

GPS 控制点辅助 InSAR 相位解缠算法研究

罗海滨¹ 何秀凤²

1 南京信息工程大学地理与遥感学院,江苏 南京,210044
2 河海大学卫星及空间信息应用研究所,江苏 南京,210098

摘 要:利用 GPS 控制点辅助合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)进行相位解缠能提高 InSAR 相位解缠的精度。首先提出了一种以多个 GPS 控制点为解缠起算点的多解缠起算点枝切线相位解缠算法;然后,针对上述算法仍可能存在解缠孤岛,且无法得到残差点解缠值、无法保证整周未知数的整周特性的问题,提出了结合上述算法和基于马尔柯夫随机场的 GPS 辅助 InSAR 相位解缠算法的综合算法。实验结果表明,综合算法结合了多解缠起算点枝切线相位解缠算法和基于马尔柯夫随机场的 GPS 辅助 InSAR 相位解缠算法的优势,解缠精度高、解缠范围大。

关键词:GPS; InSAR; 相位解缠; 枝切线法; 马尔柯夫随机场

中图法分类号:P228; P237 **文献标志码:**A

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术以其高精度、低成本、空间近连续性和遥感探测的优势为数字高程模型(digital elevation model, DEM)获取和地面形变监测提供了新的手段^[1-4]。相位解缠是 InSAR 数据处理中的关键步骤^[5]。相位解缠主要包括两步:(1)基于缠绕相位,计算解缠相位在方位向和距离向的相位梯度;(2)沿方位向和距离向对解缠相位梯度积分,即可得到解缠相位。理想情况下,相位解缠容易实现。但实际上,由于受噪声等多种因素的影响,相位解缠仍是 InSAR 数据处理中的难点和热点问题^[6-8]。根据所采用的积分方法不同,相位解缠方法大致可以分为三类。第一类是路径跟踪法,如枝切线法^[9]、区域生长法^[10];第二类是最小范数法,如加权和等权最小二乘法^[11];第三类是基于最优估计的方法,如网络流法^[12]、蚁群算法^[13]、马尔柯夫随机场法^[14]、卡尔曼滤波法^[15]。

上述解缠方法在解缠过程中都只用到了 InSAR 信息,随着 GPS 技术,尤其是连续运行参考站(continuously operating reference stations, CORS)技术的不断发展,GPS 观测得到的信息被逐步引入到 InSAR 解缠过程中来,以提高 InSAR 相位解缠的精度。文献[16]提出了一种 GPS 辅

助枝切线的相位解缠算法,该算法通过引入 GPS 信息来帮助设置枝切线和确定积分路径,从而避免解缠误差的全局传播。但文献[16]没有给出算法的具体执行过程,且该算法在残差点处无法进行解缠,是一种局部解缠算法。文献[17]提出了一种基于马尔柯夫随机场的 GPS 辅助 InSAR 相位解缠算法(简称为 Gud 解缠算法),该算法利用 GPS 获取解缠相位初值和指导解缠过程。Gud 解缠算法能得到每一个像素点的解缠相位,是一种全局解缠算法。但 Gud 解缠算法没有考虑残差点的影响,会造成解缠误差的全局传播;且该算法解缠初值获取精度受 GPS 点个数的影响,当 GPS 点个数较少时,解缠精度不高。本文首先提出了一种以多个 GPS 控制点为解缠起算点的多解缠起算点枝切线相位解缠算法(简称为 Nbc 解缠算法);然后,针对 Nbc 解缠算法仍可能存在解缠孤岛,且无法得到残差点解缠值问题,提出了结合 Nbc 解缠算法和 Gud 解缠算法的综合算法;最后,利用仿真和实际数据对解缠算法的性能进行了分析。实验结果证明,综合算法既考虑了残差点的影响,避免了解缠误差的全局传播,解缠精度高,又能得到残差点和孤岛的解缠相位,是一种全局解缠算法。

1 算法描述

1.1 Nbc 解缠算法

枝切线相位解缠算法是路径跟踪法中的经典算法,该算法通过识别残差点设置枝切线,保证解缠结果的一致性。枝切线法解缠速度快、精度高,但存在如下问题:(1)在残差点密集区域容易产生孤岛,孤岛内外像元解缠值不连续;(2)随着积分路径的延长,容易出现解缠误差的累积。

