

## 基于蚁群算法的 InSAR 相位解缠算法

魏志强 金亚秋

(复旦大学波散射与遥感信息教育部重点实验室 上海 200433)

**摘要:** 该文利用数字地面高程(DEM)数据的变更,由 SAR 成像机理和双尺度粗糙面散射计算构造得到多景具不同阴影的单视复数(SLC)SAR 影像数据。提出一种基于蚁群算法的相位解缠算法,用于多景具不同残差点数量的仿真相干 SLC 相干图像以及欧洲环境卫星(ENVISAT-ASAR)的 InSAR 图像的相位解缠,并与其他现有的解缠方法作比较。结果表明:该算法是一种有效的相位解缠方法,解缠精度与解缠速度上要优于其他一些常用的解缠方法。

**关键词:** InSAR; 相位解缠; 蚁群算法

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)03-0518-06

## InSAR Phase Unwrapping Algorithm Based on Ant Colony Algorithm

Wei Zhi-qiang Jin Ya-qiu

(Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information, Ministry of Education, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** According to scaled real Digital Elevation Maps (DEM) information, sets of Single Look Complex (SLC) SAR images are simulated for interferometric missions, based on the SAR imaging mechanism and scattering model of two-scale rough surface. On the basis of the Ant Colony Optimization (ACO), a novel phase unwrapping method is developed. This method is applied to the simulated sets of SAR images and real ENVISAT ASAR images of repeat-path orbits. Experiment results show its improved performances on unwrapping precision and speed with respect to several existed phase unwrapping algorithms.

**Key words:** InSAR; Phase unwrapping; Ant colony algorithm

### 1 引言

干涉 SAR(InSAR)通过两部天线观测地面的同一地区,得到单视复数(Single Looking Complex, SLC)影像数据,经过其相干运算得到相位差,进而可反演数字化地面高程图(Digital Elevation Maps, DEM)。由于相干相位是以  $2\pi$  为模的相位,InSAR 相位在相干过程中的缠绕,使得其整数倍周期相位被“模糊”了。因此,在利用 InSAR 技术反演 DEM 时,经过去噪声、配准、去平地效应等预处理后,需要对相干后缠绕相位进行解缠,以恢复被“模糊”掉的整数倍周期相位,还原真实的相位差<sup>[1]</sup>。实际获取的 InSAR 图像中存在着大量的相位非连续的“残差点”,归因于 SAR 系统噪声或者由地形突变造成的“叠掩”、“阴影”等。因此,在对相干图像相位解缠时,要避免由这些残差点引起的局部误差对解缠结果的影响。

相位解缠算法主要可分为两大类:基于路径积分的算法和基于数学拟和的算法<sup>[2, 3]</sup>。

路径积分算法基于逐个像素搜索,利用局部相位数据的信息,在相干图像中沿着一定的积分路径对缠绕相位进行积

分,以得到全局相位的解缠,如 Goldstein 的枝切法<sup>[4]</sup>, Flynn 的最小非连续算法<sup>[5]</sup>,掩模割线方法<sup>[6]</sup>等。最小非连续算法<sup>[5]</sup>首先识别相干图上的“边线”,通过对边线围成的每个区域增加整数倍的  $2\pi$  相位,使边界线两侧的非连续性最小以达到解缠的目的。掩模割线算法<sup>[6]</sup>通过识别残差点并产生分割掩模,使解缠路径不通过残差点,最后沿着分割掩模进行路径积分实现了相位解缠。

数学拟和算法是根据缠绕相位梯度与解缠相位梯度之间在整幅图像中差别最小的标准,建立相应的数学模型,求得接近于真实值的解缠相位。Fornaro<sup>[7]</sup>, Zebker<sup>[8]</sup>, Ghiglia<sup>[9]</sup>等人提出了不同的算法。该类方法中每点的解缠结果都是近似值,且因解缠中并没有避开残差点易使质量差地区的误差传播到整个图像。最小二乘解缠算法<sup>[7, 8]</sup>可分为不加权 and 加权最小二乘相位解缠算法。本文采用的不加权最小二乘相位解缠算法通过寻找缠绕相位离散梯度与解缠相位离散梯度之间最小偏差获得解缠的相位。最小  $L^P$  范数方法<sup>[9]</sup>可根据实际解缠的对象,选取不同的范数和缠绕相位梯度的权重与其他解缠方法相联系。

