

优化的区域增长 InSAR 相位解缠算法

郭春生

(杭州电子科技大学通信学院, 杭州 310018)

摘要 在区域增长的干涉合成孔径雷达(InSAR)相位解缠算法中,种子的选择和种子相位值的确定是关键问题之一。本文研究了优化的区域增长2维相位解缠方法,包括合适的种子选取和种子相位值的优化处理,提出了将干涉相位图中相位跳变导致的边缘曲线作为种子,通过分析边缘曲线之间的相邻关系,基于遗传算法优化种子的相位值。仿真结果表明,该算法的计算量与干涉相位图的像素点数成近似线性关系,同时由于该算法属于局部算法,可以通过并行处理进一步提高计算效率。优化的区域增长2维相位解缠算法与其他2维相位解缠算法相比较,其解缠后的相位条纹与原始干涉相位图相位条纹的一致性非常好。该算法的处理结果与最小成本网络流相位解缠法相当,但其计算量却远远小于最小成本网络流相位解缠法的计算量。

关键词 2维相位解缠 干涉合成孔径雷达 边缘提取 区域增长 遗传算法

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2006)10-1380-07

Optimized Region-growing Algorithm for InSAR Phase Unwrapping

GUO Chun-sheng

(College of Communication, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018)

Abstract For region-growing phase unwrapping algorithm of interferometric synthetic aperture radar(InSAR), one of the key problems is to determine the seeds and the phase values of these seeds. In this paper, the optimized region-growing algorithm for 2-D phase unwrapping is discussed, involved determine the seeds and optimize the phase values of seeds. Taking the edge curves of interferogram as the seeds and analyzing the neighboring relationship of edge curves, the optimized phase values of seeds can be obtained by using the genetic algorithm. The experimental results show the computational complexity of the optimized region-growing algorithm is linearly correlative with the number of interferogram pixel. As a regional algorithm, the efficiency of the optimized region-growing algorithm can be improved by the paralleled processing. Compared with the branch-cut algorithm, the weighted least-squares algorithm and the network flow algorithm, the optimized region-growing algorithm has excellent coherence of fringe between the result image and original interferogram, as the network flow algorithm. But the computational complexity of this algorithm is far less than the network flow algorithm's.

Keywords 2D phase unwrapping, interferometric synthetic aperture radar, edge extract, region growing, genetic algorithm

1 引言

干涉合成孔径雷达成像(InSAR)处理将从2维复信号中提取相位信息^[1],直接计算得到的干涉相位值处于 $-\pi$ 到 $+\pi$ 范围内,与真实的干涉相位值

相比较是 2π 模糊的。根据 2π 模糊的2维干涉相位图的相位邻近关系,计算真实的2维干涉相位值的过程称为2维相位解缠处理。在理想情况下,直接采用积分法就可以完成2维相位解缠处理;但在实际情况下,由于 2π 模糊的2维干涉相位图将受到相位噪声、欠采样区域的存在等不利因素的影响,

基金项目:浙江省教育厅基金项目(20030657)

收稿日期:2005-07-06; 改回日期:2005-09-14

第一作者简介:郭春生(1971~),男,副教授。2002年于南京航空航天大学信息学院获通信与信息系统专业博士学位。主要研究领域为图像处理。E-mail: guo.chsh@gmail.com