为了克服枝切线法存在的上述问题,在 GPS 数据可用的情况下,本文提出了一种以多个 GPS 控制点为解缠起算点的多解缠起算点枝切线相位解缠算法,即 Nbc 算法。Nbc 算法的具体执行过程如下。

1) 如图 1,将 GPS 观测站配准到缠绕干涉图中,并将其观测值(三维形变或高程)反演成解缠相位。

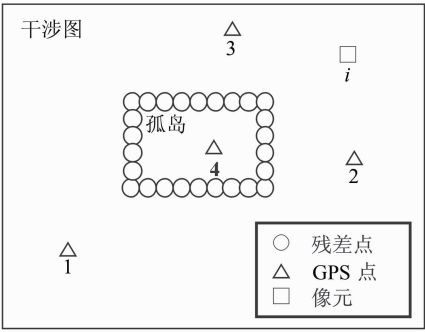


图 1 Nbc 算法解缠示意图

Fig. 1 Diagram of Nbc Algorithm Unwrapping

2) 以任意 GPS 点为解缠起算点,用枝切线法对干涉图中非残差点进行解缠,直到所有可解缠点被解缠。以图 1 为例,若以 1 号 GPS 点为解缠起算点,孤岛外的所有非残差点将被解缠,而孤岛内的点不被解缠;若以 4 号 GPS 点为解缠起算点,孤岛内的所有非残差点将被解缠,而孤岛外的点不被解缠。

3) 重复步骤 2,直到所有 GPS 点都做过解缠起算点。

4) 对同一个像元的不同解缠值求加权平均,并将加权平均值作为该像元的最终解缠值。以图 1 为例,像元 i 的最终解缠值可按下式计算:

$$u_i = \sum_{k=1}^3 p_k \cdot u_{ki} \tag{1}$$

式中, u_i 为像元 i 的最终解缠值; u_{ki} 为以 k 号 GPS 点为解缠起算点得到的像元 i 的解缠值; p_k 为

权,按下式确定:

$$p_k = \frac{d_{ki}^{-2}}{\sum_{k=1}^3 d_{ki}^{-2}} \tag{2}$$

式中, d_{ki} 为 k 号 GPS 点到像元 i 的距离,以像素计。需要说明的是,当某一区域内仅有一个 GPS 点可用时(如图 1 所示孤岛情况),则该区域像元的最终解缠值即为以这个 GPS 点作为解缠起算点的解缠结果。

5) 将 GPS 反演的解缠相位赋给解缠干涉图上相应的像元,解缠结束。

由 Nbc 算法的解缠过程可以看出,有 GPS 点的孤岛,孤岛内外像元解缠相位连续,这部分克服了枝切线法的问题 1。像元最终解缠结果更多地由离该像元近的解缠起算点决定,减少了长路径积分的累积误差,克服了枝切线法的问题 2。

1.2 Gud 解缠算法

相位解缠算法实际上是寻找最优整周未知数矩阵 \mathbf{K} 的过程。而从概率统计的观点来看,寻找最优 \mathbf{K} 的过程等价于在给定缠绕干涉图 \mathbf{I}_w 的情况下对 \mathbf{K} 进行最大似然估计,即:

$$\hat{\mathbf{k}} = \operatorname{argmax}_{\mathbf{k}} \mathbf{P}(\mathbf{K} = \mathbf{k} | \mathbf{Y} = \mathbf{I}_w) \tag{3}$$

式中, \mathbf{k} 为 \mathbf{K} 的估值; $\hat{\mathbf{k}}$ 为 \mathbf{K} 的最终估值; \mathbf{P} 为概率; \mathbf{Y} 为缠绕相位矩阵。

对于 InSAR 解缠干涉图而言,图中某一像元的整周数高度依赖于其邻近像元的整周数。根据整周数的这一性质,可利用马尔柯夫随机场对其建模,而根据贝叶斯及吉布斯-马尔柯夫等价定理可得:

$$\mathbf{P}(\mathbf{K} = \mathbf{k} | \mathbf{Y} = \mathbf{I}_w) \propto \exp \left(- \frac{U(\mathbf{K} = \mathbf{k} | \mathbf{Y} = \mathbf{I}_w)}{T} \right) \tag{4}$$