此外,基于网络流理论<sup>[10]</sup>、区域增长<sup>[11]</sup>等算法也被用于相位解缠。

最为常用的相位解缠算法是 Goldstein 枝切法<sup>[4]</sup>,它通过识别残差点并在它们之间建立分割路径(枝切线),以防止

2006-09-06 收到, 2007-01-12 改回

国家重点基础研究项目(2001CB309400)和国家自然科学基金(40637033, 60571050)资助课题

解缠中的积分路径穿过这些枝切线, 避免局部误差传播到整个图像中去。该方法速度快, 对于残差点较少的区域解缠精度较高。在枝切法中, 在避开枝切线进行相位积分时, 枝切线附近容易产生解缠相的累加误差。枝切线长度之和越短, 即路径越短, 解缠效果越好<sup>[12]</sup>。由于 Goldstein 方法所设置的枝切线未必最短, 在相干性差、残差点过多的区域, 难以选择准确的枝切线, 容易形成一个被枝切线包围的孤立区域而无法解缠, 即“解缠孤岛”现象<sup>[2, 3]</sup>。

本文介绍一种基于蚁群算法的相位解缠算法。用蚁群算法求得连接相干图像中所有残差点的最短路径, 然后再对该路径进行分割, 使分割的每段路径(即枝切线)上的正负残差点个数相等。这些枝切线不易围成封闭路径, 从而避免了部分区域无法解缠的现象。该方法对仿真 SLC 相干图像以及欧洲环境卫星(ENVISAT-ASAR)的 InSAR 图像进行解缠运算, 并与其他解缠算法进行了比较。数据实验结果表明, 本算法能够有效地解缠相位缠绕, 反演精度较高。

## 2 蚁群算法的相位解缠

路径最短问题可视为最优化的问题。目前很多优化算法已被用于相位解缠, 蚁群算法源于人们对自然界中蚂蚁群体觅食行为研究成果的启发, 模拟蚁群交流信息形成正反馈搜索蚁穴到食物源的最短路径。该算法能够智能搜索、全局优化, 并具有鲁棒性、并行性和易与其他算法结合等优点。Dorigo 等将其成功应用于旅行商问题的求解<sup>[13]</sup>。本文将蚁群算法用于相位解缠, 用其求得连接相干图像中所有残差点的最短路径, “蚂蚁选择最短路径”对应于“相位解缠中设置最短路径”。本文选择的蚂蚁个数等于残差点个数, 每只蚂蚁以不同的残差点为起始点。依据残差点之间路径的距离和经过该路径蚂蚁的数量, 计算该残差点连接其他残差点的概率, 并与概率最大的残差点相连接。然后, 再以被连接的残差点为起点, 继续判断该残差点连接剩余残差点的概率, 与概率最大的残差点相连接。依次循环, 直到连接全部的残差点。

蚂蚁在选择最短路径的过程中, 第  $k$  只蚂蚁在第  $t$  次循环从残差点  $i$  连接残差点  $j$  的概率  $P_{i,j}^k(t)$  为<sup>[13]</sup>

$$P_{i,j}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{i,j}(t)]^\alpha [\eta_{i,j}]^\beta}{\sum_{k \in \phi_k} [\tau_{i,k}(t)]^\alpha [\eta_{i,k}]^\beta}, & j \in \phi_k \\ 0, & j \notin \phi_k \end{cases}$$

其中  $\tau_{i,j}(t)$  为第  $t$  次循环残差点  $i$  与残差点  $j$  之间路径的信息素的强度。在本文中, 各路径上初始的信息素强度均取较小的相同值。  $\eta_{i,j}$  为残差点  $i$  到  $j$  的期望程度, 取  $\eta_{i,j} = 1/d_{i,j}$ ,  $d_{i,j}$  为残差点  $i$  和  $j$  之间的距离,  $\phi_k$  为未连接的残差点的子集,  $\alpha$  和  $\beta$  为经验权重参数。

在第  $t$  次循环后, 残差点  $i$  与  $j$  之间路径的信息素强度  $\tau_{i,j}(t)$  更新如下:

$$\tau_{i,j}(t+1) = \rho \cdot \tau_{i,j}(t) + \Delta\tau_{i,j}, \quad \rho \in (0,1)$$

