

基于残点识别的环路积分校正 InSAR 相位展开方法

索志勇, 李真芳, 保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 本文对干涉 SAR 处理的关键步骤 相位展开 进行了讨论和分析, 提出了利用残点识别和环路积分校正的相位解缠绕方法. 进行了仿真和实测数据的处理, 验证了该方法的有效性, 最后给出了本文方法与分支截断法和区域增长法的结果比较, 并对几项性能指标进行了对比, 结果表明本文方法具有更好性能.

关键词: 相位展开; 环路积分; 分支截断法; 区域增长法; 残点; 干涉合成孔径雷达

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 06-0977-04

Modified Loop-Integration InSAR Phase Unwrapping Based on Residues Recognition

SUO Zhi yong, LI Zhen fang, BAO Zhen g

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Phase unwrapping the key step of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) signal processing is discussed, and a new method is proposed which is based on residues recognition and modified loop-integration. The validity of the new method is verified with the simulated and real data. Finally, a comparison of the processing results for the real data between the modified loop-integration, branch cut and region growing is presented, and a comparison of their performance is also given.

Key words: phase unwrapping; loop-integration; branch cut; region growing; residue; interferometric synthetic aperture radar (InSAR)

1 引言

干涉合成孔径雷达是利用两幅相干复 SAR 图像对应像素之间的相位信息来提取地面高度信息的一项技术. InSAR 的出现大大扩展了 SAR 的应用领域, 能够获取高精度的地形信息, 作为一种高精度、全天时、全天候的测量手段, 已引起广泛关注, 成为遥感研究的热点.

通常我们获得的干涉相位信息 ϕ 在 $(-p, p]$ 之间, 如何恢复模糊掉的 $2p$ 信息, 得到与数字高度图 (DEM) 相关的绝对相位, 即相位展开处理, 是干涉 SAR 处理最关键的步骤之一. 相位展开就是找回干涉相位中丢失的 $2n\pi$:

$$\Psi(i, j) = \Phi(i, j) + 2n(i, j)\pi \quad (1)$$

其中 $\Psi(i, j)$ 为缠绕相位, $\Phi(i, j)$ 为真实相位, $n(i, j)$ 为该点的相位模糊数, 相位展开的工作就是要恢复被模糊掉的 $2p$ 信息.

理想条件下恢复绝对干涉相位要满足两个条件: (a) 图像中各个像素点的相位有定义, 即复图像中的像素点的回波强度不为零. (b) 相邻像素间的相位差值必须在 $(-p, p]$ 之间. 如果这两个条件都满足, 则沿任意路径对所有相位值进行积分, 就可以得到绝对相位值, 整幅图像只相差一个常数. 但是, 在实际情况中, 由于相位中的噪声以及地形欠采样、图像折叠 (layover) 和阴影 (shadow) 引起的干涉相位与真实地形干涉相位不一致的现象, 即残差现象, 使得缠绕相位值不再满足以上两个条件. 残点的产生, 使得相位展开结果与积分路径的选择有关, 这可以由留数定理予以解释. 残点会导致误差的传递和积累, 从而引起相位值的突变, 使展开相位不能反映真实的地形信息. 残点是影响相位展开的根本问题, 各种相位展开算法实际都是在处理残点.

相位展开有路径跟踪和最小范数两大类方法. 本文对

Goldstein 提出的分支截断法^[1] (branchcut) 及 Xu 和 Cumming 提出的区域增长法^[2] (regiongrowing) 进行了分析和讨论, 并提出使用环路积分校正进行相位展开, 用仿真数据和实测数据对算法进行了验证, 获得了比较好的结果。

2 经典路径跟踪类算法

2.1 分支截断法

分支截断法是一种经典的路径跟踪 (path-following method) 类相位展开算法, 其基本步骤如下:

第一步: 识别相位图中的残点;

第二步: 生成分支线;

第三步: 沿不穿过分支线的路径积分。

该方法计算速度快, 效率高, 能有效的防止误差的传递。但当分支线设置不正确时, 会造成展开相位错误的 2π 跳跃。当噪声影响严重时, 分支线的连接错误几乎不可避免, 从而形成误差的传递。分支线连接的运算量也极为可观, 对于 n 个残点需尝试 $n(n-1)/2$ 次才能得到总长度最短的分支。此外, 分支截断法在残点密集区很容易形成封闭的区域, 使相位不能展开。分支截断法在连接分支时, 从不同的起始点出发会得到不同的分支连接结果, 因而解缠绕相位的结果也不相同, 因此分支截断法的最大问题就是如何将残点最合适的连接成分支。在分支线的两侧, 展开相位会出现局部区域的 2π 跳变。在文献[3]中, 引入了偶极子对残点对消技术^[4]和统一接地处理, 减少了分支连接错误的概率, 提高了噪声环境下算法的稳定性, 大大改善了相位解缠绕的结果。当分支线的连接完成后, 相位展开就可以沿着任何不穿过分支线的路径进行积分。