式中, T 表示温度; $U(\cdot)$ 是能量函数,其形式因具体问题不同而异。由式(4)可以看出,InSAR 解缠过程可转化为求能量函数 $U(\mathbf{K} = \mathbf{k} | \mathbf{Y} = \mathbf{I}_w)$ 最小值的过程,该过程可用模拟退火算法实现。

能量函数的确定是整个解缠问题的关键,文献[17]构造了平滑约束能量函数:

$$U_1 = \gamma_1 \sum_{i \in \eta_l} \sum_{j \in \eta_p} (I_u^{i+1,j} + I_u^{i-1,j} + I_u^{i,j+1} + I_u^{i,j-1} - 4I_u^{i,j})^2 \tag{5}$$

式中, γ_1 为常数; η_l 和 η_p 为干涉图行方向和列方向的像元个数; $I_u^{i,j}$ 为解缠值。平滑约束能量函数只考虑到了干涉图本身的特性,在 GPS 数据可用的情况下,文献[17]又构造了 GPS 约束能量函数:

$$U_2 = \gamma_2 \sum_{i \in \eta_l} \sum_{j \in \eta_p} [(I_u^{i,j} - I_u^{i-1,j})^2 W_{i-1,j} + (I_u^{i,j} - I_u^{i+1,j})^2 W_{i+1,j} + (I_u^{i,j} - I_u^{i,j-1})^2 W_{i,j-1} + (I_u^{i,j} - I_u^{i,j+1})^2 W_{i,j+1}]$$

(6)

式中, γ_2 为常数; W 为计算掩码。当 W 在 GPS 固定域内时为 1, 否则为 0。所谓 GPS 固定域是指上一轮退火后被正确解缠的像元集合, 固定域内的解缠值在新一轮退火中将不再被更新。在第一轮退火时, 固定域为离散的 GPS 点; 第一轮退火结束后对离散的 GPS 点进行膨胀从而扩大固定域的范围, 接着进行第二轮退火; 如此反复, 直到固定域充满整个干涉图。GPS 约束使某点的解缠相位值趋近于离该点近的 GPS 反演的解缠相位值。总的能量函数可以表示为:

$$U = U_1 + U_2$$

(7)

由式(4)~(7)及模拟退火算法构成了基于马尔柯夫随机场的 GPS 辅助 InSAR 相位解缠算法, 即 Gud 解缠算法。

1.3 综合算法

Nbc 算法在非残差点处解缠精度高, 但无法对残差点进行解缠, 且当孤岛内没有 GPS 控制点时仍存在解缠孤岛, 是一种局部解缠算法; 又由于采用了多个解缠结果的加权平均, 无法保证整周未知数的整周特性。Gud 解缠算法能得到每个像元的解缠值, 是一种全局解缠算法; 但在没有考虑残差点的情况下利用平滑约束进行相位解缠, 会导致解缠误差的全局传播, 且当 GPS 点个数较少时, 解缠精度不高。为了结合 Nbc 算法和 Gud 算法的优势, 本文给出了一种综合算法。综合算法的具体执行过程如下。

1) 利用 Nbc 算法对缠绕干涉图进行相位解缠, 得到非残差点和有 GPS 点的孤岛像元的整周未知数估值。

2) 将步骤 1 得到的整周未知数估值取整, 再作为初值代入 Gud 算法进行整周未知数修正, 得到非残差点和有 GPS 点的孤岛像元的最终解缠值。

3) 对步骤 2 解缠结果进行插值, 得到残差点和没有 GPS 点的孤岛像元的解缠值。

4) 将步骤 2 解缠像元标记为固定域, 将步骤 3 插值像元标记为非固定域, 并将步骤 2 和步骤 3 结果合并后作为初值代入 Gud 算法进行解缠, 得到所有像元的最终解缠值, 解缠过程结束。

由上述执行过程可以看出, 综合算法首先用 Nbc 算法对质量好的像元进行解缠, 再用 Gud 算法进行修正, 保持了整周未知数的整周特性。然后以质量好的像元的高精度解缠值为约束进一步对质量不好的像元进行解缠, 从而最大限度地抑制解缠误差传播。综合算法兼具了 Nbc 算法解缠精度高和 Gud 算法解缠范围大的优点, 实现了解缠精度与解缠范围的较好综合。