其中  $\rho$  为信息素挥发系数,  $\Delta\tau_{i,j} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{i,j}^k$ ,  $m$  为蚂蚁个数, 如果第  $k$  只蚂蚁在本次循环中经过了路径  $r_{i,j}$ , 则,  $\Delta\tau_{i,j}^k = Q/L_k$ ,  $Q$  为经验常数,  $L_k$  表第  $k$  只蚂蚁在本次循环中所走过路径的长度, 否则  $\Delta\tau_{i,j}^k$  为零。

蚂蚁在选择路径时主要由路径上的信息素强度和残差点间的路径距离决定, 路径越短, 蚂蚁选择该路径的概率越大。另外, 走过该路径的蚂蚁越多, 其信息素就越强, 进而后来的蚂蚁选择该路径的概率就越大, 这样形成了一个正反馈, 如此循环, 即可找到最短的路径。具体过程如下:

首先, 在相干图像上识别残差点, 并将正负残差点分别标记“+1”和“-1”的极性。如果整体残差点的极性不平衡, 则通过增加最靠近残差点的边界点作为残差点达到残差点整体的极性平衡。然后, 通过蚁群算法求得连接所有残差点的一条最短路径。把该路径分割成许多尽可能短的路径, 且每段路径上连接的残差点的极性之和为零。具体步骤是: (1) 从该路径的起点开始, 按路径顺序连接每对极性相反且距离小于设定阈值的相邻残差点。在完成第一轮判断后, 对剩余的没有连接的残差点, 重复上述过程。(2) 经过步骤(1)后, 对可能剩下少量没有连接的残差点单独处理。先判断相距最近的两异性残差点的距离与它们到各自最近边界的距离之和(或者它们到靠近边界的已经连接好的残差点对的距离)。如果前者距离小于后者距离, 则直接连接。反之, 则将该异性残差点与其最近边界相连或通过已连接的残差点对再与别界相连。依次判断, 连接完所有剩余的残差点。

最后, 对完成路径分割的二维相干相位图进行积分解缠, 积分过程中应避开枝切线。

该方法考虑了整体的枝切线长度最短, 通过优化算法, 生成较短的全局路径。并将其分割为多条极性平衡的分割路径, 使其整体更短。这样, 由路径引起的解缠误差更小, 也不会形成孤立的不解缠区域, 提高了相位解缠的精度。同时, 该方法有很好的并行性, 利用并行计算机计算能够大大加快运算速度。

## 3 由 DEM 数据仿真构造 SLC 图像

本文依据 ENVISAT-ASAR 的参数设定: 卫星轨道高度  $H$  为 781km, 雷达频率 5.31GHz, 雷达对所选取的 DEM 中心位置视角  $\alpha$  为 23°, 基线与水平之间的夹角为 1°, 基线长为 200m。选取中国广东地区 DEM 构造 SLC 数据, 大小为 512×512 像素, 像素大小为 12.5×12.5m<sup>2</sup>, 重复轨道 SAR 观测地表 DEM 散射场的相干相位。图 1 为 DEM 在 SAR 轨道上构造单视复数(SLC)数据示意图<sup>[14]</sup>。

按 SAR 成像原理, DEM 上各点的高程分别沿着垂直于 SAR 入射波方向进行投影, 如图 1 中 DEM 上的  $P$  投影为  $N$  点。DEM 上各点的位置和高度不同, 它们到卫星的角度和距离也不同, 在 SAR 上成像的相位也不同。DEM 上第  $i$  行

