

基于区域分割和编码的相位解缠方法

詹总谦¹ 钱俊¹ 舒宁¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要:分析了相位解缠的原理及干涉条纹数据的特点, 提出了一种基于中值自适应滤波、区域分割和编码的解缠方法。实验证明了该方法的可行性。

关键词:干涉测量; 相位解缠; 中值自适应滤波; 区域分割; 编码

中图分类号: TP751

干涉测量 (INSAR) 技术充分利用雷达数据的相位信息获取地面高程。由于雷达获取数据所具有的优越性 (全天候、大区域范围等), 使得 INSAR 技术受到越来越多的重视, 其中相位的精确解缠是 INSAR 中的关键问题之一。目前的解缠方法很多, 但很难说哪种方法具有绝对优势, 因此, 有时会根据不同的数据特点采取不同的解缠方法。本文提出的基于中值自适应滤波预处理、区域分割和编码的解缠方法, 是依据干涉条纹数据的特点进行解缠的一种方法。

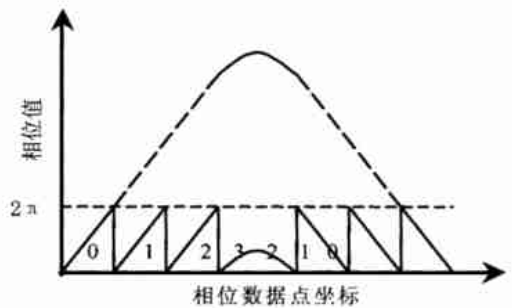


图1 一维条纹图

Fig. 1 Interferogram of One Dimension

从式(1)及图1条纹特点可以看出, 在同一个条纹图区域内 (即大小在 $0 \sim 2\pi$ 之间连续变化, 不存在大的跳跃区域), K 值是一致的。故只要能正确分割出这些条纹区域, 并确定各个区域的 K 值, 就可以正确完成解缠。

以图1的一维条纹数据为例。条纹可以分为7段, 每一段的 K 值是一致的。如果以左端为基准, 并且每一段中的 K 值累加, 则其 K 值分别为 0、1、2、3、2、1、0, 故相位结果为:

$$\phi = \Psi + 2K\pi$$

其中, Ψ 为待解缠的条纹数据值。这样, 最终的相位数据就是一个简单的累加计算。下面对二维数据进行讨论。

1.2 区域分割与编码

以上解缠方法的关键是进行区域分割, 并对每个区域进行编码, 而最后只是进行简单的累加计算。

1 解缠原理

1.1 一维相位解缠

一维的条纹数据 (如图1所示) 如同一座被折叠的山, 解缠的目的就是正确地重建这座山。图1中相位数据范围被调整到 $0 \sim 2\pi$, 其中实线代表未解缠相位值, 虚线代表解缠后的相位值。

图1所示的条纹数据是一种理想的条纹数据, 经过判断数据折叠的变化情况, 就可以很好地重建出结果。按从左到右的顺序进行扫描, 重建公式为:

$$\Phi = \Psi + \Delta\Psi + 2K\pi \quad (1)$$

当 $\Delta\Psi = -2\pi$ 时, $K = 1$, 同时 $\Delta\Psi = 0$; 当 $\Delta\Psi = 2\pi$ 时, $K = -1$, 同时 $\Delta\Psi = 0$; 其他, $K = 0$ 而 $\Delta\Psi$ 不变。式中, Ψ 表示未解缠的条纹数据; $\Delta\Psi = \Psi_{后} - \Psi_{前}$ 。其中, $\Psi_{前}$ 代表扫描方向上连续的两个相位数据点的前一个, $\Psi_{后}$ 代表后一个。

1.2.1 中值自适应滤波

本文根据数据本身的连贯性进行条纹区域的分割, 因此, 在同一区域内, 数据点越连续, 对分割越有利。这里采用平滑处理, 但是一般的平滑很容易使边缘模糊, 从而造成错误分割, 故可以采用一种保边缘的平滑算法——中值自适应滤波。这是一种有选择的平滑滤波, 能使得条纹数据内部得到很好的平滑, 而条纹边缘却能得到增强。