2 实验与分析

2.1 仿真数据分析

为了验证 Nbc 算法和综合算法的性能, 根据文献[18], 在 100×100 像素二维栅格点上模拟水平及垂直方向形变, 再由模拟形变反演得到模拟解缠干涉图, 如图 2(a) 所示。在图 2(a) 中随机选取 20 个点, 点的位置模拟 GPS 观测站分布, 点的值模拟由 GPS 观测数据反演的解缠相位。对图 2(a) 加标准差为 0.7 rad 的高斯白噪声并做缠绕处理, 得到含有噪声的缠绕干涉图, 如图 2(b) 所示。

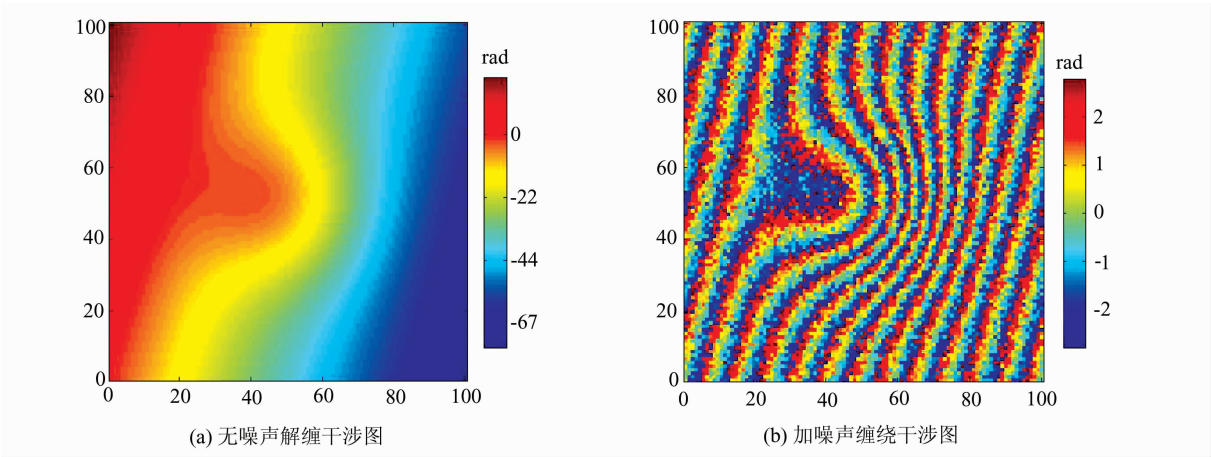


图 2 模拟的解缠及缠绕干涉图

Fig. 2 Simulated Unwrapped Interferogram and Wrapped Interferogram

分别利用枝切线算法、Nbc 算法、Gud 算法和综合算法对图 2(b)进行解缠,解缠误差如图 3 所示,图 3 中“+”代表 GPS 观测站。比较图 3(a)和图 3(b)可以看出,解缠精度方面,由于解缠误差的全局传播,枝切线法总体高估了解缠相位,但 Nbc 算法解缠精度较高,不存在明显的高估或低估。解缠孤岛方面,枝切线法存在两个解缠孤岛,但在 GPS 的辅助下,Nbc 算法能对干涉图下方的孤岛进行正确解缠。解缠范围方面,两种算法对残差点都无法进行解缠。比较图 3(c)和图 3(d)

可以看出,解缠精度方面,由于平滑约束在干涉图边缘变弱,导致 Gud 算法对噪声的抑制能力降低,因此,在干涉图边缘,Gud 算法解缠精度较低。同时,由于 GPS 测站大都位于干涉图四周,解缠是由四周向中间逐步进行的,导致解缠误差逐步向中间积累。因此,在干涉图中间,Gud 算法解缠精度也较低。综合算法解缠精度高,且精度均一。解缠孤岛方面,两种算法都无解缠孤岛。解缠范围方面,Gud 算法和综合算法都可以得到所有像元的解缠值。