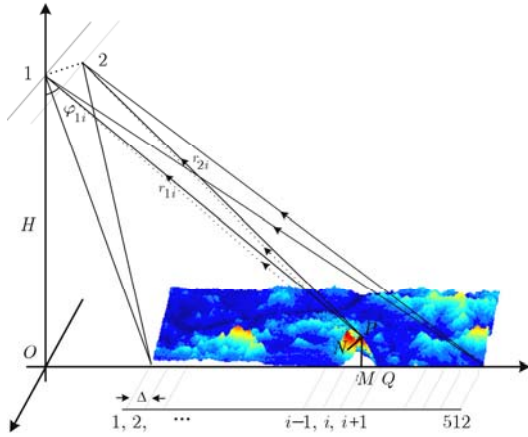


图1 DEM构造SLC数据

在轨道1上SAR成像的相位 $\varphi_{1i}$ ：

$$\varphi_{1i} = \frac{4\pi}{\lambda} r_{1i} \quad (1)$$

其中 $r_{1i}$ 为DEM第 $i$ 行 $P$ 点到达轨道1的距离,SAR波长 $\lambda$ 。

同样可得DEM在轨道2上SAR成像相位 $\varphi_{2i}$ 。

地面后向散射系数与SAR接收信号的幅值成正比。对随机起伏陆地地面采用双尺度模型, $vv$ 极化后向散射为

$$\sigma_{vv}(\theta_i) = \sigma_{vv}(\theta_i)^{KA} + \langle \sigma_{vv}(\theta_{il}) \rangle^{SPA} \quad (2)$$

其中 $\sigma_{vv}(\theta_i)^{KA}$ 为大尺度起伏Kirchhoff近似(KA)的散射系数, $\langle \sigma_{vv}(\theta_{il}) \rangle^{SPA}$ 为小尺度随机起伏的微扰近似(SPA)散射系数, $\theta_i$ 为入射角, $\theta_{il}$ 为局部入射角, $\langle \dots \rangle$ 表示小尺度微扰对大尺度地形起伏做概率平均<sup>[15]</sup>。取陆地介电常数为随机量 $\epsilon_1 = 6 + 0.5j + R(5 + 0.2j)$ ,式中 $R(\cdot)$ 为在0到1范围内的随机取值的函数,这样式(2)的散射系数有一随机起伏,用于构造SAR图像。

地面起伏越大,在SAR图像上造成的阴影就越多,其相干影像上的残差点也就越多。通过在DEM数据上乘以不同的系数来改变地形起伏的程度,来构造不同景的数据中的阴影和残差点的数目。

在轨道1上构造的第 $i$ 行SLC数据 $S_{1i}$ 可表示为

$$S_{1i} = C_1 H_{1i} \sigma_{vv}(\theta_i) \exp \varphi_{1i} \quad (3)$$

$C_1$ 为比例常数, $H_{1i}$ 为图像中阴影的因子,当第 $i$ 行的DEM没有被前面遮挡, $H_{1i}$ 取1,如图1上的 $P$ 点。否则取0,如图1上的阴影 $Q$ 点。同理可得轨道2的SLC数据 $S_{2i}$ 。阴影对SLC数据进行了调制。

依照前文方法,选取DEM构造相干的SLC数据,大小为 $512 \times 512$ 像素,用已有的DEM乘以5组不同的变更系数,获得5组不同地形起伏程度的数据。以DEM乘以变更系数2.8后构造的数据为例,如图2,图中的坐标单位为 $m$ 。

按SAR成像原理和双尺度粗糙面散射计算,每组DEM数据分别在两轨道参数下构造了相干的两景SLC数据,对其进行相干处理,去除平地效应。图3为2.8倍高程的模拟数据的相干图。

该方法构造的InSAR数据可用于对各种解缠算法进行

比较检验,有助于研究SAR图像阴影和叠掩造成的误差对反演结果的影响。另外,除了通过阴影和叠掩外,还可以通过添加随机噪声来构造InSAR图像中相位非连续的残差点。它们产生残差点的区别在于残差点分布不同,前者残差点分布在地形起伏较大的区域附近,而后者产生的残差点是较均匀的分布在整个相干图上。