1.2.2 区域分割

目前, 图像处理中的区域分割方法很多, 它们都可以成为解缠中区域分割的依据, 这里以区域生长法为例。区域生长的步骤与一般的图像处理算法一致。需要说明的是, 进行区域生长时, 所采用的分割判据已经不是以聚类、灰度相似性或其他依靠简单统计的方法进行, 而必须依靠当前较小邻域内的相位数据连贯性进行。连贯性阈值一般取 $\pi/4 \sim \pi/2^{[1, 2]}$, 即数据变化大于阈值时, 表示不连续, 不进行生长。这样造成同一块条纹区域在相距一定距离的两点, 其相位数据的差值可以大于 $\pi/2$ 。

窗口取 5×5 为佳, 因为窗口太大不能保证小区域曲面的圆滑连续, 使得生长很难进行; 而窗口太小则受噪声的影响较大。此外, 必须采用四邻域, 而不是八邻域, 这可以保证单像素边缘两侧的条纹区域能被正确分割。



图 2 邻域关系

Fig. 2 Relation of the Pixels in the Small Window

1.2.3 编码

对同一区域进行编码, 即赋予统一的标记值。为了最后简单的累加计算, 这里不是简单的作一相同标记, 而是依据每一个生长区域的生长顺序和它们之间的关系进行编码。具体步骤如下。

1) 第一个生长区域的编码值为 0。依据上面的区域生长准则, 从某像点开始进行区域生长, 属于同一区域的像素赋予相同的编码值, 直到该区域完全被分割出来为止。

2) 进行另一区域的分割操作, 这个区域必须是已分割区域的相邻区域。这可以通过简单的判断加以实现。判断步骤分两方面: ①判断这个生长区域是否与已分割的区域相邻; ②判断并确定这个区域的编码值。依据相邻区域条纹边缘的变化情况, 判断条纹边缘是从 2π 变化到 0, 还是从 0 变化到 2π , 从而确定待分割区域的编码值是在已分割区域编码值上加 1 还是减 1。这里的变化以理想情况进行说明, 实际中, 应确定一定的阈值 T 来确认条纹边缘的变化情况。