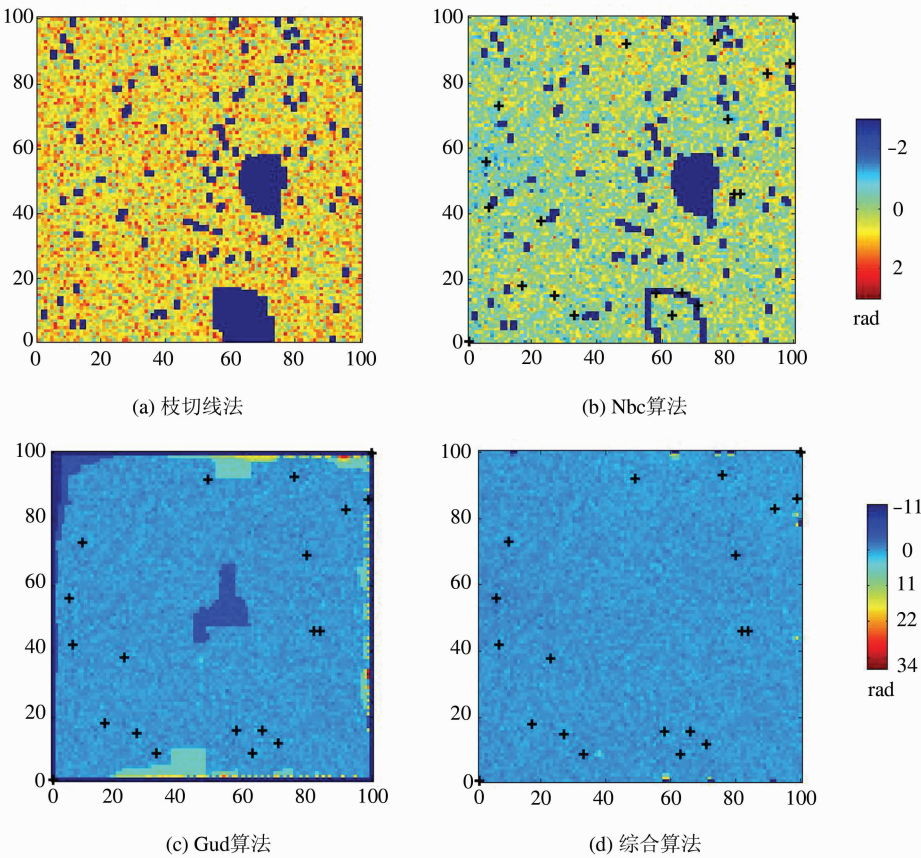


图 3 4 种算法解缠误差

Fig. 3 Phase Errors after Application of Four Unwrapping Algorithms to Simulated Wrapped Interferogram

比较图 3(b)和图 3(d)可以看出,在非残差点和非孤岛像元处,Nbc 算法和综合算法解缠精度高,且由于 Nbc 算法获得的整周未知数非常接近整数,因此,二者的解缠精度基本相当。但在残差点和中部孤岛处,Nbc 算法不能正确解缠,而 Gud 算法能进行正确解缠,且精度高。综合以上分析,综合算法在解缠精度和解缠范围方面都取得了最佳的效果。

为了进一步验证分析解缠算法的性能,利用 4 种解缠算法分别对 4 种噪声水平的模拟缠绕干涉图进行解缠,解缠误差见表 1。表 1 中,枝切线

法和 Nbc 算法只考虑非残差点和非解缠孤岛像元,第一列括号内数值为残差点个数。由表 1 可以看出,随着噪声水平的升高,4 种解缠算法的解缠精度都在下降,但在非残差点处,Nbc 算法的解缠精度始终高于枝切线法;综合算法与 Nbc 算法的解缠相当,且始终高于 Gud 算法。在残差点处,在噪声标准差为 0.7 rad 和 1.1 rad 时,综合算法解缠精度高于 Gud 算法;在噪声标准差为 1.6 rad 时,残差点数多达 9 890 个,此时,固定域像元很少,综合算法退化成了 Gud 算法。因此,二者解缠精度相当。

表 1 不同噪声水平下 4 种算法均方根误差/rad

Tab. 1 RMS Errors After Application of Four Unwrapping Algorithms to Different Noise Level Data/rad

噪声标准差	解缠算法					
	枝切线法	Nbc 算法	Gud 算法		综合算法	
			非残差点	残差点	非残差点	残差点
0.2(0)	0.242	0.242	1.977	-	0.240	-
0.7(1 042)	1.104	0.700	2.774	3.249	0.700	2.143
1.1(5 849)	4.151	2.583	4.549	5.222	2.580	3.860
1.6(9 890)	4.380	3.644	5.058	6.003	3.634	6.256

