

# 一种基于等效残差点的 InSAR 相位解缠绕方法

蒋 锐<sup>1</sup> 朱岱寅<sup>2</sup> 朱兆达<sup>2</sup>

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京, 210023; 2. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016)

**摘要:** 二维相位解缠绕处理是干涉合成孔径雷达(Interferometric synthetic aperture radar, InSAR)数据处理的关键。本文提出了一种基于等效残差点的 InSAR 相位解缠绕算法。该算法首先提出了等效残差点的概念, 利用质量图与残差点分布之间的关系, 将残差点密集的低质量相位区域视为等效残差点, 然后采用不同方法分别对高质量相位区域和等效残差点的内部区域进行相位解缠绕。本文算法基于等效残差点正确的设置枝切线, 可以阻止由于积分路径穿过残差点密集的低质量相位区域所引起的展开相位跳变现象, 利用多像素单元共同估计的方法对残差点的内部区域进行相位展开, 突破了对于干涉相位梯度值的限制, 并且可以有效阻止相位解缠绕误差由低质量相位区域向高质量相位区域的传递。实验结果证明, 本文方法可以获得比其他算法更好的相位解缠绕结果。

**关键词:** 干涉合成孔径雷达; 相位解缠绕; 等效残差点

**中图分类号:** TN957.51      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2013)02-0209-08

## Phase Unwrapping Approach Using Equivalent Residues for InSAR

Jiang Rui<sup>1</sup>, Zhu Daiyin<sup>2</sup>, Zhu Zhaoda<sup>2</sup>

- (1. College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, 210023, China;  
2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** A two-dimensional phase unwrapping approach using equivalent residues is proposed for interferometric synthetic aperture radar (InSAR). In the proposed approach, the relationship between quality map and residues is used to find out the low quality unreliable regions, which are residues dense distribution and regarded as equivalent residues. Then, different phase unwrapping strategies are applied to different quality regions. With this methodology, integration path crossing of unreliable regions, which may produce a phase error propagating to all the pixels in integration path, is prevented because that the unreliable regions are treated as equivalent residues. Each pixel inside equivalent residue is unwrapped based on its unwrapped neighbors, which allows the absolute value of phase gradient between two adjacent pixels larger than  $\pi$ . Simulated and real SAR data validate the new approach.

**Key words:** interferometric synthetic aperture radar (InSAR); phase unwrapping; equivalent residues

干涉合成孔径雷达(Interferometric synthetic aperture radar, InSAR)通过跨航迹观测, 获取地面同一区域的复图像对, 根据两者之间的绝对相位

差, 计算对应观测区域中各目标高度, 从而实现全天候、大面积、高精度的三维地形测量。由于相位的周期性, 根据复图像对而获得的干涉相位值被限

**基金项目:** 国家自然科学基金(61071165)资助项目; 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0069)资助项目; 航空科学基金(20102052024)资助项目。

**收稿日期:** 2012-02-14; **修订日期:** 2012-03-28

**通信作者:** 朱岱寅, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhudy@nuaa.edu.cn。

制于 $(-\pi, \pi]$ 的相位主值区间内,该现象被称为相位缠绕。因此,对缠绕相位 $\varphi(i, j)$ 进行相位解缠绕,以获得正确的绝对干涉相位 $\phi(i, j)$ ,是 InSAR 三维成像处理中的关键步骤之一。在理想情况下,当图像的采样率满足 Nyquist 采样定理时,绝对干涉相位图中相邻像素单元之间相位差的绝对值,即绝对干涉相位梯度值的绝对值在半个周期 $\pi$ 内,此时可以根据方位向和距离向的相位偏导数进行简单积分即可实现准确的相位解缠绕。然而,由于实际干涉相位中存在的欠采样、噪声、雷达阴影等干扰因素均会导致相位解缠绕的不正确<sup>[1]</sup>,所以学者研究并提出了很多有效方法,以提高相位解缠绕的鲁棒性。总结目前已经研究出的相位解缠绕算法,其大致可以分为两类:一类是采用路径跟踪的思想,通过选择恰当的积分路径,将可能产生的相位解缠绕误差有效地限制在噪声区域内,阻止相位误差在整个图像内进行传递,从而达到局部最优的相位解缠绕算法。其中包括 Goldstein 提出的枝切截断法(Branch-cut), Xu 和 Cumming 提出的区域生长法(Region growing)和 Flynn 提出的掩模分割法(Mask cut)等<sup>[2-6]</sup>。另一类则是将相位解缠绕问题转化为数学中求解极值的问题,该类方法从数学角度出发,在全局意义上使得解缠绕相位结果达到最优,其中包括最小二乘算法, Ghiglia 提出的最小范数算法和 Costantini 提出的基于网络规划的相位解缠绕算法等<sup>[7-11]</sup>。

