

一种新的相位展开算法——最近相邻点连接算法

李绍恩 向茂生 吴一戎

(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室 北京 100080)

摘要: 该文提出了一种新的相位展开算法——最近相邻点连接 (Nearest Point Linking, NPL) 算法, 该算法是在 Goldstein 算法相位展开的基础上, 通过事先连接距离最近的、极性相反的残余点, 降低残余点的密度, 再使用 Goldstein 的残余点连接方法连接剩余的残余点, 从而达到了很好的残余点连接效果。实验结果验证了在高密度残余点情况下此算法的有效性。

关键词: SAR 干涉, 相位展开, 残余点, 最近相邻点

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)02-0266-03

A New Phase Unwrapping Algorithm—Nearest Point Linking

Li Shao-en Xiang Mao-sheng Wu Yi-rong

(National Key Lab. of Microwave Imaging Technology, The Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract A new unwrapping algorithm—Nearest Point Linking (NPL) algorithm is presented based on the Goldstein algorithm. It decreases the residue number by smoothing the couple residues in nearest distance. Then, the Goldstein algorithm is applied to link the other residues. As a result, a good solution is achieved. The experiment shows the validation of the algorithm in high-density residue condition.

Key words SAR interference, Phase unwrapping, Residue, Nearest Point Linking (NPL)

1 引言

Goldstein 算法^[1]是 JPL 实验室的 Goldstein 等人于 1988 年提出的相位展开算法, 此算法直接从相位入手进行相位展开。这种算法首先识别出二维相位图像上的相位不连续点, 然后用最短的分支将正残余点和负残余点连接起来, 在相位展开积分中, 积分路径不能穿过此分支, 从而限制误差的传播。

当然在积分路径另一侧的像素点不可避免地存在相位不连续现象, 因而在选择积分路径时应使所选分支的总长度最短, 从而使相位总的不连续性影响最小。分支截断法的具体算法如下: 在干涉相位图上扫描, 直到找到一个残余点。然后以该残余点为中心, 在大小为 3×3 的窗口内搜寻另一个残余点; 如果搜索到另一个残余点, 在两者之间用一条分支将它们连接起来; 如果搜索到的残余点是异号的, 那么该分支被标记为 uncharged 分支, 然后继续搜索; 如果搜索到的残余点是同号的, 那么搜索窗口将移到新的残余点, 继续进行搜索, 直到找到一个异号的残余点, 使整条分支为 uncharged; 如果搜索窗口内没有新的残余点, 那么将搜索窗口的大小增大 2, 重复以上搜索步骤; 将所有的残余点都连

接为 uncharged 后, 就可以在两个方向绕过分支进行梯度积分, 并得到最终的相位展开结果。这种算法计算速度非常快, 特别是残余点比较稀少的地区, 残余点可以以明显的方式被连接。但残余点密度高时, 由于大量残余点被分支连接, 可能造成部分区域被隔离, 在隔离区内的点无法展开。在展开结果中表现为斑块。

针对 Goldstein 算法的这一弱点, 本文提出一种新的算法, 最近相邻点连接 (Nearest Point Linking, NPL) 算法。第 2 节是此算法的算法原理。之后, 通过展开机载干涉 SAR 的干涉数据做实验表明, NPL 算法可以很好地解决 Goldstein 算法在高密度噪声区相位展开失败的问题。

2 NPL 算法原理

由于图像噪声的主要成分是高斯噪声, 在高密度噪声区, 绝大部分的残余点正负极性是相反的。因此只要将这些极性匹配的残余点连接起来, 就相当于将这些残余点“抹去”一样。其结果就是“抹去”了大部分的残余点, 剩下低密度的少量残余点, 就可以使用 Goldstein 等方法将之连接在一起。具体过程如下:

(1) 计算残余点 按照下列残余点计算公式：

$$\begin{aligned} \psi_1 &= W(x_{i,j} - x_{i+1,j}), & \psi_2 &= W(x_{i+1,j} - x_{i+1,j+1}) \\ \psi_3 &= W(x_{i+1,j+1} - x_{i+1,j}), & \psi_4 &= W(x_{i+1,j} - x_{i,j}) \\ R &= \psi_1 + \psi_2 + \psi_3 + \psi_4 \end{aligned}$$

如果 $R > 0$ ，则为正残余点（用白点表示）； $R < 0$ ，则为负残余点（用黑点表示），得到如图 1 所示的残余点分布示意图。

(2) 连接残余点 分为两步：第一步，先连接距离 $\leq n$ ($n \geq 1$) 的极性相反的残余点， n 的值可以根据残余点的分布情况确定（与残余点密度有关，随密度增大适当增大）。得到的结果如图 2 实线所示；第二步，对剩余的残余点使用以上所述的 Goldstein 连接方法进行连接，得到的结果如图 2 虚线所示。至此，残余点连接完毕。

(3) 相位展开 采用 FloodFill 算法进行展开，展开后对残余点区域进行插值处理^[1]。FloodFill 算法过程如下：

(a) 选择一个既不是残余点、又不是残余点连线经过的点作为起始点，并将它标示为展开点，以它为基准展开它周围的点，将既不是残余点、又不是残余点连线经过的点标示为展开点，并将这些展开点加入到一个展开队列中；

(b) 如果展开队列为空，则展开完毕，退出程序；如果展开队列非空，则从中取出一点，以它为基准展开它周围的点。展开之后将这些展开点中既不是残余点，又不是残余点连线经过的点，也不是已展开点的点加入到展开队列中；