2.2 区域增长法

区域增长法是 Xu 和 Cumming 于 1999 年提出的一种基于路径跟踪类的算法, 其基本步骤如下:

第一步: 选择种子点;

第二步: 依照可信度检测解缠绕, 利用尽可能多的信息;

第三步: 区域融合。

它利用尽可能多方向的信息来预测要解缠绕的像素点的展开相位值, 降低了单个方向的预测误差; 使用可信度评价, 可信度评价原则对相位展开结果有较大的影响。在使用多个种子生长的时候, 必须进行区域融合。区域个数和区域融合时进行的判断次数之间关系是 $C_m^2 = m * (m-1)/2$ 次, m 是区域个数, 此时通不过可信度检测的点将被丢掉, 从而使部分像素得不到展开相位值, 且运算量庞大。区域增长法关键是需要一个好的质量图来指导路径的选择。区域增长法在残点比较密集的区域, 也会不可避免的引起展开相位的 2π 跳跃。

3 环路积分校正方法

由于残点是由噪声和干扰等引起的干涉相位突变现

象, 我们使用四点环路积分值来判断残点的存在与否, 在残点判断时, 并不能确定环路积分值不为零是由四个像素中的哪个像素相位变化引起的, 可以看下面的例子, 箭头交汇处为像素干涉相位值, 横线上的值为相位差值 (即梯度值), 数字的单位为 π 。

图 1 左边为理想情况, 其四点环路积分值为: $0.75 + 0 + (-0.75) + 0 = 0$; 右边为非理想情况, 假设四个点中其第二个像素由于噪声或者其他原因引起 $\pi/2$ 的相位跳变, 括弧内为折叠到 $(-\pi, \pi]$ 之间的相位值, 括弧外为真实相位值或真实相位差值。实际中我们得到的是括弧内的值, 可以看到, 其四点环路积分值为: $(-0.75) + (-0.5) + (-0.75) + 0 = -2$ 。起始点的相位发生了 2π 跳变, 假如将左上像素设为残点, 将导致误差在解缠绕中的传播。所以作者认为: 将组成残点的四个像素中的左上角像素设为残点是不严格的, 本文建议将四点环路积分不为零的中心设为残点比较合适。在路径积分过程中对这样的四个点可先不进行处理, 完成整个图像的扫描后, 再利用周围解开点的相位信息, 展开“残点”, 将误差限制在最小范围。

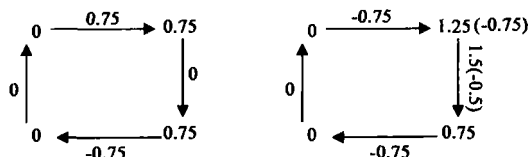


图 1 相位跳变引起的残点示意图

下面, 介绍本文所使用的方法:

第一步: 利用四点环路积分来判断残点, 当环路积分不为零时, 对当前环路设定标记。

第二步: 根据环路标识矩阵, 将干涉相位图中的四个像素都标记为残点。这些像素点在解缠绕过程中先不进行处理, 以防止误差在相位解缠绕时的传播。

第三步: 给定解缠绕初始点和展开像素的标记矩阵, 并在标记矩阵中对应位置标记初始点。在每一个环路积分的像素中, 至少有两个像素点被展开。其中一个像素用作解缠绕的参考像素, 另一个像素用作判断此次解缠绕值是否正确, 称之为校正像素。如果用作判断的像素点 (即校正像素) 的值与此次环路积分结果一致, 再利用周围像素判断已解开像素的相位值是否有大于 π 的相位跳变, 如果没有跳变, 则保留此次环路积分相位展开的结果, 对展开像素在标记矩阵对应位置设定标记, 如果校正像素当前展开值与已有展开值不同, 则此次相位展开结果不保留, 此次没有解开的像素尝试利用其他路径进行解缠绕, 继续进行下一次操作。

第四步: 下一次解缠绕在上一次的边界上进行, 此边界实际上是所有已展开像素标记区域边缘像素的一个集合。边界的求取方法是对相位展开像素标记矩阵使用腐蚀运算, 腐蚀算子为 3×3 的方形窗, 然后与腐蚀前展开像素的标记矩阵进行异或操作, 即可得下一次解缠绕的边界。

接下来的相位展开操作在已经解开的像素点的八邻域内进行。在展开过程中, 必须确保每次四像素环路中至少有两个像素被展开, 而且在环路积分的四个像素中不包括标记的残点像素。对当前边界上所有满足要求的环路进行展开操作, 并在标记矩阵中标记已展开像素后, 重复执行第四步操作, 直到整幅图像中所有满足展开要求的环路都被处理到为止。解缠绕完成。