枝切截断法通过识别残差点,并根据残差原理设置正确的枝切线,从而选择合适的积分路径,实现相位解缠绕。但是残差原理只是不连续相位存在的充分非必要条件<sup>[12]</sup>,并且枝切线的放置具有不唯一性,特别在残差点密集的低质量相位区域,错误的放置枝切线会导致展开相位存在 $2\pi$ 整数倍的跳跃<sup>[2]</sup>;区域生长法则是在质量图的引导下,从高质量相位区域开始积分,逐步扩展至低质量相位区域,最后完成整幅图像的相位解缠绕。该方法可以有效阻止相位解缠绕误差从低质量相位区域往高质量相位区域的传递,并且利用多像素单元共同估计绝对干涉相位值的办法,突破了简单路径积分算法对绝对干涉相位梯度值的限制<sup>[3]</sup>。但是该方法没有考虑残差点对相位解缠绕的影响,并且对各像素单元均采用多像素单元共同估计的积分办法,运算量较大,不利于算法的实时处理。本文利用质量图与残差点分布之间的关系,根据残差原理首先

提出等效残差点的概念,并基于等效残差点实现相位解缠绕。实验证明,本文方法具有比其他算法更好的相位解缠绕算法性能。

## 1 等效残差点

为了避免积分路径穿过残差点密集的低质量相位区域,本文方法首先提出了等效残差点的概念,将残差点密集的低质量相位区域视为独立的等效残差点,并基于残差原理设置枝切线。针对不同质量相位区域特点采取不同的相位解缠绕策略,以保证最终获得良好的相位解缠绕结果。

### 1.1 残差原理

在理想情况下,干涉相位梯度值的绝对值小于 $\pi$ ,通过简单地对缠绕相位的梯度值进行连续积分,可以完成相位解缠绕

$$I = \int_C \nabla \varphi(r) dr + \varphi(r_0) \quad (1)$$

式中: $C$ 为干涉相位区域内任意一条连接 $r_0$ 和 $r$ 的积分路径; $\nabla \varphi(r)$ 为缠绕相位梯度值,可以作为绝对相位梯度值 $\nabla \phi(r)$ 的估计值;理想情况下,认为绝对干涉相位梯度值满足

$$|\nabla \phi(r)| \in [0, \pi] \quad (2)$$

然而在实际中,由于各种干扰因素的存在, $|\nabla \phi(r)|$ 会出现大于 $\pi$ 的不连续情况,导致路径积分结果不正确。因此,为了有效分辨相位不连续的像素单元,对残差点进行了定义。图1是干涉相位区域中一条最小的闭合路径,其中 $\varphi(i, j)$ 为被限制于 $(-\pi, \pi]$ 相位主值区间内的缠绕相位。

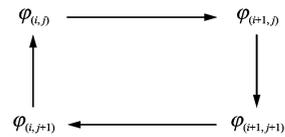


图1 干涉相位区域中最小闭合路径

按照图1中所示箭头方向分别计算干涉相位梯度值,并对其进行求和

$$\begin{aligned} Q = & W\{\varphi(i+1, j) - \varphi(i, j)\} + \\ & W\{\varphi(i+1, j+1) - \varphi(i+1, j)\} + \\ & W\{\varphi(i, j+1) - \varphi(i+1, j+1)\} + \\ & W\{\varphi(i, j) - \varphi(i, j+1)\} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $W\{\cdot\}$ 是模值为 $2\pi$ 的缠绕算子。当 $Q > 0$ 时,定义左上角的像素单元为正残差点,极性为+1;反之,当 $Q < 0$ 时,定义左上角的像素单元为负残差点,极性为-1。当闭合积分路径所围绕区域中包含的残差点极性之和不为0时,沿该积分路

径得到的相位解缠绕结果不能满足相位连续的要求。然而,当正负残差点个数相同,即闭合积分路径所围绕区域中包含的残差点极性之和为 0 时,可以通过积分得到正确的解缠绕结果<sup>[2]</sup>。

### 1.2 基于质量图的等效残差点设置方法

相位质量图是一组基于复图像对或直接从干涉相位图中提取出的,用于描述干涉相位图中每个像素单元中数据质量好坏的二维数组,对于相位解缠绕具有指导意义<sup>[3-5]</sup>。在本文算法中,为了阻止积分路径穿过残差点密集的低质量相位区域,利用质量图将低质量相位区域设置为独立的等效残差点,该区域内所有残差点的极性之和为该等效残差点的极性。基于残差原理并根据新的残差点分布图设置正确的枝切线。由于残差点密集区域被设置为一个独立的等效残差点,所以在新的残差点分布图中,等效残差点与高质量相位区域中的剩余残差点均为稀疏分布,大大降低了枝切线的设置难度,避免发生由于错误放置枝切线导致展开相位中存在  $2\pi$  整数倍跳跃的现象。