使 2 维相位解缠处理过程复杂化。

2 维相位解缠算法主要可分为两大类:全局 2 维相位解缠算法和区域 2 维相位解缠算法。其中全局 2 维相位解缠算法主要包括:最小范数 2 维相位解缠算法^[2-4]、基于网络规划的 2 维相位解缠算法^[5-7]等;区域 2 维相位解缠算法主要有枝切算法^[8,9]、区域增长的相位解缠法^[10]。目前一些算法已经能够较好地克服 2 维相位解缠的固有困难,但是对于大幅 InSAR 干涉相位图的相位解缠,由于计算机内存的限制,因此分块处理成为必然。在分块处理中,不合适的分块处理将导致展开结果中出现以下两种情况,一种情况是相邻两个相位块在各自相位解缠处理中由于不确定因素的影响,在解缠结果中出现误差,造成解缠后的相邻相位曲面不能够完全对齐;另一种情况类似于枝切算法中的残点^[8],表现为相邻的 4 个解缠后相位数据矩形块,虽然可以两两对齐,但是却无法同时将 4 个数据块对齐。无论哪种情况都将造成分块解缠结果的合并困难,致使解缠结果出现马赛克效应。本文研究了大幅 InSAR 干涉相位图的相位解缠问题,提出了优化的区域增长 2 维相位解缠算法。该算法首先在干涉相位图中选取一定数量用于分块相位解缠的种子,然后通过定义的探测元分析各个种子之间相邻相位关系,在此基础上基于遗传算法优化全部种子的干涉相位值,最后根据种子优化后的干涉相位值,在各分块上采用区域 2 维相位解缠,完成大幅干涉相位图的相位解缠。实验仿真结果表明该算法能够有效处理大幅 InSAR 干涉相位图,实现相位解缠结构的局部性、合理性和全局最优性之间的折衷,较好地满足实际处理需要。

2 算法的基本原理和实现方法

对于大幅 InSAR 2 维干涉相位图的相位解缠,由于计算机内存等具体条件的限制,通常采用分块处理的方法,而不合理的分块将导致相位解缠结果的马赛克效应,因此本文采用首先在干涉相位图中选择一定数量的种子,通过分析种子之间的相位关系,对种子的相位值进行优化处理;然后根据种子的优化相位值,对各个干涉相位图分块进行相位解缠。由于已对种子的干涉相位值进行了优化处理,因此可以在最大程度上避免干涉相位图相位解缠结果的马赛克效应。

算法将干涉相位图中选取一定数量像素点作为

相位解缠的种子,其中选取种子的数量涉及到以下两个问题:

(1) 由于需要根据所选取种子之间的相位关系,优化种子的相位值,因此种子的数量决定了优化算法的复杂性,选取太多的种子将导致算法过于复杂化,必须限制种子的数量;

(2) 各图像分块的相位解缠将依据其上种子的优化相位值,这就要求各图像分块上的种子具有充分的代表性,根据这些种子的优化相位值能够在该图像分块上进行有效和可靠地相位解缠,选取过少的种子可能无法避免解缠结果的马赛克效应。在干涉相位图中,相位跳变产生的边缘曲线充分表征了干涉相位图的相位模糊信息,同时边缘曲线上的像素点数远远小于整个图像的像素点数,因此本文提出将干涉相位图中的加权边缘曲线作为区域增长相位解缠的起始种子。

2.1 InSAR 干涉相位图边缘曲线的提取

干涉相位图的边缘提取分为以下 3 步:滤波、边缘提取和边缘曲线的后处理。本文采用圆周期中值的干涉相位图的滤波方法^[11],其作用是削弱相位噪声,增强干涉相位图的边缘曲线,同时平滑干涉相位图中非相位跳变区域的相位曲面,方便后继的边缘提取和边缘曲线相位关系的探测处理。在滤波处理后,干涉相位图中由相位跳变产生的图像边缘是十分明显的,其边缘提取较一般图像边缘的提取容易得多。设干涉相位矩阵为 $\Psi = [\psi_{i,j}]$, $i \in [0, M-1]$, $j \in [0, N-1]$,可以采用简单的方法提取干涉相位图的边缘曲线

$$e'_{i,j} = \begin{cases} 1, & \psi_{i,j} - \psi_{n,m} < \pi \\ 0, & \psi_{i,j} - \psi_{n,m} > \pi \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\psi_{n,m} \in N(\psi_{i,j})$, 其中, $N(\psi_{i,j})$ 为像素点 $\psi_{i,j}$ 的邻域(如 4 邻域, 8 邻域)。