2.2 实际数据分析

对美国南加利福尼亚地区两幅环境卫星(environmental satellite,ENVISAT)合成孔径雷达影像进行干涉处理,得到缠绕干涉图,截取部分缠绕干涉图作为实际验证数据。在该验证数据区域范围内分布有 5 个南加利福尼亚综合 GPS 站点,缠绕干涉图和 GPS 站点分布情况见图 4。

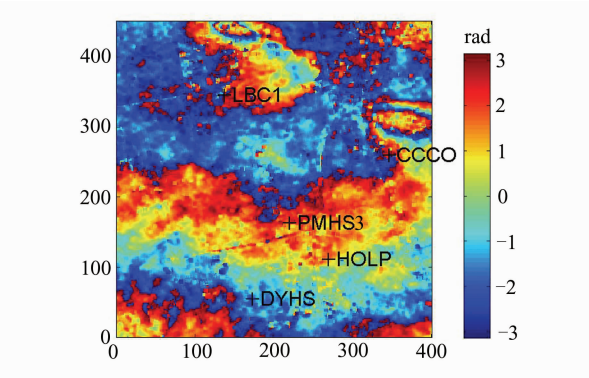


图 4 实际缠绕干涉图及 GPS 站点分布
Fig. 4 Real Wrapped Interferogram and Distribution of GPS Sites

利用 4 种解缠算法对验证数据进行解缠,结

果见图 5。比较图 5(a)和图 5(b)可以看出,解缠精度方面,枝切线法和 Nbc 算法的解缠精度较高,且由于缠绕干涉图的质量较好,从不同起算点进行解缠的结果相同,因此,二者的解缠精度相当。解缠孤岛方面,二者对箭头所指的孤岛都不能进行正确解缠。解缠范围方面,两种算法对残差点都无法进行解缠。比较图 5(c)和图 5(d)可以看出,解缠精度方面,综合算法的解缠精度明显优于 Gud 算法。这是由于 Gud 算法采用 GPS 插值作为解缠初值,而本例中 GPS 站点数较少,插值精度不高。解缠孤岛方面,两种算法都无解缠孤岛。解缠范围方面,Gud 算法和综合算法都可以得到所有像元的解缠值。比较图 5(b)和图 5(d)可以看出,在非残差点和非孤岛像元处,Nbc 算法和综合算法解缠精度高且基本相同;但在孤岛处,Nbc 算法不能正确解缠,而 Gud 算法能进行正确解缠,且精度高。综合以上分析,实际数据再一次验证了综合算法在解缠精度和解缠范围方面都取得了最佳的解缠效果。