### 1.3 等效残差点的内部区域相位解缠绕

等效残差点的内部区域噪声干扰大,并且残差点分布密集,不能保证绝对干涉相位梯度值分布在  $[-\pi, \pi]$  区间内。针对这一特点,选取区域生长法中利用多像素单元共同估计绝对干涉相位的技术,对等效残差点的内部相位区域进行相位解缠绕。该方法突破了路径积分算法对于绝对干涉相位梯度值的限制,即使在地形高度变化快和噪声干扰较大的相位区域,也可以获得正确的相位解缠绕结果<sup>[3]</sup>。

考虑以当前待相位展开的像素单元  $P$  为中心,获取大小为  $5 \times 5$  的子图像,假设其中部分区域为已解缠绕区域,其他为相位缠绕区域,如图 2 所示。

在该子图像中,与  $P$  点距离为 1 的 8 个像素单元中,有 3 个为已解缠绕像素单元。 $P$  点分别沿该 3 个已解缠绕像素单元向外搜索,根据在 3 个方

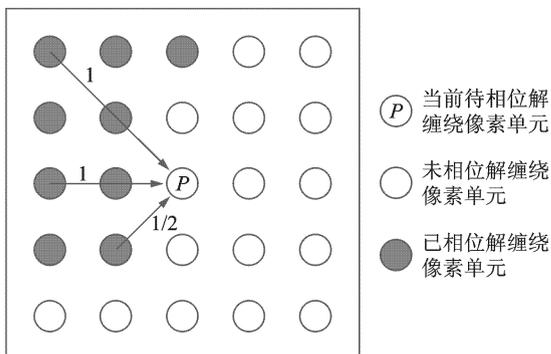


图 2 等效残差点的内部区域相位解缠绕方法

向上与  $P$  点距离为 2 的像素单元是否为已解缠绕像素单元,可以分成两种情况讨论  $P$  点的解缠绕估计相位值  $\phi'_P$ :

(1) 与  $P$  点距离为 2 的像素单元是已解缠绕像素单元

$$\phi'_{P_n} = 2\phi_1 - \phi_2 \quad W_{P_n} = 1 \quad (4)$$

(2) 与  $P$  点距离为 2 的像素单元是未解缠绕像素单元

$$\phi'_{P_n} = \phi_1 \quad W_{P_n} = 0.5 \quad (5)$$

式中:  $\phi'_{P_n}$  代表  $P$  点沿第  $n$  个方向上的解缠绕相位估计值,在图 2 中,  $1 \leq n \leq 3$ ;  $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别为在该方向上和  $P$  点距离为 1 和 2 的已解缠绕像素单元值;  $W_{P_n}$  是该方向上解缠绕相位估计值的加权值。观察发现,根据与  $P$  点距离为 2 的像素单元解缠绕情况不同,权值也不一样。对于某一方向上存在两个已解缠绕像素单元的,其权值大于只存在单个已解缠绕像素单元方向的权值。说明在该方法中,更侧重于根据  $P$  点相邻像素单元相位值的变化趋势对该点的绝对相位值进行估计,突破了简单路径积分方法中对于绝对干涉相位梯度值的限制。根据式(4, 5),得到  $P$  点的解缠绕相位估计值为

$$\phi'_P = \frac{\sum_{n=1}^3 W_{P_n} \phi'_{P_n}}{\sum_{n=1}^3 W_{P_n}} \quad (6)$$

由于真实绝对干涉相位  $\phi_P$  与缠绕相位  $\varphi_P$  之间只存在  $2\pi$  整数倍的缠绕,有

$$\phi_P = \varphi_P + 2\pi k \quad (7)$$

式中,  $k$  为  $2\pi$  相位缠绕的倍数。此时,相位解缠绕问题转化为对  $k$  值的估计

$$k = \text{int}\left(\frac{\phi'_P - \varphi_P}{2\pi}\right) \quad (8)$$

式中,  $\text{int}(\cdot)$  代表按四舍五入原则选取离变量值最近的整数。将式(8)代入式(7)中,得到像素单元  $P$  的相位解缠绕结果。

## 2 基于等效残差点的 InSAR 相位解缠绕方法

本文方法首先根据质量图将干涉相位图分为高质量相位区域和低质量相位区域,然后按 1.2 节中所介绍方法,将低质量相位区域设置为独立的等效残差点。由于引入了等效残差点的概念,积分路径被阻止穿过残差点密集的低质量相位区域,避免了在该区域中由于错误放置枝切线导致展开相位存在  $2\pi$  整数倍跳跃的现象。