边缘提取后得到二值化边缘曲线图 $E' = [e'_{i,j}]$, $i \in [0, M-1]$, $j \in [0, N-1]$, 其各边缘曲线的宽度并不相等,这在探测边缘曲线之间的相位关系时,并不能提供更多的有用信息,需将二值化的边缘曲线图作形态骨架提取^[12];同时由于干涉相位图中残点的存在,可能导致两条相邻的边缘曲线相交,因此根据干涉相位图中残点的分布图 $W = [w_{i,j}]$, $i \in [0, M-1]$, $j \in [0, N-1]$, 其中,当 $N(\psi_{i,j})$ 中包含有残点时, $w_{i,j} = 0$, 反之当 $N(\psi_{i,j})$ 中不包含残点时, $w_{i,j} = 1$, 对二值化边缘曲线图的进行加权处理, 尽可能避免出现错误的相邻曲线连接, 相应的边缘

曲线后处理可表示为

$$E = W \cdot Skel[E'] \quad (2)$$

式中, $Skel[]$ 为形态骨架提取算子, E 为处理后的边缘曲线矩阵。

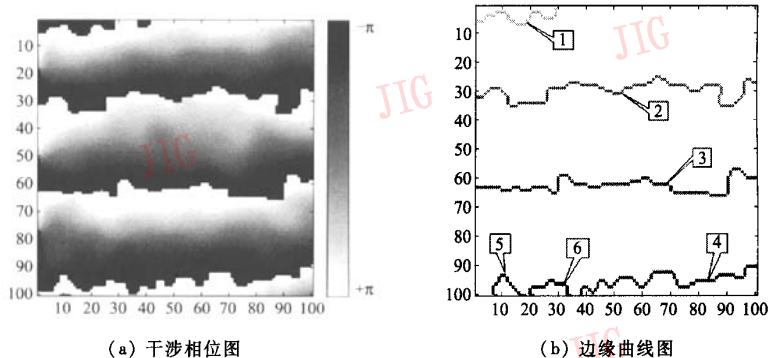


图 1 干涉相位图和提取的边缘曲线图

Fig. 1 The interferogram and the edge curve image

2.2 边缘曲线相邻关系的探测

在理想情况下,从干涉相位图中的某边缘曲线上的某点出发,经历相位值的单调变化路径,将到达与其相邻的边缘曲线,且两条边缘曲线的相位值相差 2π 。在实际情况中,虽然并非边缘曲线上的所有点都能经历相位值的单调变化路径到达与其相邻的另一条边缘曲线,但是到达的点数能够正确衡量两条边缘曲线相邻的可靠性。

根据这一事实,定义一个探测元,它从干涉相位图中某边缘曲线上的一点出发,在确定邻域内寻找相位变化小于 π 的较大值或较小值点,若在该邻域内所有点的相位值皆相等,则随机选择一点,如此探测元沿着相位值增加或减小的路径前进,直到不能够搜寻到不小于或不大于当前相位值处停止,或者步进次数大于确定数时停止。如果停止点正好位于另一边缘曲线上或在其邻近,则记这两条边缘曲线之间存在一次向上相邻或向下相邻。探测元按此规则遍历全部边缘曲线上的所有点,就可以得到边缘曲线间的向上相邻矩阵和向下相邻矩阵。下面给出了图 1 所示干涉相位图的向上相邻矩阵 W_{up} 和向下相邻矩阵 W_{down} , 其中, $W_{up}(2,1) = 37$ 表示在曲线 2 上有 37 点经过相位值增加路径到达曲线 1, $W_{down}(1,2) = 33$ 意味着从曲线 1 沿相位值减小路径共有 33 点到达曲线 2。合并向上相邻矩阵和向下相邻矩阵得到相邻矩阵 $W = [W_{up} + W_{down}^T]/2$ 。

图 1(a) 所示为一块 100×100 的真实干涉相位图,图 1(b) 为提取的边缘曲线图,从图中可以看出提取的边缘曲线正确直观地描述了干涉相位图中的相位模糊信息。

$$W_{up} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 37 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 109 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 63 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 13 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 17 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$W_{down} = \begin{bmatrix} 0 & 33 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 52 & 19 & 14 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 35 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 104.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 57.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 16 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 15.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.3 边缘曲线初始相位值的优化

