一种二维INSAR解相位模糊方法研究*

张晓玲** 王建国 黄顺吉
（电子科技大学自动化系，电子工程系 成都 610054）

【摘要】 解相位模糊问题是干涉SAR成像处理中最关键的问题之一，它直接影响成像高度的精度。文中结合递推估计方法，给出了一种解相位模糊方法。其过程是根据给定的初始相位数据或邻近的已解模糊的相位值通过递推估计来获取相位估值，再经过可信度的检测来保证相位估值的可靠性。模拟实验后的实验结果表明该方法是有效的，并它成功地恢复了相位所丢失的$2n\pi$分量，其相位值与模拟的真实值比较，相对误差也很小。

关 键 词 合成孔径雷达； 干涉； 解相位模糊； 模拟实验
中图分类号 TN959.1

InSAR（Interferometric SAR）成像处理是目前SAR领域的研究热点之一，其成像原理是利用星载SAR平行双轨道系统(或机载双天线系统)在同一场景得到的两幅复图像进行干涉，提取干涉相位。干涉相位反应了地面高度信息，只要经过相位解模糊、高度换算等过程，则可得到地形高度图。

由于从信号中只能获得干涉相位的主值(0，2π)，丢失了$2n\pi$的相位信息，为了获得真实的数字地形高度图，必须通过解相位模糊恢复实际相位。解相位模糊是InSAR成像处理中最关键的问题之一，其质量高低直接影响地形高度图的精度。理论上，只要通过对干涉相位积分，在发生2π跳变的地方将2π加到相应的干涉相位值上就能解模糊。但实际上，由于干涉相位图不可避免地存在噪声影响，使确定跳变的地方变得困难，容易引入误差，该误差会传播给整个图像引起全局误差，从而影响全局解相位模糊的正确性。所以，成像高度的精度直接受相位精度的影响，文献[1~6]都对相位解模糊问题作了研究。本文给出了一种解相位模糊的方法，该方法是根据已知的可靠相位数据作为起始条件，通过递推来解开一区域的相位。在对每个像素进行解相位模糊时，只有通过可信度检测的相位值才能被接收，否则终止对该像素的运算。可信度的测试是以相邻像素点之间的连续性为依据的，即两个相邻像素点的干涉相位差必须在[-π，π]内。最后，为验证该方法的有效性，我们模拟了加有随机噪声的干涉相位图，利用该方法成功实现了相位解模糊。

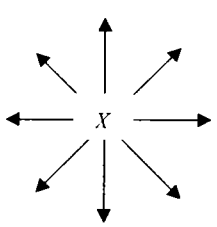


图1 像素点的八个邻域

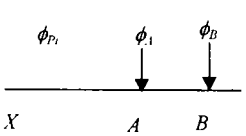


图2 邻近象素点的示意图

1 解相位模糊方法

在该方法中，解相位模糊过程是以一些初始值开始的，通常选择一些相位值已知的像素点作为起始点，然后从这些像素点的相位开始递推。

1.1 由邻近的已知像素点求解相位

对于每个像素点，其周围有8个方向的邻近点，如图1所示。假设在其周围有N个方向上的邻近像素点的相位是已解模糊(至少有一个邻近点是已解模糊)，则该像素点的预测相位就是建立在这些邻近像素点相位的基础上。设A、B是一像素点X的周围某方向上的邻近像素点，ϕ_A、ϕ_B分别是其对应的相位值，如图2所示。

在该方向上的相位预测值ϕ_{P_i}与ϕ_A和ϕ_B有关，且满足以下关系：

1）若A、B两点相位均已解模糊，则

1998年8月28日收稿，1998年9月24日修改定稿
* 电子部预研基金资助项目
** 女 34岁 在职博士生 讲师

$$\phi_{P_i} = \phi_A + \Delta\phi$$

其中

$$\Delta\phi = \phi_A - \phi_B$$

2）若 A 点相位已解模糊，而 B 点相位未解，则

$$\phi_{P_i} = \phi_A$$

3）若 A 点相位未解，不论 B 点相位是否已解，则

$$\phi_{P_i} = 0$$

同理，可求出该像素点其他方向上的预测值，则平均值 ϕ_P 由下式求出

$$\phi_P = \sum_{i=1}^{N} W_i \phi_{P_i} \Big/ \sum_{i=1}^{N} w \tag{1}$$

其中　加权系数 W_i 根据上述两种情况取值，即 W_i=1，W_i=0.5，W_i=0。

2.2　ϕ_p 可信度的检测

如果由邻近点获得的这些 ϕ_{P_i} 值比较一致，就可以认为邻近相位值的可信度较高。可信度的测量值由下式给出

$$d_p = \sum_{i=1}^{N} W_i \,|\phi_{P_i} - \phi_P| \Big/ \sum_{i=1}^{N} W_i \tag{2}$$