## 2.1 高质量区域相位解缠绕

根据1.2节介绍方法,将低质量相位区域内所有残差点的极性之和设置为该等效残差点的极性。此时,等效残差点不再是单独的像素单元,其极性也不再局限在1和-1,甚至可能出现等效残差点本身极性为0的情况。针对这一特点,本文算法提出了一种新的枝切线设置方法,该方法在枝切线最短原则下,先对高质量相位区域的剩余残差点,按照优先次序分别选择与极性相反剩余残差点连接,与图像边界点,与未平衡等效残差点连接。当有残差点与图像边界点连接或者与未平衡等效残差点连接时,图像边界点与等效残差点的分布会发生改变,为了确保枝切线最短,要将搜索距离 $d$ 重新初始化进行新一轮的搜索。最后,当高质量相位区域的剩余残差点全部连接完成后,将未平衡等效残差点与最近的边界点连接,完成切支线设置。具体相位解缠绕实施步骤如下:

(1) 生成矩阵分别记录等效残差点,剩余残差点和与边界连接残差点。

(2) 初始化搜索距离 $d=1$ ,初始化指示信号 $signal=0$ 。

(3) 寻找所有离边界距离小于 $d$ 的未平衡剩余残差点,将其与边界点相连,并从剩余残差点矩阵中移除,添加在边界连接残差点矩阵中,同时设置 $signal=1$ 。

(4) 若 $signal=1$ ,则返回第(2)步;若 $signal=0$ ,则寻找所有满足当前 $d$ 的未平衡残差点对,连接残差点对并将其从剩余残差点矩阵中移除。

(5) 寻找在 $d$ 范围内存在未平衡等效残差点的未平衡剩余残差点,将其与等效残差点连接,并从剩余残差点矩阵中移除,添加在等效残差点矩阵中,更新该等效残差点极性,同时设置 $signal=1$ 。