该方法非常简单, 不用连接分支线, 避免了分支截断法中分支连接的巨大开销。对于相位噪声比较严重, 残点比较密集的地方, 可以在小区域内单独进行处理, 以避免误差在全局展开中的传播。小区域处理时利用区域周围已经展开像素的相位值作为参考, 提高了相位图像的连续性。

4 仿真数据和实测数据的处理结果及分析

4.1 对仿真数据进行处理

仿真数据采用统计模型产生, 其统计特性接近真实地形, 仿真数据的干涉条纹如图 2(a) 所示。图 2(b) 为分支截断法相位展开结果, 图 2(c) 为区域增长法展开结果, 图 2(d) 为利用本文方法的展开结果。从图像的整体连续性上看环路校正法要比分支截断法和区域增长法要好。从后面的分析可以看出, 虽然分支截断法对仿真数据展开区域较多, 但其相位跳变像素点数目要多的多。环路校正法虽然在残点密集的区域也有部分相位展开的“盲区”, 但是由于残点过于密集, 我们标记的残点矩阵阻断了相位展开的进行, 即这些区域不满足一个环路中有两个以上像素的相位是已展开的, 可以看到误差并没有传播到整个图像, 而仅仅局限于残点区(实际上是仿真数据中地形变化剧烈的地方)。没有展开的区域可以通过插值得到。

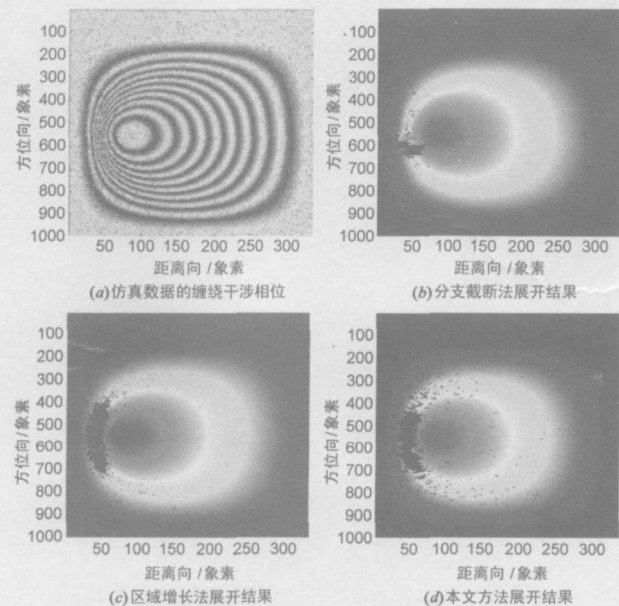


图 2 仿真数据实验结果

4.2 对实际数据进行处理

实际数据使用意大利 etna 火山口数据, 我们根据 SAR 图像选取火山口附近地形变化比较剧烈的图像(图 3(a)) 进行处理, 缠绕干涉相位图(图 3(b)) 的条纹很密集, 从残点分布图(图 3(c)) 上可以看到有两部分残点比较密集, 从而可以充分验证算法的可行性和有效性。将分支截断法和区域增长法对此数据的处理结果也一并给出, 进行比较。图 3(d) 中的深色区域为分支线连接形成的封闭区域, 相位展开不能进行, 图 3(d) 中部箭头指向处以及在残点密集区域, 由于分支线的设置不正确, 有一块很明显的相位跳变区域, 还有若干比较小的相位跳变区域; 图 3(e) 中的箭头所指为相位跳变处, 没有解开的区域为相干系数很小的部分, 深色点为没有通过可信度检测而没有解开的点; 图 3(f) 中箭头所指为没有解开的区域, 深色点为标记的残点; 在图 3(d) 和(f) 的对比中, (f) 的相位展开区域比(d) 明显增多, 而且保持了较好的相位连续性, (d) 图像中央以及残点密集区都出现了相位跳变区域, 产生了相位不连续现象; 在图 3(e) 中箭头所指区域相位差有 2π 整数倍的相位跳跃。可见, 本文方法获得了比区域增长法更好的连续性。图 3(f) 左上角没有解开的区域及经识别没有处理的残点, 可以通过周围值插值得, 限于篇幅, 本文不再给出结果。