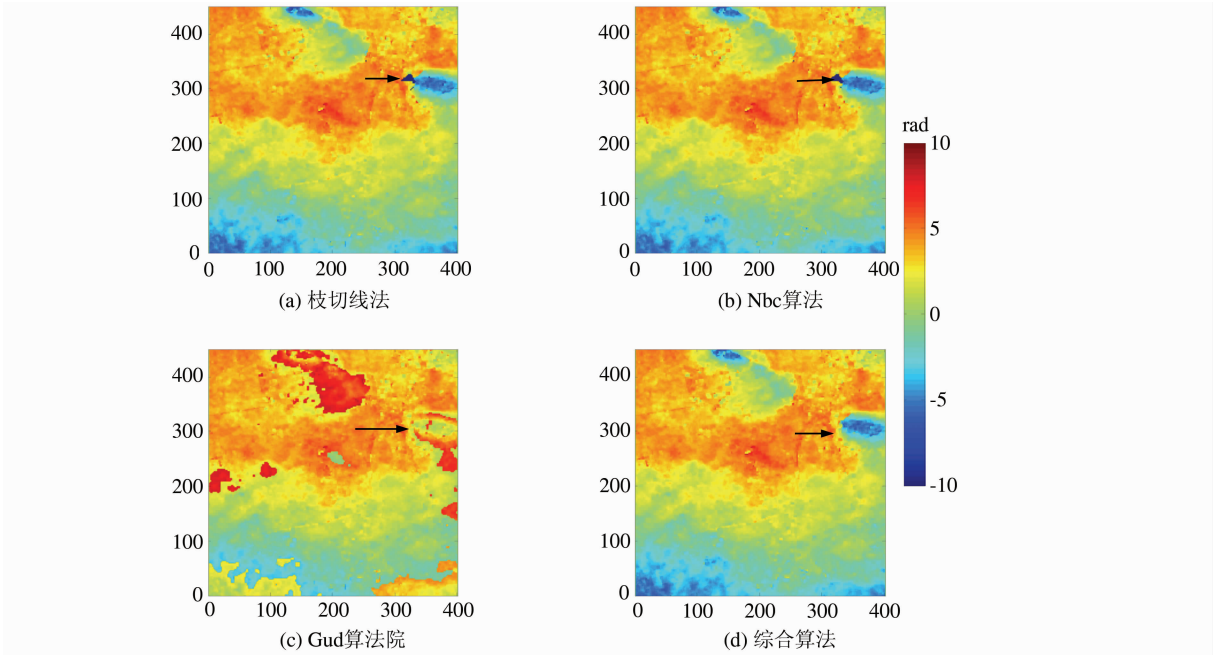


图 5 4 种算法解缠结果

Fig. 5 Unwrapping Results After Application of Four Unwrapping Algorithms to Real Wrapped Interferogram

3 结 语

表 2 给出了枝切线法、以多个 GPS 控制点为解缠起算点的多解缠起算点枝切线相位解缠算法

表 2 4 种算法比较
Tab. 2 Comparison of Four Algorithms

算法	解缠范围	是否存在解缠孤岛	解缠精度	解缠速度/min
枝切线法	非残差点	可能存在	较高	快(0.2)
Nbc 算法	非残差点	可能存在,但存在可能性小于枝切线法	高	较快(1)
Gud 算法	所有点	不存在	低	较慢(32)
综合算法	所有点	不存在	高	慢(34)

枝切线法解缠精度较高,解缠速度快,但不能解缠残差点,在相干性差的区域容易形成解缠孤岛。由于采用多个 GPS 点作为解缠起算点,不容易造成解缠误差的累积,因此,Nbc 算法解缠精度高于枝切线法,且对有 GPS 点的孤岛能进行正确的解缠,解缠孤岛存在的可能性小于枝切线法。但 Nbc 算法要多次利用枝切线法进行解缠,因此解缠速度慢于枝切线法,且仍不能解缠残差点。Gud 算法能对所有点进行解缠,不存在解缠孤岛,但解缠精度低于枝切线算法和 Nbc 算法,尤其当 GPS 站点数量较少时,解缠精度低。由于采用了模拟退火寻优算法,Gud 算法解缠速度较慢。综合算法结合了 Gud 算法解缠范围大和 Nbc 算法解缠精度高的优势,能对所有点进行解缠。在非残差点上解缠精度与 Nbc 算法相当,高于 Gud 算法;由于能更好地抑制解缠误差的全局传播,因此,在残差点上解缠精度高于 Gud 算法。由于是两种算法的结合,因此综合算法解缠速度慢于其他三种方法,但笔者认为,相较于地表形变这一缓慢微小过程而言,以稍长的数据处理时间换取更高精度、更大范围的测量结果是值得的。

参 考 文 献

[1] Jiang Houjun, Zhang Lu, Wang Yong, et al. Fusion of High-Resolution DEMs Derived from COSMO-SkyMed and TerraSAR-X InSAR Datasets[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(6):587-599

[2] Jiang Houjun, Liao Mingsheng, Zhang Lu, et al. High Resolution SAR Interferometric DEM Reconstruction with COSMO-SkyMed Tandem Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(9):1 055-1 058(蒋厚军, 廖明生, 张路, 等. 高分辨率雷达卫星 COSMO-SkyMed 干涉测量生成 DEM 的实验研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2011, 36(9):1 055-1 058)

即 Nbc 算法、基于马尔柯夫随机场的 GPS 辅助 InSAR 相位解缠算法即 Gud 算法和综合算法的性能比较。表 2 中,枝切线法和 Nbc 算法仅考虑能解缠的点,解缠速度以实际验证数据为例。

[3] Gupta M, Mohanty K K, Kumar D, et al. Monitoring Surface Elevation Changes in Jharia Coalfield, India Using Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(6):2 875-2 883