(6) 若 $signal=1$ ,则返回第(2)步;若 $signal=0$ ,进入下一步。

(7) 若仍然存在未平衡剩余残差点,则 $d=d+1$ ,返回第(3)步;若无未平衡剩余残差点,进入下一步。

(8) 若仍然存在未平衡等效残差点,则将其与最近的边界点连接。

(9) 根据枝切线图,通过路径积分获得高质量相位区域解缠绕相位图。

算法流程图如图3所示。

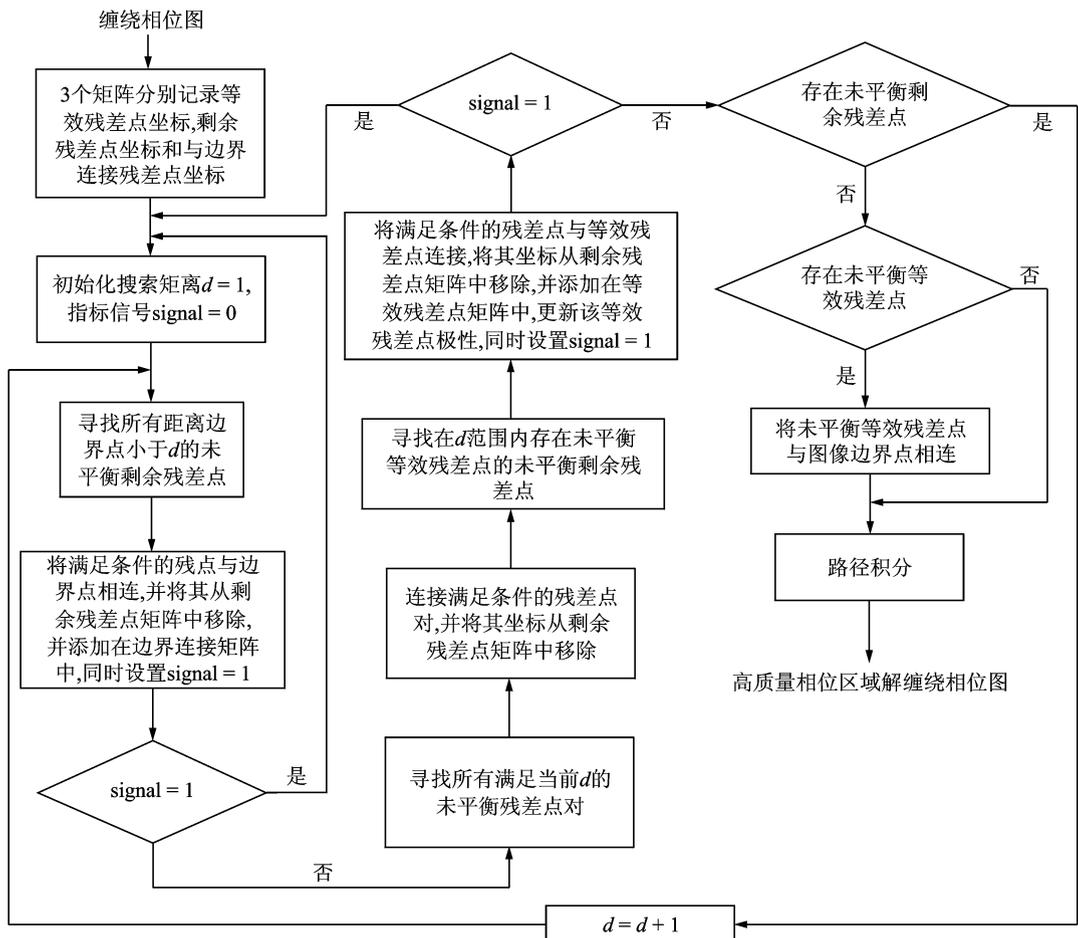


图3 高质量相位区域相位解缠绕算法流程图

## 2.2 算法流程介绍

本文算法充分考虑残差点的影响,首次提出了等效残差点的概念,并基于残差原理正确的设置枝切线,对高质量相位区域进行相位解缠绕。在等效残差点的内部低质量相位区域中,由于噪声干扰大,并且残差点分布密集,所以不能保证绝对干涉相位梯度值分布在 $[-\pi, \pi]$ 区间内。此时,利用区域生长法中多像素单元共同估计的方法进行相位解缠绕,突破了简单路径积分方法对于绝对干涉相位梯度值的限制,并且可以有效阻止相位解缠绕误差向高质量相位区域的传递。本文算法具体实现步骤如下:

- (1) 首先根据缠绕相位图计算得到残差点分布图和相位质量图;
- (2) 根据相位质量图划分低质量相位区域,并将其设置为等效残差点,更新残差点分布图;
- (3) 根据新的残差点分布图设置枝切线,对高质量相位区域进行相位解缠绕;
- (4) 基于高质量相位区域相位解缠绕结果,利用多像素单元共同估计的办法,对剩余低质量相位区域进行相位解缠绕。

算法流程图如图 4 所示。

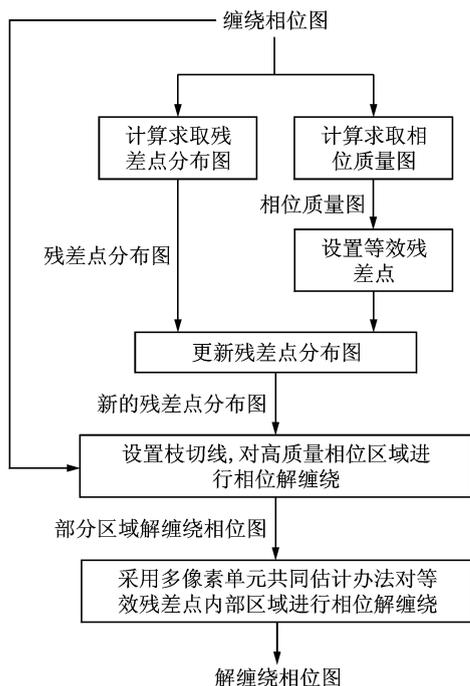


图 4 基于等效残差点的 InSAR 相位解缠绕流程图

需要指出的是,对于部分相位分布情况较为复杂的缠绕相位图,在设置等效残差点和枝切线的过程中均可能导致高质量相位区域被划分为多个离散区域。此时,多个离散高质量相位区域分别选择

不同的像素单元作为相位解缠绕起始点,会导致不同相位区域间存在 $2\pi$ 整数倍跳跃的现象。当同一低质量相位区域利用不同高质量相位区域的已解缠绕像素单元作为起始点进行解缠绕处理,可能会得到不同的相位解缠绕结果。此时,就必须利用相位区域融合技术来解决这一问题<sup>[3]</sup>。但是低质量相位区域融合会严重增加算法计算复杂度,所以本文算法仅保留像素单元最多的某一个离散高质量相位区域,而将其他区域同样设置为等效残差点,在其内部利用多像素单元共同估计的方法进行相位解缠绕,避免了低质量区域相位融合问题的产生。

## 3 算法性能分析

为了分析本文算法性能,分别通过仿真实验比较和实际数据处理,证明本文算法不但可以正确地进行相位解缠绕处理,并且相比较其他算法,具有更好的算法性能。

### 3.1 仿真实验比较

首先利用 Matlab 软件中的 peaks 函数生成理想绝对干涉相位图,然后将均值为 0,标准差为 0.70 rad 的均匀随机噪声叠加在该图像上,得到含噪声的绝对干涉相位图,如图 5(a)所示。图 5(b)为该图像的缠绕相位图,利用本文算法对其进行相位解缠绕处理,并将处理结果与图 5(a)所示的真实干涉相位图进行比较,从而分析本文算法性能。

根据残差原理求取残差点分布图,如图 5(c)所示,其中黑色像素单元代表该像素单元为残差点。相位质量图可以通过伪相关系数法,最大相位梯度法和相位导数方差法等从干涉相位图中直接获得,其中相位导数方差对于相位的不连续非常敏感,所以利用该方法所获得的相位质量图与残差点的分布最为接近,符合本文算法中需要寻找残差点密集分布的低质量相位区域的要求。因此,在图 5(d)中,根据相位导数方差,求取相位质量图,其计算公式为

$$z_{m,n} = \frac{\sqrt{\sum (\Delta_{i,j}^x - \bar{\Delta}_{m,n}^x)^2} + \sqrt{\sum (\Delta_{i,j}^y - \bar{\Delta}_{m,n}^y)^2}}{k^2} \quad (9)$$