根据探测元得到的干涉相位图边缘曲线的相邻矩阵,确定各边缘曲线的初始相位值属于优化问题。由于遗传算法对于优化问题具有应用范围较广和基本无限制的特点,可以利用遗传算法优化确定边缘曲线的初始相位值。下面讨论基于遗传算法的边缘曲线初始相位值确定的个体编码、交叉算子和变异算子的确定,适应度函数设计以及优化初始相位值

的确定等问题。

各边缘曲线相位差为 $2k\pi$,故对个体的编码可以采用整数数组 K ,数组的长度取决于边缘曲线的个数。设边缘曲线数为 N ,则 l 代第 a 个个体编码为

$$K_a^l = [k_a^l(1), k_a^l(2), \dots, k_a^l(N)], k_a^l(i) \in \mathbf{Z} \quad (3)$$

交叉算子选用算术交叉。设第 l 代的两个个体分别为 K_a^l 和 K_b^l ,则经过算术交叉运算后产生的第 $l+1$ 代的两个新个体 K_a^{l+1} 和 K_b^{l+1} 分别为

$$\begin{aligned} k_a^{l+1}(i) &= \alpha k_a^l(i) + (1 - \alpha)k_b^l(i) \\ k_b^{l+1}(i) &= (1 - \alpha)k_a^l(i) + \alpha k_b^l(i) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $0 < \alpha < 1$, a 是一个常数或是一个由进化代数决定的变量。

变异算子采用均匀变异。假设某个体为 K^l ,若对 $k^l(i)$ 进行变异处理,其取值范围为 $[k_{\min}^l(i), k_{\max}^l(i)]$,则对该个体的 $k^l(i)$ 的变异运算为

$$k^l(i) = k_{\min}^l(i) + \beta[k_{\max}^l(i) - k_{\min}^l(i)] \quad (5)$$

式中, β 为变异概率,是 $[0, 1]$ 范围内符合均匀概率分布的一个随机数。

根据相邻矩阵确定最优初始相位值是一个求最大值的问题,设相关矩阵为 $W = [w_{i,j}]$,个体的编码为 $[k^l(1), k^l(2), \dots, k^l(N)]$,则定义适应度函数为

$$\sum_{i,j} w_{i,j} D_{i,j} \quad i, j \in [1, 2, \dots, N] \quad (6)$$

式中, $D_{i,j} = \begin{cases} 1, & k^l(i) - k^l(j) = 1 \\ 0, & k^l(i) - k^l(j) \neq 1 \end{cases}$, N 为干涉相位图中边缘曲线的个数。

为提高算法的计算效率,减小迭代次数,算法采用随机遍历来确定第 1 代群体中个体编码的初始值,首先将相邻矩阵中最大值的行或列所对应的边缘曲线作为起始曲线,赋予所有个体编码整数数组中的对应位置处一个相同的整数,然后依据相邻矩阵,从起始边缘曲线出发随机确定搜索方向(即确定寻找向上相邻边缘曲线还是向下相邻边缘曲线),如果相邻曲线不只一条,则根据起始边缘曲线与各相邻边缘曲线相邻数的大小随机确定相邻曲线,并将起始边缘的相位整数加 1(向上相邻)或减 1(向下相邻)设置个体编码整数数组中与确定边缘曲线相对应位置处的数值。例如当前边缘曲线为 i ,其初始相位整数为 $k_0(i)$,以 0.5 的概率随机确定搜索方向,如果选择寻找向上相邻曲线且与其向上相邻的边缘曲线有 a, b, c 3 条,设曲线 i 与曲线 a, b, c 的相邻数分别为 $w_{i,a}, w_{i,b}$

和 $w_{i,c}$,定义 $w_i = w_{i,a} + w_{i,b} + w_{i,c}$,则分别以概率 $\frac{w_{i,a}}{w_i}$

$\frac{w_{i,b}}{w_i}, \frac{w_{i,c}}{w_i}$ 随机选择向上相邻的边缘曲线。如果选择了

曲线 a ,则设置初始相位整数 $k_0(a) = k_0(i) + 1$ 。如此随机遍历所有边缘曲线完成一个个体编码整数数组的初始化,根据由边缘曲线的个数以及相邻情况的复杂度所确定的群体中个体的数量 M ,重复以上过程 M 次就可以完成第 1 代群体中 M 个个体的编码初始化。