[4] Hu Jun, Li Zhiwei, Zhu Jianjun, et al. Measuring Three-Dimensional Surface Displacements from Combined InSAR and GPS Data Based on BFGS Method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(1):117-126(胡俊, 李志伟, 朱建军, 等. 基于 BFGS 法融合 InSAR 和 GPS 技术监测地表三维形变[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(1):117-126)

[5] Zhong Heping, Zhang Sen, Tian Zhen, et al. A Fast Quality-Guided Phase Unwrapping Algorithm in Heterogeneous Environment[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(6):756-760(钟何平, 张森, 田振, 等. 异构环境下的快速质量引导相位解缠算法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2015, 40(6):756-760)

[6] Jiang Rui, Zhu Daiying, Zhu Zhaoda. Phase Unwrapping Approach Using Equivalent Residues for InSAR[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2013, 45(2):219-216(蒋锐, 朱岱寅, 朱兆达. 一种基于等效残差点的 InSAR 相位解缠绕方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 45(2):219-216)

[7] Zhong Heping, Tang Jinsong, Zhang Xuebo. Blocked Phase Unwrapping Algorithm Based on Minimum Discontinuity[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(9):1 801-1 806(钟何平, 唐劲松, 张学波. 基于最小不连续的分块相位解缠算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(9):1 801-1 806)

[8] 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)
- [9] Goldstein R M, Zerber H A, Werner C L. Satellite Radar Interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping[J]. *Radio Science*, 1988, 23(4):713-720
- [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] Ghiglia 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*, 1994, 11(1):107-117
- [12] Chen C W. Statistical-Cost Network-Flow Approaches to Two-Dimensional Phase Unwrapping for Radar Interferometry[D]. Stanford: Stanford University, 2001
- [13] Wei Zhiqiang, Jin Yaqiu. InSAR Phase Unwrapping Algorithm Based on Ant Colony Algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(3):518-523(魏志强, 金亚秋. 基于蚁群算法的 InSAR 相位解缠算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(3):518-523)
- [14] Chen Runpu, Yu Weidong, Wang Robert, et al. Integrated Denoising and Unwrapping of InSAR Phase Based on Markov Random Fields[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(8):4 473-4 485
- [15] Liu Guolin, Hao Huadong, Tao Qiuxiang. Kalman Filter Phase Unwrapping Algorithm and Comparison and Analysis with Other Methods[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(10):1 174-1 178(刘国林, 郝华东, 陶秋香. 卡尔曼滤波相位解缠及其与其他方法的对比分析[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2010, 35(10):1 174-1 178)
- [16] Cheng Pu, Xu Caijun, Wang Hua. Analysis of Phase Unwrapping Algorithm[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(3):50-55(程璞, 许才军, 王华. InSAR 相位解缠算法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(3):50-55)
- [17] Gudmundsson S, Carstensen J M, Sigmundsson F. Unwrapping Ground Displacement Signals in Satellite Radar Interferogram with Aid of GPS Data and MRF Regularization[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8):1 743-1 754

InSAR Phase Unwrapping Algorithms with the Aid of GPS Control Points

LUO Haibin¹ HE Xiufeng²

1 School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information
Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 Institute of Satellite Navigation and Spatial Information System, Hohai University, Nanjing 210098, China

Abstract: The precision of interferometric synthetic aperture radar(InSAR) phase unwrapping can be improved by aid of global positioning system(GPS). In this paper, a new branch-cut phase unwrapping algorithm using several GPS control points as unwrapping initial points is proposed. However this algorithm cannot produce correct estimates in residues and isolated regions introduced by the placement of branch cuts. It cannot guarantee the integer properties of the unknown circle number. To solve these problems A new synthesis algorithm that combines the new algorithm with phase unwrapping algorithm with aid of GPS based on Markov random filed(MRF) is proposed. The experimental results show that the synthesis algorithm combines the advantages of new several unwrapping initial points branch-cut algorithms and algorithms based on MRF and can offer higher precision with greater spatial coverage.

Key words: GPS; InSAR; phase unwrapping; residue-cut; Markov random field

First author: LUO Haibin, PhD, lecturer, specializes in InSAR technology. E-mail: hbluo@nuist.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41301400.