式中　加权系数 W_i 取值与前面相同。

如果 d_p 的值小于给定的门限值 M_1，那么相位预测值 ϕ_P 可信，否则认为该像素点暂时不能解，暂搁置并作标记。

2.3　由 ϕ_p 估计真实相位 ϕ_T

在经过可信度的检测后，可用下式求真实相位 ϕ_T

$$\phi_T = \phi_W + 2n\pi \tag{3}$$

式中　ϕ_W 是模糊的实测相位，其值的范围在（0，2π）内。n 由下式确定

$$n = [\frac{\phi_P - \phi_W}{2\pi}] \tag{4}$$

式中　[…]表示取最邻近的整数值，由此可恢复 $2n\pi$ 分量。

2.4　ϕ_p 可信度的检测

恢复的真实相位 ϕ_T，其可信度由下式给出

$$d_u = |\phi_T - \phi_P| \tag{5}$$

如果 d_u 的值小于给定的门限值 M_2，那么求得的 ϕ_T 可信，且是对应像素点的解模糊相位值，否则该像素点暂时不能解，暂搁置并作标记。

在整个区域的相位解模糊进行完后，对于那些暂搁置未解的像素点可通过另外的方法来求解(比如一个奇异点可通过其周围 8 个方向的相邻相位值来预测)，这样可避免仅一次递推计算失败就将该点置为坏点。尤其对于地形变化陡峭或像素点靠近顶底位移的区域，就显得更为重要。

在上述方法中，门限值的选择很重要，合适的门限值能有效的抑制误差的传递。在整个解相位模糊过程中，门限值按先紧后松的原则进行。即在开始门限选择时严格些，以保证可以获得更可靠的相位值，随着递推的进行，门限值则应适当放松，以保证更多的像素点能被解。对于未解模糊的像素点，其相位值可通过邻近的已解模糊的像素点来改善，或采用其他的滤波方法来改善。

2　模拟实验及结果

为验证该方法的有效性，我们进行了模拟实验。利用计算机模拟了相位干涉图，图中加有从 0～π 之间变化的均匀随机噪声，如图 3 所示。图中灰度值 0 对应 0°，灰度值 255 对应 2π，并设定图中的前几行和前几列的相位已解（无模糊），以此作为起始相位。图 4 是图 3 的某一横向剖面图(图中 ϕ 为相位值，m 表示像素点数)，由图中可看出，由于噪声的影响，使 2π～0 的跃变点难以确定，不能用一般的积分法解相位模糊。利用上述解相位模糊方法，获得了解模糊后的相位值，图 5 是解相位模糊后沿距离向的

某横向剖面图。与图 2 比较，可看出 $2m\pi$分量得以恢复。该方法的门限 M_1, M_2 的选取很重要，根据相邻两像素点之间的相位差在$\pm\pi$内的条件，为保证获得可靠的预测值，则门限值 M_1, M_2 最大不能超过π且按先严后松的原则取值。门限也不能太小，否则过多的像素点被排斥在外导致解相位模糊的失败。所以门限的选择，对结果影响比较大。图 5 中存在一些奇异点，图 6 则是对这些奇异点经过中值滤波及平滑后获得的解模糊相位图。为验证所得的相位的正确性，我们将解模糊后的相位图与真实的相位图（见图 7）进行比较。由图 6 和图 7 看出，实际恢复的相位与理想相位的趋势相同（即斜率相等），而且图 6 与图 7b 的相位值之间的相对误差小于 0.4, 所以恢复了丢失的 $2m\pi$分量，因此利用上述方法解相位模糊是成功的，而且合理的选择门限能有效抑制相位误差的传递。但图 6 和图 7b 相比可看出，该方法不能有效去除叠加在相位上的均匀随机噪声。

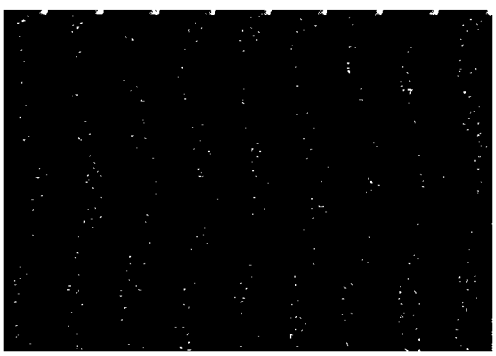


图 3 加有噪声的模拟干涉相位图(450×450 个像素点)