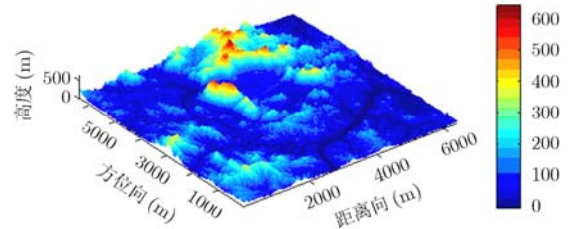


图2 2.8倍高程的三维地形图

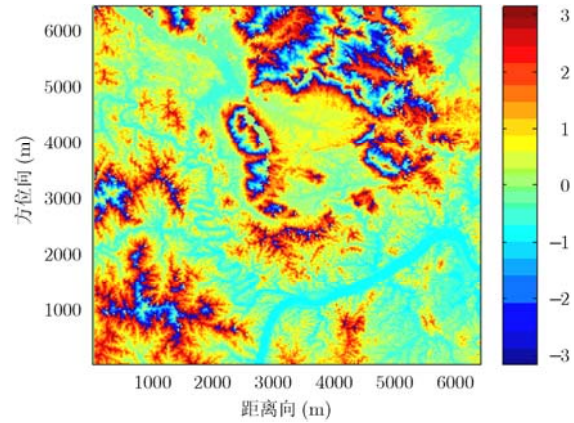


图3 相干图像

#### 4 实验数据结果

采用Goldstein方法和本文方法对上述模拟相干图像解缠,并反演出DEM。如图4和图5。

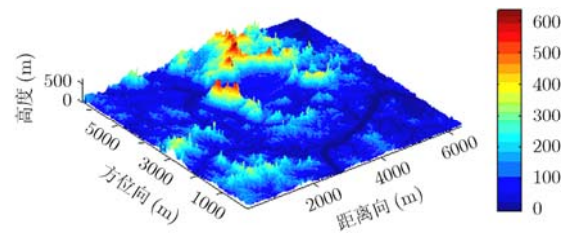


图4 Goldstein算法反演的DEM

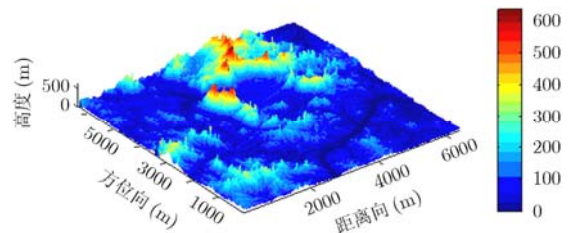


图5 本文算法反演的DEM

与图 2 的真实的 DEM 相比，可以看出，两种算法均较好地对相干图像进行解缠，反演了 DEM。将图 4 和图 5 中地形起伏较大的部分区域放大观察分析，如图 6 和图 7 所示。

在与阴影相邻的区域，图 4 和图 5 上都出现了一些细小的突起。在实际 DEM 中这些“突起”的地方往往是阴影，这是路径积分解缠算法共同的不足。因为在解缠过程中连接残差点的枝切线只是分割了枝切线两侧进行直接积分的路径，并不是隔开了整个阴影区域。所以，路径积分算法容易把一部分原本“零”相位的阴影区域积分为较高的相位值(该相位值与其相邻区域的解缠相位有关)，从而反演成较高的 DEM。

图 6，图 7 中大的黑色圆点和红色圆点分别表示正负残差点，连续小白色圆点表示枝切线。由图 6(Goldstein 算法)看出，在残差点较多的区域，出现了被枝切线(或者枝切线和阴影)围成的无法解缠的“解缠孤岛”。而本文算法(图 7)所设置的枝切线比较简洁，整体长度较短，没有产生无法解缠的封闭区域，但其突起误差却略多一些，尽管如此，本文算法在解缠精度上优于 Goldstein 方法。