式中:滑窗的中心像素单元坐标为 $(m, n)$ ;  $k$ 为滑窗的大小;  $\Delta_{i,j}^x$ 和 $\Delta_{i,j}^y$ 为缠绕相位分别沿方位向和距离向的偏导数;  $\bar{\Delta}_{m,n}^x$ 和 $\bar{\Delta}_{m,n}^y$ 则分别为滑窗内两个方向缠绕相位偏导数的均值。对比图 5(c)和图 5(d),可以发现质量图分布与残差点分布基本一

致,残差点分布越密集区域,其相位质量也越低。通过选取合适的质量阈值分辨低质量相位区域,并将其视为等效残差点,如图 5(e)中黑色区域所示,再根据等效残差点获得新的残差点分布图,如图 5(f)所示。对比图 5(c~f),发现新的残差点分布图具有以下特点:

(1) 虽然大部分残差点被等效为一个独立的残差点,但是仍然存在部分高质量相位区域内稀疏分布的剩余残差点,如图 5(c)中图像中间偏右侧区域的残差点依然被保留。

(2) 正如 2.1 节中所分析,由于将低质量相位区域内所有残差点的极性之和设置为该等效残差点的极性。此时,等效残差点不再是单独的像素单元,其极性也不再局限在 1 和 -1,甚至可能出现等效残差点本身极性为 0 的情况。如图 5(e)中图像

最上方和中间偏左侧的低质量相位区域,其自身极性恰好等于 0,所以在图 5(f)中没有显示。

需要注意的是,虽然本身极性为 0 的等效残差点在图 5(f)中没有显示,但是并不表示该等效残差点不存在。因此,根据图 5(f)所示新的残差点分布图,遵循残差原理在高质量相位区域设置枝切线时,依然需要将其作为闭合区域,阻止积分路径经过该区域。根据图 5(g)所示的枝切线分布图,对像素单元最多的高质量相位区域进行路径积分,得到部分区域相位解缠绕图像,如图 5(h)所示。最后利用区域生长法中多像素单元共同估计的方法对剩余区域进行相位解缠绕,得到图 5(i)所示的最终相位解缠绕结果。将其与图 5(a)进行比较,发现本文算法可以正确地进行相位解缠绕处理,并且获得理想的解缠绕结果。