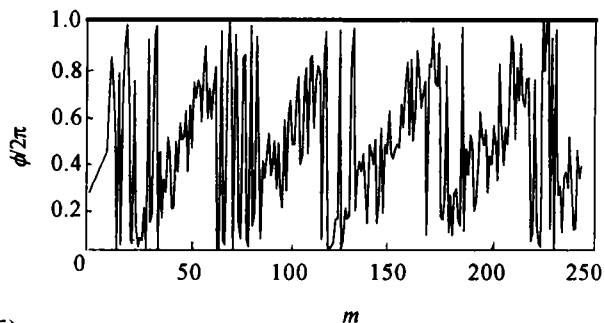


图 4 未解模糊的相位图

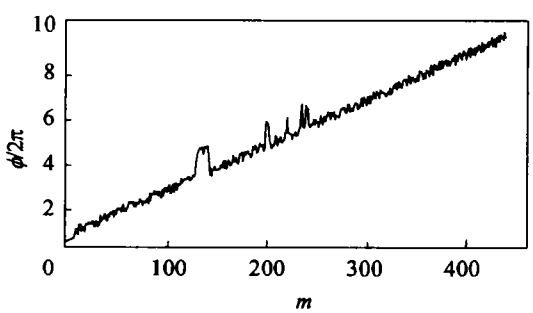


图 5 解模糊后的相位图

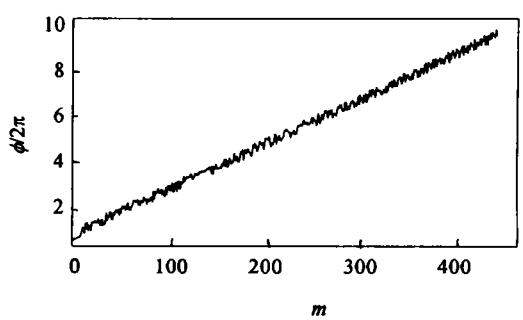
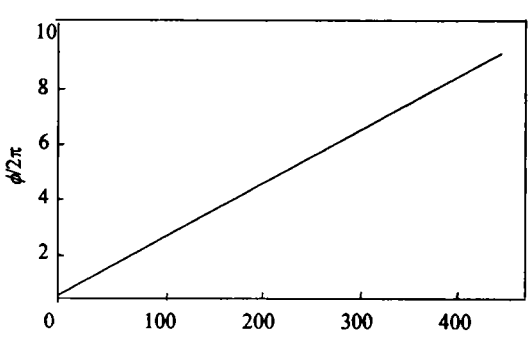
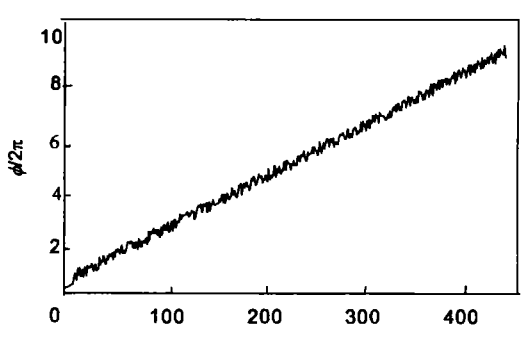


图 6 滤波后的解模糊相位图



（a）未加噪声



（b）加有噪声

图 7 真实相位图

3 结 论

通过上述模拟计算表明，该方法对于解相位模糊是很成功的。尽管模拟的是线条形的干涉图，但对于环形的干涉图，只要给定该区域周围的初始相位值，就可利用该方法恢复整个区域的相位，而且效果会更好。该方法的关键是门限值的选择，只有通过合适的门限抑制误差传递来保证相位的正确性。该方法对于较小区域的解相位模糊效果好，但对于较大的区域，由于误差的传递可能会导致解相位模糊的失败。目前我们仅利用模拟数据验证了该方法，下一步将利用卫星实测数据进一步验证该方法的实效性。

参 考 文 献

1 Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping. Radio Science, 1988, 23: 713~720

2 Lin Q, Vesecky J F, Zebker H A. New approaches in interferometric SAR data processing. IEEE Trans on Geosci Remote Sensing, 1992, 30: 560~567

3 Fornaro G, Franceschetti G, Lanari R. Two-dimensional phase unwrapping based on the Laplace and Eikonal equations. Proc IGARSS'95, 1995, 3: 1 828~1 830

4 Fornaro G, Franceschetti G, Lanari R. A new efficient solution for DEM generation in interferometric SAR processing. European Conference on Synthetic Aperture Radar(EUSAR'96), Germany, 1996: 195~198

5 Pritt M D, Shipman J S. Least-squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's. IEEE Trans Geosci Remote Sensing,1994, 32: 706~708

6 赵志钦，王建国，黄顺吉. 一种新的干涉 SAR 解相位模糊方法. 电子科技大学学报. 1998, 27(3):225~230

A Method of Two-dimensional Phase Unwrapping for Interferometric SAR

Zhang Xiaoling　　Wang Jianguo　　Huang Shunji

(Dept.of Automation,Dept. of Elect Eng., UEST of China　Chengdu　610054)

Abstract　Phase unwrapping of the interferometric SAR is a very important step to obtain an accurate DEM (Digital Elevation Model). By using a recurrence estimating method, this paper describes a kind of method for phase unwrapping of INSAR. Starting from given initial phase values or adjacent unwrapped phase, the phase estimation values are sequentially obtained by the recurrence relation. Then by the measure of confidence of the phase estimation valuse, the unwrapping phase values of high reliability can be obtained. By using the approach, the simulating experiment is undertaken. The result shows that the method successfully unwraps the phase and the error caused by the algorithm is also very small..

Key words　synthetic aperture rader;　interferometry;　phase unwrapping;　simulating experiment