3) 依此原则, 不断进行区域分割和编码, 便能得到一个只含整数的编码矩阵。

1.3 累加计算, 求解最终相位

将对对应像素的条纹数据加上 $2K\pi$, K 是对应的编码值, 结果即为最终的相位。

2 实验结果分析

2.1 模拟数据及其解缠结果

图 3 表示模拟的相位数据, 从右到左的数值范围为 $0 \sim 40.1920$; 图 4 表示由模拟的相位数据缠绕而成, 并加入随机块噪声。

图 5 是按上述方法进行区域分割并进行编码

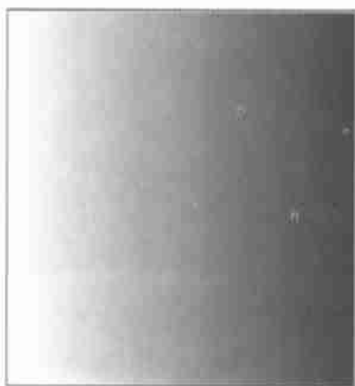


图 3 模拟的相位数据矩阵

Fig. 3 Simulative Unwrapped Phase Array

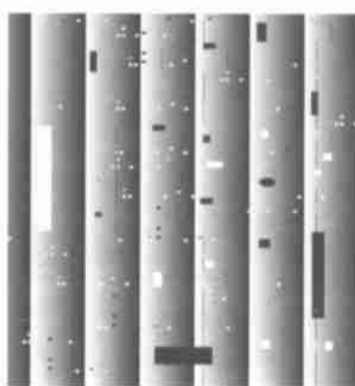


图 4 含噪声的条纹图

Fig. 4 Interferogram with Added Noise

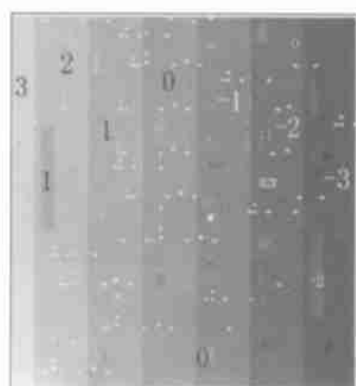


图 5 编码图

Fig. 5 Code Map of the Interferogram by the Mentioned Method

的结果。从左到右不同灰度区域的编码值为 3、2、1、0、-1、-2、-3, 其中, 左侧虚线方框区域内

的编码值为 1, 右侧虚线方框区域内的编码值为 -2。也就是说, 这些区域也一起分割了。实验说明, 这些区域参与解缠并不造成误差的传播, 说明该方法具有较强的抗噪能力, 这是由于区域生长时, 只要邻域连续性的判断阈值选取合适(一般不小于采样间隔, 但小于条纹边缘间的变化差值), 它就能抑制噪声, 并且生长的结果只是对应的编码值, 所以误差不会向下传播。

图 6 中, 经解缠后获取的数据范围为 -18.849 6~21.190 3, 经基准调整到最右边后, 数据范围为 0~40.039 9, 可见与原始相位数据相差不大。

图 7 显示的是原始相位数据矩阵与解缠结果矩阵的差值, 由于误差较小, 很难分辨出来, 故这里对每个灰度值均加上 100。

2.2 实际数据解缠

为了更好地进行区域分割, 这里引入中值自适应滤波, 对条纹数据预先进行滤波处理。处理的目的是为了使得条纹数据在同一条纹带内是平滑的, 而条纹之间的边缘却得到增强, 根据参考文献 [4] 可以很容易实现。实验证明, 该方法的引进对最终的相位解缠是有益的, 但经过滤波处理的条纹数据, 只是用于区域分割, 从而获得最终需要的编码矩阵, 而最终参与计算的相位数据还是原始的条纹数据, 这样就能尽量保留原有相位数据的正确数值, 免遭滤波时被破坏, 这是必要和合理的。如图 8~图 11 所示, 图 12 为解缠结果, 图 8、图 9 是参考数据。从以上结果可看出, 解缠过程

可以顺利、正确地完成, 并且能达到很好的稳定性。

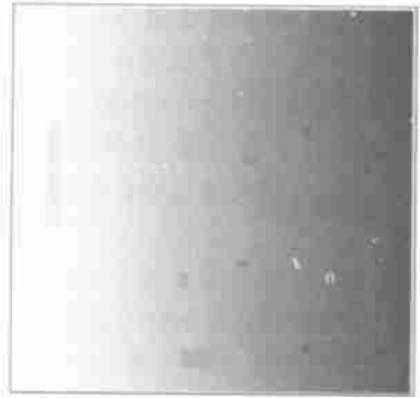


图 6 区域分割法的解缠结果
Fig. 6 Result by the Mentioned Method



图 7 误差图
Fig. 7 Error by the Mentioned Method

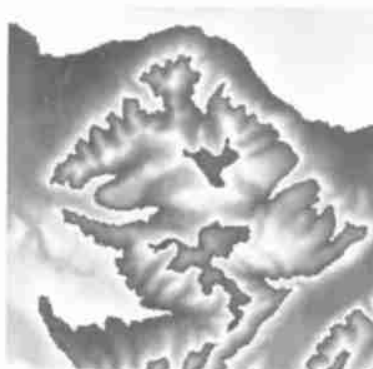


图 8 原始相位数据

图 9 对应条纹图

图 10 中值自适应滤波结果

Fig. 8 Array of Original Unwrapped Phase

Fig. 9 Interferogram of the Original Unwrapped Phase

Fig. 10 Result of Medium and Gradient-based Adaptive Filter

2.3 存在的问题

2.3.1 区域生长中阈值的确定

进行区域生长时, 四邻域连续性判断中所采用的阈值非常关键, 它关系到能否正确地分割出

不同条纹区域。进行局部数据变化梯度的统计来获取阈值是一种较好的方法。不过, 更好的方法还有待寻求。

2.3.2 条纹数据采样失真问题

当条纹数据出现采样失真(即该处现有的相位数据无法表示地形的细节变化)时,也有可能造成分割失败,即将原本属于两个不同的条纹区域分成了同一个区域。如图 13、图 14、图 15、图 16 所示,这里以区域增长法的解缠结果为参考^[2]。

如何解决这类问题将是今后所要完成的工作。

由于条纹图中存在三处采样失真(图 14 中虚线方框区域),使得区域 1、2 和 3 被错误地分割成同一区域(如图 15),因此最终的解缠结果如图 16 所示。图 17 是采用种子增长法进行解缠的正确结果。