2.4 区域 2 维相位解缠

根据得到的干涉相位图边缘曲线优化初始相位值,通过区域增长相位解缠法,可以完成对干涉相位图中全部像素点的相位解缠处理。具体方法是在已解缠相位区域的邻域中按照一定的比例选择一些相关性较大待解缠的相位点。选取比例的大小将直接影响相位解缠后的局部特性,比例值越小,解缠后的局部特性越佳,当然相应的计算量也将增加。设干涉相位图中待解缠点的模糊相位值为 ψ_j ,与其相邻的 N 个已解缠的相位值分别为 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$,于是

定义 N 个整数 $m_i = \text{round}\left(\frac{\varphi_i - \psi_j}{2\pi}\right)$,其中 $i \in [1, 2, \dots, N]$,函数 $\text{round}(x)$ 是计算 x 的最邻近整数。当 $m_1 = m_2 = \dots = m_N$,则定义待解缠点的相位模糊数为 $k_j = m_i$,于是可以计算出待解缠点的真实相位值 φ_j 为

$$\varphi_j = \psi_j + 2k_j\pi \quad k \in \mathbf{Z} \quad (7)$$

不断选择上述满足条件的待解缠像素点,进行相位解缠,直至不能找到合适的像素点。最后剩下的为未解缠区域,将集中在残点和欠采样区域,此时可以通过相位曲面拟合消除残点和欠采样区域的相位曲面不连续。

3 实验结果与比较

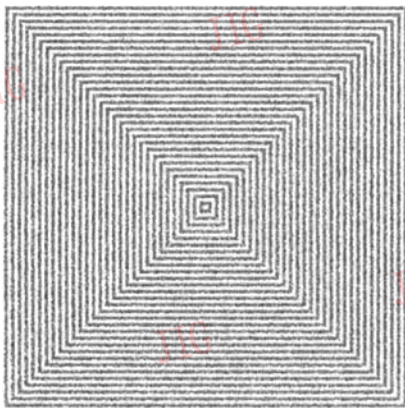
在优化区域增长 2 维相位解缠算法中,边缘曲线的提取、边缘曲线的骨架提取、边缘曲线相邻关系的探测和基于优化边缘曲线相位值的区域增长相位解缠等过程的计算量都与干涉相位图的像素点数相关,而基于遗传算法的边缘曲线相位值优化过程的计算量取决于边缘曲线的个数。一般情况下,干涉相位图的像素点数将远远大于干涉相位图中的边缘曲线数,因此,优化区域增长 2 维相位解缠算法的计算量主要取决于图像中的像素点数。

为了具体分析优化区域增长 2 维相位解缠算法的计算量和干涉相位图像素点数之间的关系,分别

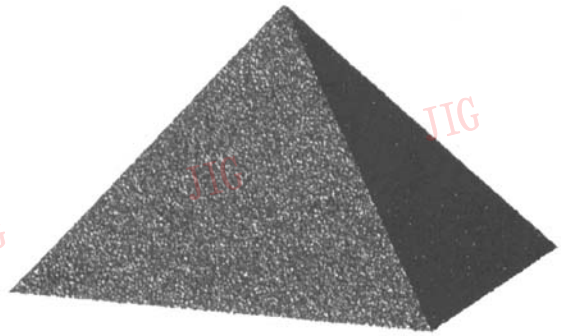
使用图 2(a) 和图 2(c) 所示仿真的和真实的矩形干涉相位图, 在不同数据块大小的情况下计算该算法处理时间的变换情况。图 2(b) 所示为使用优化区域增长 2 维相位解缠算法对图 2(a) 所示仿真数据进行相位解缠后的 3 维相位图; 图 2(d) 所示为该算法对图 2(c) 所示真实数据进行相位解缠后的 3 维相位图。图 3(a) 给出了在 2GHz 的奔 IV 处理器, 512M 内存配置的计算机上, 对于图 2(a) 所示不同大小的仿真干涉相位图, 使用优化区域增长 2 维相位解缠算法的 Matlab 实现进行相位解缠的处理时间, 图中横坐标为图像的像素点数, 纵坐标为算法的处理时间 (单位为秒)。从图中可以看出算法的处理时间随着图像的像素点数近似线性变化, 这就意味着该算法能够有效地处理大块干涉相位图数据, 特别是, 该算法的局部处理特点非常适合于并行实