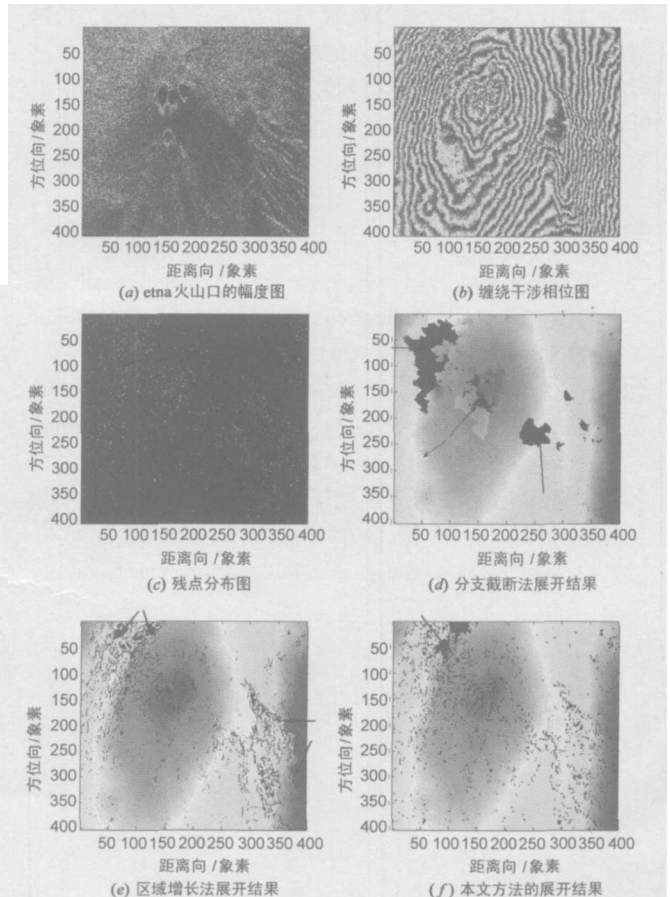


图 3 实测数据处理结果

4.3 性能分析和对比

从前面的实验结果可以明显看出, 环路校正法在保持

展开相位连续性方面有较好的性能, 下面我们从另外的角度来分析文中所述三种方法的优劣.

表 1 有关性能指标的对比

性能指标 展开方法	展开运算时间(时:分:秒)		存贮量(MB)		与真实相位方差		展开相位跳变点数目	
	仿真	实测	仿真	实测	仿真	实测	仿真	实测
分支截断法	1:30:37	0:40:26	9.81	20.51	1.4024	—	41437	—
区域增长法	10:59:44	5:09:16	9.43	19.40	0.3729	—	31417	—
本文方法	0:21:36	0:10:19	5.93	12.50	0.2405	—	23809	—

从上表可以看出, 在展开时间、存贮量、与真实相位的方差以及展开相位跳变点的数目方面, 环路校正法有更好的性能. 在计算量方面, 除去相位展开相同的加法运算外, 分支法需要额外执行 $n(n-1)$ 次乘法运算, n 为残点数, 区域增长法展开一个像素就需要 $(2k+2)$ 次乘法, k 为当前像素周围已展开像素个数, 这也是本文方法在运算时间上具有优势的原因.

5 结论

本文通过残点识别, 将环路积分不为零的四个像素都标记为残点, 使用环路校正法进行相位展开, 通过与分支截断法和区域增长法的比较以及所述算法的性能指标分析, 可以看出, 在部分区域环路校正法获得了比前述两种展开方法更好的结果和更好的相位连续性, 而且图像的整体连续性也较好, 仿真数据和实测数据的处理结果验证了本文方法的可行性和有效性, 也说明了本文方法在处理具有很多残点的实际数据时具有更大的优势.

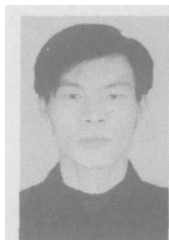
参考文献:

- [1] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: two dimensional phase unwrapping[J]. Radio Sci, 1988, 23(4): 713- 720.
- [2] Wei Xu, Ian Cumming. A region-growing algorithm for inSAR phase unwrapping[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1999, 37(1): 124- 134.
- [3] 李笑郁, 毛士艺. 分支阻断干涉 SAR 相位展开算法的解析与实现. 电子学报, 2001, 29(12): 1790- 1793.
LI Xiaoyu, MAO Shiyi. Analysis and implementation of

branch cut phase unwrapping algorithm for interferometric SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12): 1790- 1793. (in Chinese)

- [4] Huntley J M. Noise immune phase unwrapping algorithm [J]. Applied Optics 1989, 28(15): 3268- 3270.

作者简介:



索志勇 男, 1979 年 6 月出生于河北省石家庄市. 现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室硕博连读研究生. 主要研究方向: 合成孔径雷达信号处理.
E-mail: suozhiyongxa@sina.com



李真芳 男, 1977 年 11 月出生于山东省寿光市. 1999 年本科毕业于西安电子科技大学. 同年免试推荐为该校雷达信号处理重点实验室硕博连读生. 主要研究方向: 地面动目标检测(GMTI)和合成孔径雷达成像(SAR).
E-mail: lzf@xidian.edu.cn



保 铮 男, 1927 年出生于江苏省南通市. 现为中国科学院院士, 中国电子学会会士. 研究领域为雷达信号处理及现代雷达信号处理等.