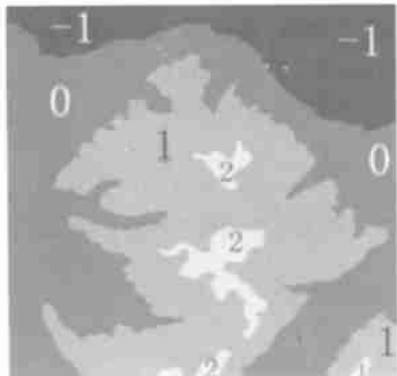


图 11 对应编码图

Fig. 1 Code Map of the Wrapped Phase by the Mentioned Method



图 12 解缠结果

Fig. 12 Result of the Wrapped Phase by the Mentioned Method



图 13 对应地形图

Fig. 13 Actual Terrain

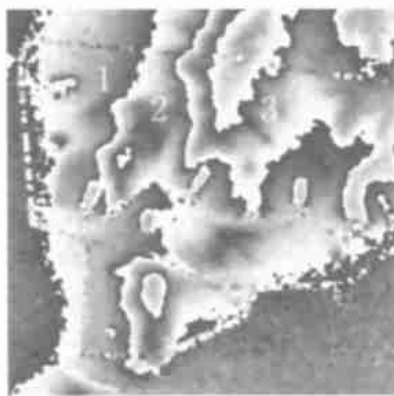


图 14 采样失真的条纹图

Fig. 14 Interferogram with Aliasing



图 15 错误的编码图

Fig. 15 Inaccurate Code Map by Error Segmentation



图 16 区域分割方法错误的解缠结果

Fig. 16 Inaccurate Result by Mentioned Method



图 17 种子生长法的正确解缠结果

Fig. 17 Result of Region Growth Method in Reference 2

3 结 论

本文方法具有简单、易于实现、速度快、抗噪能力强等特点,对于条纹数据无失真的相位数据较适合。不过,如果数据本身存在较严重的采样失真,则宜采用种子生长法等更可靠的解缠方法。

参 考 文 献

- 1 Goldstein R M, Zebker A, Werner L. Satellite Radar Interferometry: Two-dimensional Phase Unwrapping. *Radio Science*, 1998, 23(4): 713 ~ 720
- 2 Wei X, Cumming I. A Region-growing Algorithm for In-sar Phase Unwrapping. *IEEE Transactions on Geoscience*

and Remote Sensing, 1999, 37(1): 124 ~ 149

- 3 Soille P. Morphological Phase Unwrapping. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000(32): 339 ~ 352
- 4 廖明生. 由 INSAR 影像高精度自动生成干涉图的关键技术研究: [博士论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 2000
- 5 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996
- 6 刘健勤, 盛津芳, 魏敏洁. 面向智能体的视觉信息处理. 北京: 科学出版社, 2000
- 7 章毓晋. 图像处理和分析. 北京: 清华大学出版社, 2000

作者简介: 詹总谦, 硕士生. 研究方向为遥感图像处理和雷达干涉测量。

E-mail: zzq09@263.net

A Method of Phase Unwrapping Based on Region-segmentation and Encoding

ZHAN Zongqian¹ QIAN Jun¹ SHU Ning¹

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering Wuhan University,
129 Luoyu Road, Wuhan, China 430079)

Abstract: This paper describes an unwrapping phase method based on region-segmentation and coding. The algorithm can easily unwrap noisy interferograms, but it will meet some problems when the phase contains aliasing. In addition, in order to perform the calculation easily when finishing region-segmentation, a method of encoding has been proposed. The main steps are: ① Pre-treatment with the medium and gradient-based adaptive filter in order that the segmentation can be carried out correctly; ② The region-segmentation with the familiar algorithm; ③ Encoding the regions from the previous step; ④ Calculating the unwrapped phase by easy account.

To verify the proposed algorithm, the algorithm has been tested with simulative data and actual data.

Key words: interferometry; phase unwrapping; medium and gradient-based adaptive filter; region-segmentation; encoding

About the author: ZHAN Zongqian, postgraduate. He majors in remote sensing and INSAR.

E-mail: zzq09@263.net