现, 更展现出该算法良好的大数据块处理能力。图 3(b) 给出了对图 2(a) 所示真实数据进行相应处理的结果, 具体是从左上角开始不断扩大处理的数据块。对于真实数据由于干涉相位图中相位条纹的疏密是非均匀的, 各处的信噪比也是不相同的, 扩大处理的数据块时, 如果包含了相位条纹密集区或信噪比较低的区域 (如图 2(c) 中的左下角偏中和右下角偏上等区域的相位条纹就较密), 相应的处理时间就会显著增加, 因此从图中可以看出算法的处理时间对像素点数的变化规律为分段线性的。

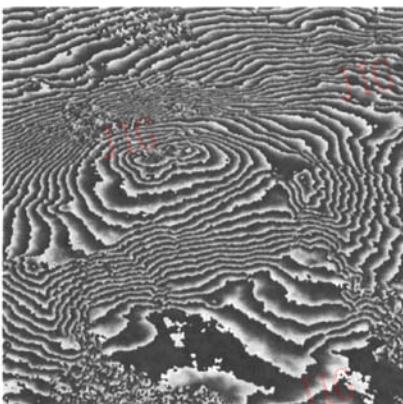
图 4 给出了对相同数据采用不同相位解缠算法进行处理的结果, 为了便于相互之间的比较, 图中给出的是不同算法相位解缠结果重新做模糊处理后的相位条纹图, 这样就可以从图中的干涉相位条纹变化上清楚地比较相位解缠处理前后以及不同算法的