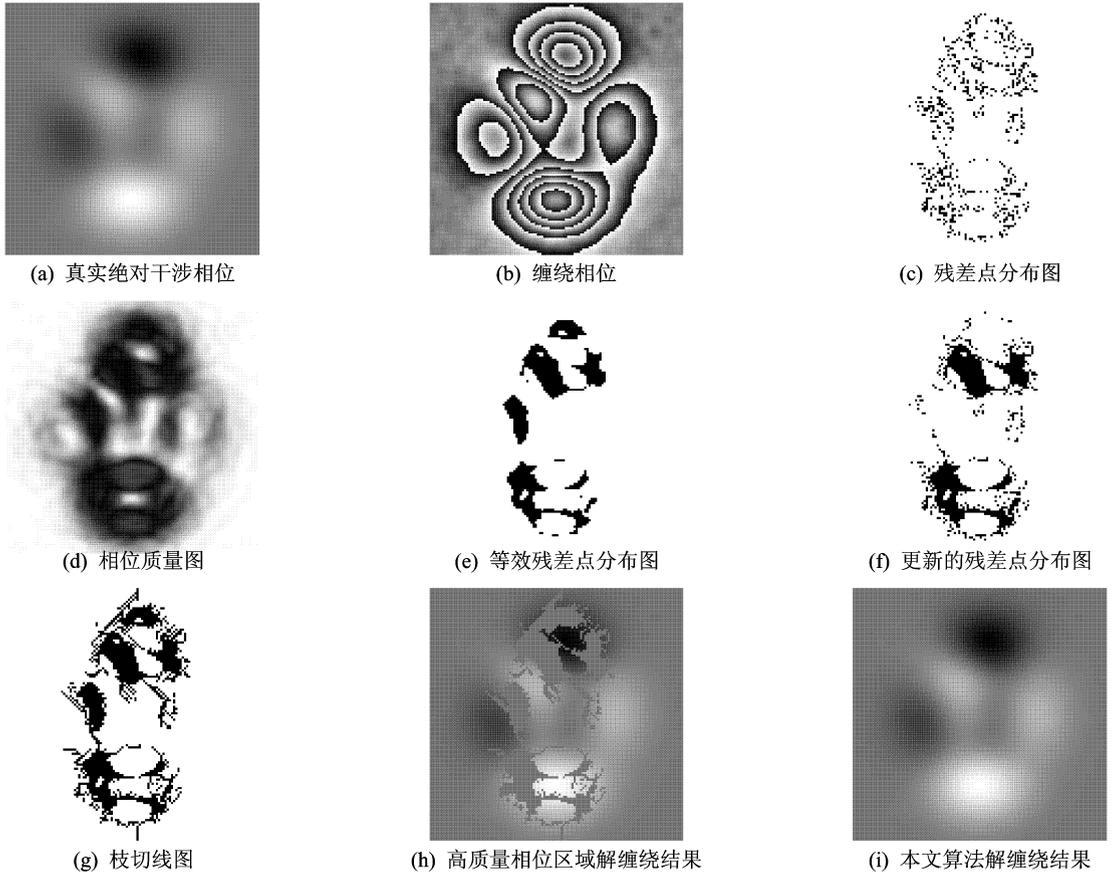


图 5 仿真实验结果

作者改变加入均匀误差的方差值,并计算利用本文算法和其他算法所得解缠绕相位的均方根误差来比较本文算法与其他算法的相位解缠绕精度,如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,本文算法所得解缠绕相位

表 1 本文算法和其他算法的相位解缠绕精度比较

噪声方差/ rad <sup>2</sup>	解缠绕相位的均方根误差/rad		
	本文算法	枝切截断法	加权最小二乘法
0.490 0	1.795 4	2.248 1	4.138 6
0.810 0	2.314 8	2.920 4	6.215 4
1.210 0	4.881 6	5.659 3	8.841 7

的均方根误差小于其他算法所得结果的均方根误差,证明本文算法具有更好的算法性能。

为了更为直观地说明本文算法性能,作者在 3 种相位解缠绕算法所得结果中,提取同一距离单元的相位信息与原始相位进行比较,如图 6 所示。考虑仿真图像中,中间的距离单元相位变化情况较为复杂。因此,在图 6 中选取第 64 个距离单元解缠绕相位结果进行比较。

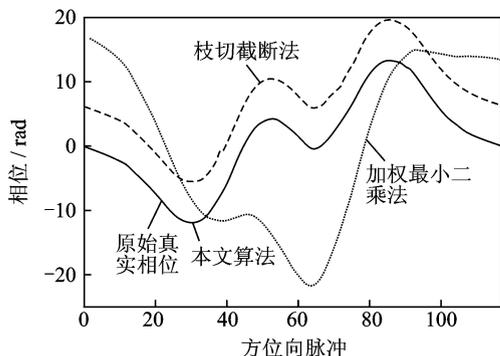


图 6 仿真实验结果:第 64 距离单元的解缠绕相位

加权最小二乘法由于是基于全局最优的相位解缠绕算法,其在局部区域内和原始真实相位并不完全吻合;枝切截断法虽然可以正确地恢复相位信息,但是相比较原始真实相位明显存在  $2\pi$  的相位跳变,并且由于该方法对于残差点所在像素单元仅仅利用简单的平滑处理估计其解缠绕相位,所以在个别像素单元内,其解缠绕相位结果与真实相位不符合;而本文算法不但对于高质量相位区域可以进行正确的相位解缠绕处理,并且对于残差点所在像素单元,也充分考虑该像素单元本身及周围相位的

变化信息,利用多像素单元对残差点本身进行准确的相位估计,其相位解缠绕结果和原始真实相位完全重合。

### 3.2 实际数据处理

为了进一步验证本文算法的有效性,将该算法应用于实际数据,处理结果如图 7 所示。图 7(a)为缠绕干涉相位图,图 7(b,c)分别为其对应的残差点分布图和相位质量图。其中,图 7(b)所示白色像素单元代表该像素单元为残差点。观察发现,在图像的下方和上方偏右区域残差点分布相对较为密集,这与图 7(c)所示相位质量图中的低质量相位区域分布基本吻合。通过选取适当的质量阈值,获得如图 7(d)所示的等效残差点分布图,其中黑色区域代表低质量相位区域,即等效残差点。结合图 7(b,d),获得新的残差点分布图,如图 7(e)所示。由于部分等效残差点自身极性恰好等于 0,所以该残差点在图 7(e)中并未显示,例如图像下方的多个等效残差点均未显示。根据新的残差点分布图,按照图 3 所介绍高质量区域枝切线设置方法,获得如图 7(f)所示的枝切线分布图。同样需要注意的是,极性为 0 的等效残差点需要在枝切线分布图进行标识,以阻止积分路径穿过该区域。通过简单的路径积分,首先获得高质量相位区域的相位解缠绕结果,如图 7(g)所示。最后利用多像素单元共同估计的方法,对剩余相位区域进行解缠绕,得到图 7(h)所示的最终解缠绕结果。观察发现,本文算法能够恢复出完整且较为平滑的相位曲面,特别对于残差点相对密集的低质量区域,依然可以获得良好的解缠绕效果,是有效的相位解缠绕算法。