(c) 重复 (b) 直到展开队列为空。

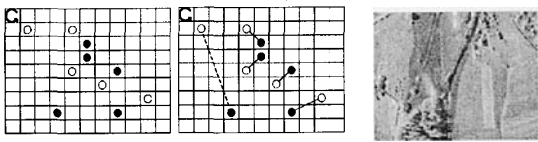


图 1 残余点分布示意图 图 2 连接残余点 图 3 展开地区的影像图

3 实验结果

实验数据采用机载干涉 SAR 数据，相位图像大小为 1024×1024 ，展开地区的影像图如图 3 所示。相位数据分别为：原始配准数据， 3×3 多视^[2]数据， 5×5 多视数据， 7×7 多视数据。展开算法采用 Goldstein 法和 NPL 法。

由图 4~图 6 的结果可以看到，对于没有滤波的原始相位数据，Goldstein 法展开完全失败，而 NPL 法则可以顺利展开相位。

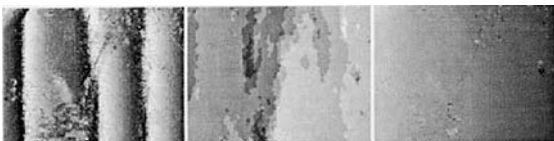


图 4 原始数据 图 5 Goldstein 展开结果 图 6 NPL 展开结果

由图 7~图 9 的结果可以看出，经过 3×3 多视滤波后，情况有所好转，但 Goldstein 法仍然不能正确展开全图，而 NPL 则没有问题。



图 7 3×3 多视数据 图 8 Goldstein 展开结果 图 9 NPL 展开结果

由图 10~图 12 的结果可以看出，经过 5×5 多视滤波，Goldstein 已经能够展开全图，只是在个别地区出现错误，而 NPL 法可以很好地处理这些地区。



图 10 5×5 多视数据 图 11 Goldstein 展开结果 图 12 NPL 展开结果

由图 13~图 15 的结果可以看出，经过 7×7 多视滤波，Goldstein 法和 NPL 法的差距已不太明显。



图 13 7×7 多视数据 图 14 Goldstein 展开结果 图 15 NPL 展开结果

从以上结果可以看出，NPL 法在高密度残余点地区可以代替 Goldstein 法。表 1 是相位展开所需的时间。

表 1 不同方法相位展开所需的时间 (s)

	Goldstein 法	NPL 法
原始数据	<2	<3
3×3 多视数据	<2	<3
5×5 多视数据	<2	<3
7×7 多视数据	<2	<3

NPL 法比 Goldstein 法展开需要的时间要长一点，这是因为首先连接距离近的残余点对，即相当于“抹点”，然后再使用 Goldstein 法连接的缘故；NPL 法比 Goldstein 法连接所需的时间并没有增加多少，以如此小的时间损耗为代价获得可靠的展开性能还是很值得的。

4 NPL 法的局限性

与其它算法一样，NPL 法也有它自己的局限性。如图 16 所示的残余点分布，使用 NPL 法的连接结果如图 17 所示，而直接使用 Goldstein 连接方法，则可以得到如图 18 所示的结果。

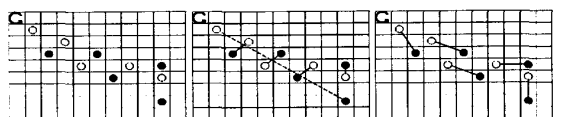


图 16 残余点分布 图 17 NPL 法连接结果 图 18 Goldstein 法连接结果

显然后一种连接结果比前一种合理。所以, NPL 算法只是一种局部最优的连接算法, 并不是全局最优。图 17 的连接结果只是在相关性极差的地区可能出现。

NPL 法最重要的不是先采用什么具体的算法, 而是一种处理思想。因为到目前为止, 还没有能够适用于所有情况的相位展开算法, 所以, 我们可以在连接残余点时分步进行, 应用各种算法的长处, 从而达到最好的残余点连接效果。

5 结论

Goldstein 算法是一种计算方法简单, 执行速度很快的相位展开算法, 常在其它展开方法之前进行使用以了解展开地区的特性。但该方法在高密度残余点地区的性能不好, 影响了它的使用范围。NPL 算法正是针对 Goldstein 算法的这一缺点, 首先将高密度残余点地区去掉, 使之符合 Goldstein 算法的使用条件, 再利用 Goldstein 算法执行速度快的特性展开数据。

实验结果正如 NPL 法的设计初衷, 它很好地解决了 Goldstein 法在高密度残余点地区展开失败的问题, 增强了分支截断法的应用范围。

实验所用的计算机配置为 PIII 666M, 内存 256M。3D-DEM 图像生成算法由尤红建提供^[3]。

参考文献

- [1] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Sci.*, 1988, 23(4): 713 - 720.
- [2] Ghiglia D C, Pritt M D. Two-Dimensional Phase Unwrapping, Theory, Algorithms, and Software. New York: A Wiley-Interscience Publication, JOHN WILEY & SONS, INC. 1998: 103 - 121.
- [3] 尤红建, 刘彤, 苏林, 刘少创, 郭冠军, 李树楷. 城市 DSM 的快速获取及三维显示的研究. *遥感学报*, 2001, 5(1): 8 - 12.

- 李绍恩: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为信号与信息处理。
向茂生: 男, 1964 年生, 研究员, 研究方向为干涉合成孔径雷达技术方面的研究。
吴一戎: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为信号与信息处理。