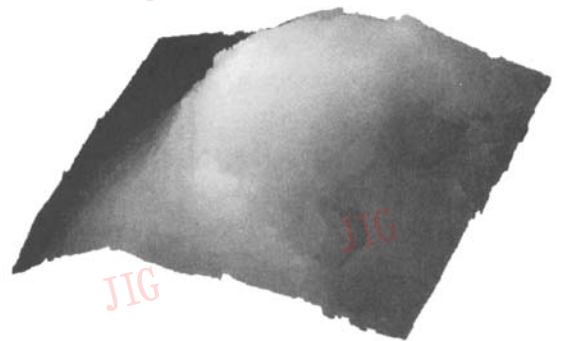
(a) 仿真的干涉相位图



(b) 解缠后的 3 维相位图



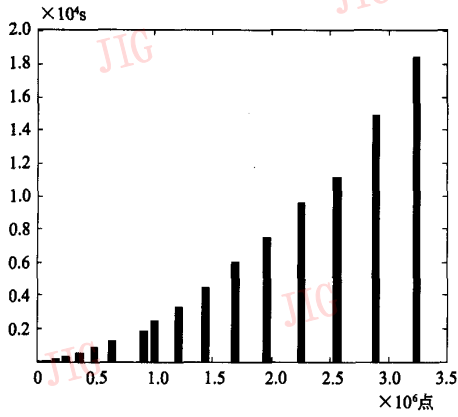
(c) 真实的干涉相位图



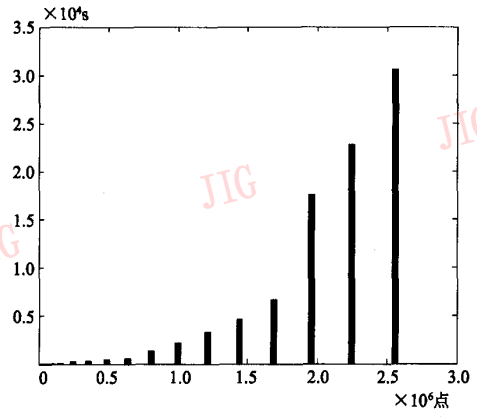
(d) 解缠后的 3 维相位图

图 2 干涉相位图和解缠后的 3 维相位图

Fig. 2 The interferogram and the 3D unwrapped phase image



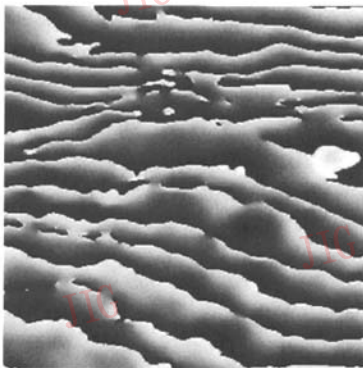
(a) 仿真数据的关系图



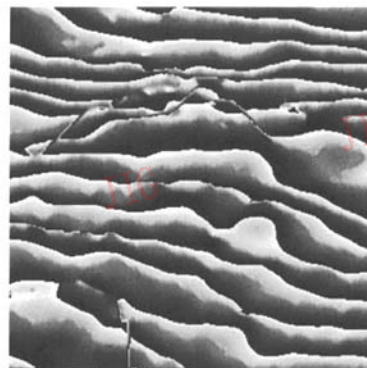
(b) 真实数据的关系图

图 3 像素点数与算法处理时间的关系图

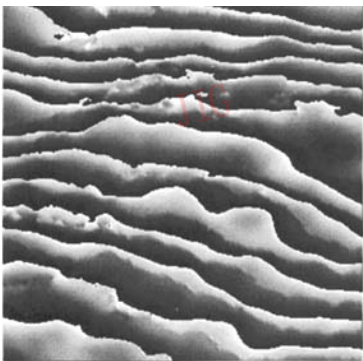
Fig. 3 The relationship between the number of pixel of interferogram and the processing time



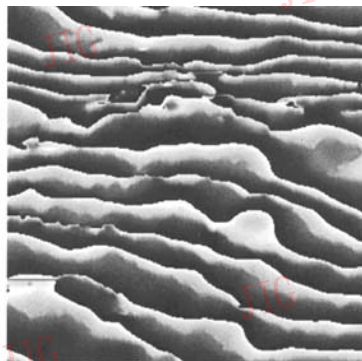
(a) 原始干涉相位图



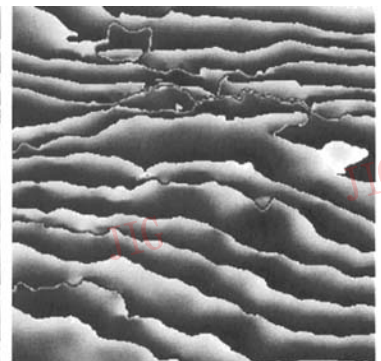
(b) 枝切相位法解缠后的相位条纹图



(c) 最小二乘相位法解缠后的相位条纹图



(d) 最小成本网络流法解缠后的相位条纹图



(e) 优化的区域增长法解缠后的相位条纹图

图 4 原始干涉相位图和不同相位解缠算法处理结果的相位条纹图

Fig. 4 The original interferogram and the result of different process algorithms

相位解缠处理结果的优劣。

对图 4(a) 所示 298×298 的干涉相位图使用优化的区域增长相位解缠算法进行处理,其相位解缠结果重新模糊后的相位条纹图如图 4(e) 所示。该算法从干涉相位图中共提取了 45 条边缘曲线,通过探测元得到各条边缘曲线之间的相邻关系,并利用遗传算法来确定边缘曲线的最优相位值。遗传算法共计算了 100 代,其中每代的个体数量为 300。整个算法的复杂度相当于在 298×298 的数据矩阵上的数倍于区域增长相位解缠算法(包括边缘曲线的提取,边缘曲线的处理,边缘曲线相邻关系的探测以及区域增长的相位解缠)和 1 次 45 个变量的优化操作。