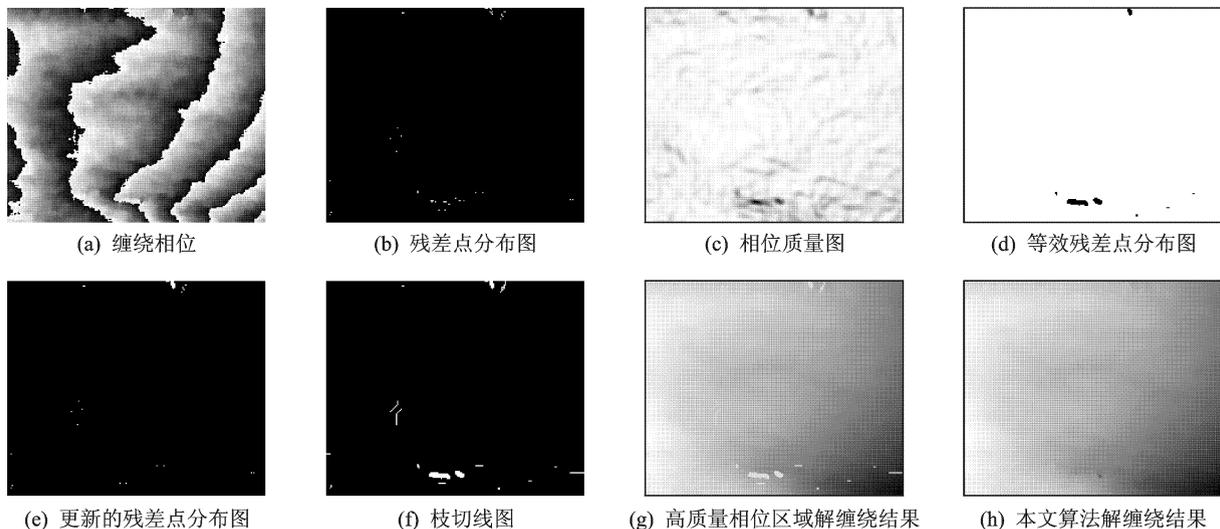


图 7 实际数据处理结果

## 4 结束语

本文基于枝切截断法的相位解缠绕算法原理,利用质量图与残差点分布之间的关系,首先提出了等效残差点的概念,将残差点密集的低质量相位区域设置为等效残差点,阻止积分路径穿过该区域,避免了在低质量相位区域中由于错误放置枝切线而产生展开相位存在  $2\pi$  整数倍跳跃的现象。在等效残差点的内部低质量相位区域中,由于噪声干扰大、残差点密集,不能保证绝对干涉相位梯度值的绝对值在半个周期  $\pi$  内,所以利用区域生长法中多像素单元共同估计的方法,对该相位区域进行相位展开,突破了对绝对干涉相位梯度值的限制,并且可以有效阻止相位解缠绕误差由低质量相位区域向高质量相位区域的传递。实验结果证明,本文方法可以获得比其他算法更好的相位解缠绕结果。

### 参考文献:

- [1] Judge R, Bryanston-Cross P J. A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1994, 21(4): 199-239.
- [2] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping[J]. *Radio Science*, 1988, 23(14): 713-720.
- [3] Xu Wei, Ian C. A region growing algorithm for InSAR phase unwrapping[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(1): 124-134.
- [4] Flynn T J. Consistent 2-D phase unwrapping guide by a quality map[C]//Proceedings of the 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). [S. l.]: IEEE, 1996:2057-2059.
- [5] Zhong Heping, Tang Jinsong, Zhang Sen, et al. An improved quality-guided phase-unwrapping algorithm based on priority queue[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(2): 364-368.
- [6] Ryo Y, Akria H. Singularity-spreading phase unwrapping[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(10): 3240-3251.
- [7] Mark D P, Jerome S S. Least-squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(3): 706-708.
- [8] Ghiglia D C, Romero L A. Minimum LP-norm two-dimensional phase unwrapping[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1996, 13(10): 1-15.
- [9] Costantini M. A phase unwrapping method based on network programming [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 813-821.
- [10] Zhang Kui, Ge Linlin, Hu Zhe, et al. Phase unwrapping for very large interferometric data sets [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3240-3251.
- [11] Antonio P, Leonardo D E, Michele M, et al. New advances of the extended minimum cost flow phase unwrapping algorithm for SBAS-DInSAR analysis at full spatial resolution[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 4062-4079.
- [12] Xiao Feng, Wu Jicang, Zhang Lei. A new method about placement of the branch cut in two-dimensional phase unwrapping [C] // APSAR. [S. l.]: IEEE, 2007: 755-759.

