>1</sup>

1 Naval Institute of Underwater Acoustic Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

**Abstract:** In order to solve the unwrapping problem of low efficiency for large interferogram, we propose a new phase unwrapping algorithm in shared memory environment, which is designed based on quality-guided and minimum discontinuity optimization strategies. The three processes, phase quality map computing, high and low quality area's partition and low quality area's optimization, are parallelized in shared memory environment. In order to fully use the multi-core computing ability, a dynamic allocation method for computing task is designed for the optimization process of low quality are- (下转第 1703 页)

Indoor Pedestrian Mobile Activity Recognition and Trajectory Tracking

XIONG Hanjiang<sup>1</sup> GUO Sheng<sup>1</sup> ZHENG Xianwei<sup>1</sup> ZHOU Yan<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** As the basis of indoor location services, indoor localization technology has received more and more attention in recent years. Aiming at the problems of high cost, limited precision and insufficient efficiency in existing indoor positioning technologies, pedestrian dead reckoning (PDR), human activity recognition (HAR) and landmarks are combined to obtain more accurate pedestrian indoor localization. PDR is used to estimate the user’s location, and the cumulative error of PDR is reduced by landmarks, which are sensed by HAR. In addition, to solve the initial position determination problem, a hidden Markov model that considers the characteristics of the indoor environment is applied to match the continuous trajectory. The experimental results show that the proposed method has a good performance in activity recognition and positioning accuracy, and can track the user’s trajectory efficiently.

**Key words:** mobile activity recognition;indoor localization; trajectory tracking

**First author:** XIONG Hanjiang, PhD, professor, specializes in 3D GIS and indoor GIS. E-mail: xionghanjiang@163.com  
**Corresponding author:** ZHENG Xianwei, PhD. E-mail: zhengxw@whu.edu.cn  
**Foundation support:** The National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFB0502203; Mapping Geographic Information Industry Research Projects of Public Interest Industry, No. 201512009; the Special Research Funding of State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing.

(上接第 1646 页)

as. Unwrapping tests performed on simulated and InSAR interferogram show that the proposed algorithm improves the high quality of unwrapped result and greatly optimizes the efficiency.  
**Key words:** combined phase unwrapping; parallel computing; shared memory; quality-guided; minimum discontinuity

**First author:** ZHONG Heping, PhD, lecturer, specializes in interferometry signal processing and parallel computing. E-mail: zheping525@sohu.com  
**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41304015, 61671461; China Postdoctoral Science Foundation, No. 2015M582813.