图 4(b)、(c)和(d)给出了对图 4(a)的干涉相位图数据分别采用基于 Hungarian 算法的枝切相位解缠法、PCG 迭代最小二乘相位解缠法以及最小成本网络流相位解缠法处理结果重新模糊后的相位条纹图。从图中可以看出最小二乘相位解缠法和枝切相位解缠法的处理结果都出现了相位条纹的丢失现象,且枝切相位解缠法的边沿区域由于正负残点配对错误导致结果的相位条纹畸变(见图 4(b)左下角和中上部),而优化的区域增长相位解缠算法和最小成本网络流相位解缠法的处理结果与原始干涉相位图的相似度都很高。表 1 给出了 4 种算法的 Matlab 实现,在 2GHz 的奔 IV 处理器,512M 内存配置的计算机上,对图 4(a) 所示数据进行相位解缠处理所需运行的时间。虽然最小成本网络流相位解缠算法与优化的区域增长相位解缠算法相比较处理效果相当,但从表 1 中可以看出,在计算量上优化区域增长相位解缠算法较最小成本网络流相位解缠法具有明显的优势。

表 1 不同算法 Matlab 实现的计算时间

Tab.1 The process time of different algorithms realized by Matlab program

单位: s			
优化的区域 增长法	最小二乘 相位法	最小成本网 络流法	枝切相位 解缠法
61	113	14 124	16

4 结 论

本文研究了将干涉相位图的边缘曲线作为区域增长相位解缠算法的种子,通过分析边缘曲线之间的相位关系,利用遗传算法获得种子的优化相位值,

实现干涉相位图的优化区域 2 维相位解缠。该算法将全局优化算法和区域增长算法结合了起来,在数量远远小于干涉相位图像素数的边缘曲线上进行优化处理,因此其计算量近似随干涉相位图像素数的增加而线性增长,并且算法能够根据具体情况的需要,在区域增长相位解缠处理过程中有效控制解缠结果的局部特性。实验结果表明该算法能够实现 InSAR 干涉相位图的最优解缠,具有计算量适中、适合于大数据块和解缠结果的局部可控性等特点。

参考文献 (References)

- 1 WANG Chao, ZHANG Hong, LIU Zhi. Spaceborne Synthetic Aperture Radar Interferometry [M]. Beijing: Science Press, 2002: 99 ~ 147. [王超, 张红, 刘智著. 星载合成孔径雷达干涉测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 99 ~ 147.]
- 2 Pritt M D, Shipman J S. Least-squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(3): 706 ~ 708.
- 3 Chiglia D C, Romero L A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1994, 11(1): 107 ~ 117.
- 4 Chiglia D C, Romero L A. Minimum L^p -norm two dimensional phase unwrapping [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1996, 13(10): 1999 ~ 2013.
- 5 Costantini M. A novel phase unwrapping method based on network programming [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 36(3): 813 ~ 831.
- 6 Carballo G F, Fieguth P W. Probabilistic cost functions for network flow phase unwrapping [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2192 ~ 2201.
- 7 Refice A, Satalino G, Stramaglia S, et al. Weights determination for minimum cost flow InSAR phase unwrapping [A]. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceeding [C], Hamburg, Germany, 1999: 1342 ~ 1344.
- 8 Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping [J]. Radio Science, 1988, 23(4): 713 ~ 720.
- 9 Huntley J M. Noise-immune phase unwrapping algorithm [J]. Applied Optics, 1989, 28(15): 3268 ~ 3270.
- 10 Xu W, Cumming I. A region growing algorithm for InSAR phase unwrapping [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(1): 124 ~ 134.
- 11 Lanari R, Fornaro G, Riccio D, et al. Generation of digital elevation models by using SIR-C/X-SAR multifrequency two-pass interferometry: the Etna case study [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(5): 1097 ~ 1112.
- 12 CUI Qi. Image process and analysis: the methods and applications of mathematical morphology [M]. Beijing: Science Press, 2000: 67 ~ 77. [崔屹著. 图象处理与分析: 数学形态学方法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 67 ~ 77.]