根据上文方法，构造 5 景不同残差点数量的相干图像，

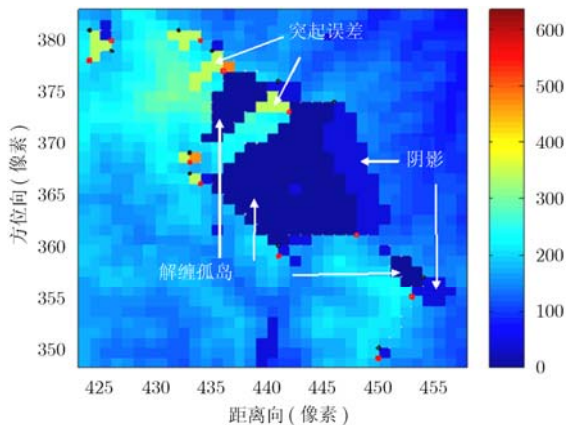


图 6 Goldstein 枝切法解缠结果

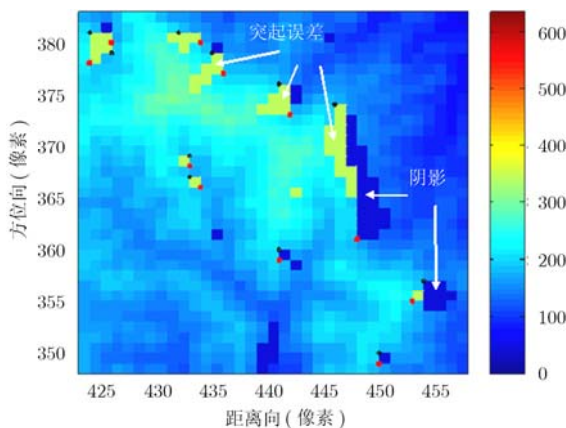


图 7 本文算法的解缠结果

从中选取残差点较密集的另一区域，将本文的解缠算法应用于模拟相干数据，并与其他几种解缠算法作比较。并选用平均误差、交叉熵和运算时间来对各种算法进行评价。交叉熵越小，说明反演值与真实值差异越小，反演结果越好。反演结果如表 1 与表 2。

表 1 各种解缠算法的平均误差 AE

解缠算法	残差点数				
	56	111	191	355	676
本文	0.627	1.387	1.910	3.415	6.145
枝切法	0.627	1.391	1.915	3.572	7.123
最小非连续法	0.627	1.560	2.133	3.471	5.575
掩模割线法	0.644	2.778	4.634	7.732	12.420
最小范数法	0.627	1.379	1.958	3.440	5.361
最小二乘法	5.618	15.069	24.977	57.214	91.665

表 2 各种解缠算法的交叉熵 CE

解缠算法	残差点数				
	56	111	191	355	676
本文	1.245	1.454	1.549	1.697	1.854
枝切法	1.246	1.455	1.549	1.699	1.869
最小非连续法	1.245	1.469	1.558	1.698	1.867
掩模割线法	1.245	1.462	1.560	1.722	1.886
最小范数法	1.245	1.454	1.550	1.698	1.850
最小二乘法	1.274	1.541	1.650	1.834	2.094

从表 1，表 2 可以看出，对于前 4 组残差点数据，本文解缠算法的平均误差和交叉熵均优于其他几种算法。但在残差点最多的一组数据中，最小范数算法解缠略好一些。原因是，在残差点特别多的时候，路径积分算法造成的突起较多，增大了误差。而最小范数法采用整体拟和的方法，没有“突起”误差等，反演的结果更为平滑。最小二乘法解缠效果最差是因为在解缠过程中产生了较大的误差传递。

从表 3 可看出，由于最小范数方法的复杂度比较高，其解缠的速度最慢。本文算法时间与残差点的数量和分布、蚂蚁的个数、迭代次数的选取有关。在残差点较少的数据中，

表 3 各种解缠算法运算时间(s)

解缠算法	残差点数				
	56	111	191	355	676
本文	0.35	0.35	0.95	4.49	21.55
枝切法	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
最小非连续法	0.33	1.06	1.51	1.64	2.75
掩模割线法	0.34	0.41	0.45	0.58	0.8
最小范数法	2.39	3.37	5.62	15.46	29.44
最小二乘法	0.36	0.36	0.36	0.41	0.39

运算时间短,随着残差点数量的增加,其计算时间增加很快,在残差点较多的数据中,其运算速度比最小范数算法快,比其他方法慢。

本文采用两景伊朗 Bam 地区 ENVISAT-ASAR 图像,进行配准,相干,去平地效应,滤波等处理后。在其 InSAR 图像中选取大小为  $512 \times 256$  像素的区域,如图 8。

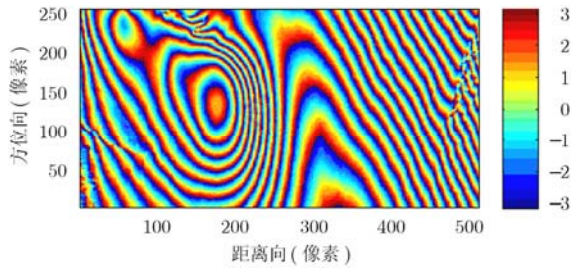


图 8 ENVISAT-ASAR 伊朗 Bam 地区 InSAR 图像

分别采用本文方法,Goldstein 枝切法,掩模割线法,最小非连续法,最小二乘法和最小范数法对其进行解缠。由于缺少该地区真实的 DEM 数据,仅就相位解缠速度和效果作了比较。采用上述几种相位解缠方法对 InSAR 图像进行相位解缠,反演出 DEM 效果图,如图 9:

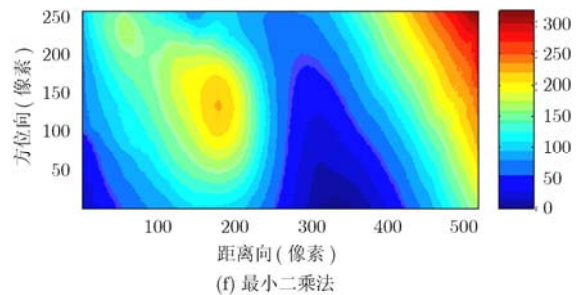
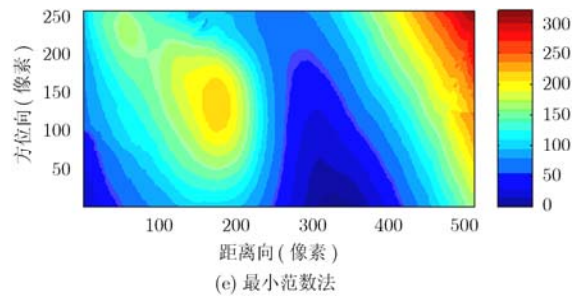
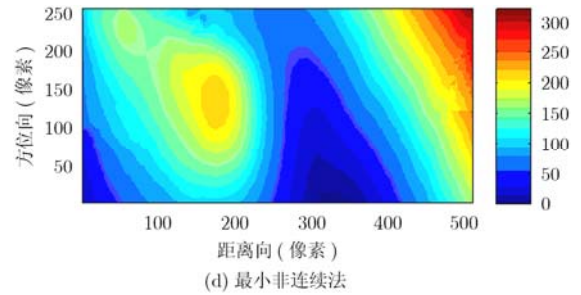
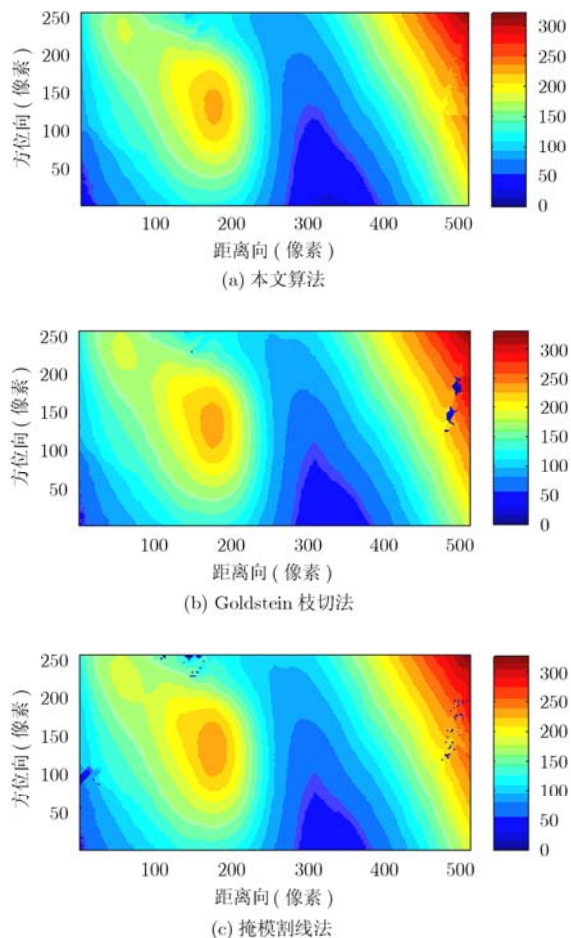


图 9 各种解缠算法反演 DEM 效果图

从上面解缠结果可以看到,在残差点密集的地方,Goldstein 枝切法和掩模割线法都产生了“解缠孤岛”现象。最小二乘法解缠结果比较模糊,平滑了图像的细节。而本文算法,最小非连续法和最小范数法解缠效果较好。

从表 4 可知,本文算法、枝切法、掩模割线法和最小二乘法的解缠速度较快,最小非连续法和最小范数法解缠速度较慢。本文方法在实际的 InSAR 图像相位解缠中,解缠速度较快,解缠效果较好。

表 4 各种解缠算法对 ENVISAT-ASAR 的 InSAR 图像的运算时间(s)

解缠方法	本文	枝切法	掩模割线法	最小非连续法	最小范数法	最小二乘法
解缠时间	0.58	0.28	0.39	44.86	54.78	0.30

上述两个数据实验结果和与其它解缠算法比较,本文算法的解缠精度和速度均有一定的优越性,但本文也存在一定的局限性,如其它路径跟踪算法,它对残差点密集的区域解缠效果很差,比如,本文算法难以对乘以 3.5 倍高程构造的相干数据进行解缠,不如最小范数方法。另外,随着残差点

增加, 本文方法的运算时间比枝切法等方法增加的要多。它是一种以牺牲较少的运算时间为代价, 较大的提高了运算精度的解缠算法。尽管如此, 本文算法仍是有效的路径跟踪解缠算法, 可用于多数情况下相干数据的相位解缠。

## 5 结束语

本文用中国广东地区的 DEM 数据和 ENVISAT-ASAR 的参数, 按 SAR 投影成像和双尺度粗糙面散射计算, 构造了 SLC 数据的相位和幅值。通过有比例地变更 DEM 的起伏程度造成多景数据具有不同的起伏高度和阴影, 进而构造了多景不同残差点数量的相干数据。该数据能够对各种 InSAR 解缠算法进行有效的估评检验, 有助于分析实际中的 SAR 图像的阴影对 InSAR 反演误差的影响。

本文提出了一种新的基于蚁群算法的相位解缠算法, 其利用了蚁群算法求解连接残差点的最短路径, 然后对该路径进行了分割, 生成更短的分割路径, 能够在解缠过程中避免出现“解缠孤岛”。将该算法分别应用于仿真 SLC 数据的相干图像和 ENVISAT-ASAR 伊朗 Bam 地区的 InSAR 图像, 并与其他几种解缠算法作了比较。解缠结果表明: 本文算法可有效用于不同复杂地形的相干图像的相位解缠。在残差点较少的数据中, 本文算法在解缠精度上优于其他几种解缠算法, 解缠速度也较快。在残差点最多的数据中, 本文算法在解缠精度上优于除最小范数法外的其他几种算法, 在解缠速度上优于最小范数法。本文算法既提高了相位解缠精度, 又兼顾了解缠的运算时间, 是一种比较有效的解缠算法。

**致谢** 感谢欧洲空间局(European Space Agency)提供 ENVISAT-ASAR 数据。

## 参 考 文 献

- [1] Zebker H A and Goldstein R M. Topographic mapping from interferometric SAR observation. *J. Geophys. Res.*, 1986, 91(B5): 4993-5001.
- [2] Ghiglia D C and Pritt M D. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software., New York: John Wiley & Sons. Inc. 1998.
- [3] 王超, 张红, 刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量, 北京: 科学出版社, 2002: 107-137.
- [4] Goldstein R M, Zebker H A, and Werner C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720.
- [5] Flynn T J. Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(10): 2692-2701.
- [6] Prati C, Giani M, and Leurattu N. SAR interferometry: A 2-D phase unwrapping technique based on phase and absolute values information. Proceedings of the 1990 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Washington, D. C., 1990, 2043-2046.
- [7] Fornaro G and Sansosti E. A two-dimensional region growing least squares phase unwrapping algorithm for interferometric SAR processing. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2215-2226.
- [8] Zebker H A and Lu Y. Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least-squares and synthesis algorithms. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, 15(3): 586-598.
- [9] Ghiglia D C and Romero L A. Minimum  $L^p$ -norm two dimensional phase unwrapping. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996. 13(10): 1999-2013.
- [10] Costantini M. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1998, 36(3): 813-821.
- [11] Xu W and Cumming I. A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1999, 37(1): 124-134.
- [12] Huntley J M and Buckland J R. Characterization of sources of  $2\pi$  phase discontinuity in speckle interferograms. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(9): 1990-1996.
- [13] Dorigo M, Maniezzo V, and Colomi A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Part B*, 1996, 26(1): 29-41.
- [14] Xu F and Jin Y Q. Imaging simulation of polarimetric synthetic aperture radar for comprehensive terrain scene using the mapping and projection algorithm. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2006, 44(11): 3219-3234.
- [15] Jin Y Q. Electromagnetic Scattering Modeling for Quantitative Remote Sensing. Singapore: World Scientific, 1993: 260-267.

魏志强: 男, 1974 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 与 InSAR 遥感信息处理。

金亚秋: 男, 1946 年生, 教授, IEEE Fellow, 研究方向为电磁散射辐射传输, 空间遥感信息, 计算电磁。