

InSAR 图像的最小范数法相位解缠研究

张永志, 王卫东, 李萍

(长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 推导了 L^2 最小范数相位解缠法的实用计算公式, 应用 L^2 最小范数相位解缠递推算算法对 InSAR 图像进行了计算处理, 将 L^2 最小范数相位解缠法的计算结果与 Goldstain 枝切法相位解缠法计算结果进行对比分析。结果表明, 最小范数相位解缠法具有收敛快、计算结果精度高等优点。经过 6 次递推后, 获得与 Goldstain 枝切法基本相同的结果。最小范数相位解缠法出现残差点较 Goldstain 枝切法少, 图像较 Goldstain 枝切法光滑。

[关键词] InSAR 图像; 相位解缠; 最小范数法; Goldstain 枝切法

[中图分类号] P223 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2005)01-0080-04

[作者简介] 张永志(1961-), 男, 贵州晴隆人, 副教授, 博士, 从事地壳形变、重力测量、InSAR、GPS 测量研究。

差分合成孔径雷达干涉测量(DInSAR)和合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术是根据合成孔径雷达卫星图像的干涉处理而发展起来的一门新技术。该技术起源于 20 世纪 50 年代初的 SAR 技术。20 世纪 60 年代末, 在 SAR 技术的基础上发展了 InSAR 技术, 并在地震、火山、滑坡等变形监测中得到初步应用。InSAR 技术由于观测结果和观测方法的特殊性(如观测结果是整个区域面的变形信息, 而其他观测手段只是一些点和线的观测信息。InSAR 技术能对人员不能到达危险地区的变形进行高精度的连续监测等), 从而引起科技界、工程界的广泛关注。20 世纪 90 年代后, 随着 ERS-1/2, JERS-1, RADARSAT-1 等卫星先后发射成功, InSAR 技术的研究进入了实际应用研究阶段。如 Massonnet 等^[1]利用 InSAR 技术观测了 1992 年 Landers $M_w=7.2$ 级地震发生时的同震形变。该观测结果与野外常规大地测量方法获得的观测结果和位错理论模型模拟结果具有很好的一致性。Zebker 等^[2]采用 DInSAR 方法也对 1992 年 Landers $M_w=7.2$ 级地震发生时的同震形变获得了相

同的观测结果。Tobita 等^[3]利用 JERS-1 卫星资料检测出与 1995 年 5 月发生在日本萨哈林岛的强地震有关的地形变信息。张红、王超等^[4,5]利用 InSAR 技术获取了中国张北—尚义地震的同震变形。单新建等^[6]采用 InSAR 技术获取的地面形变场研究了中国玛尼地震震源的断层参数。Massonnet 等^[7]采用 InSAR 技术对意大利 Etna 火山在 1991~1993 年喷发过程的地形变进行了监测研究。除此之外, InSAR 技术在城市地面沉降监测方面也取得了较好的应用结果, 如 Fielding 等^[8]利用 InSAR 技术监测了美国 California 州 Lost 油田及 Belridge 油田的地面沉降, Tesaro 等^[9]利用 InSAR 技术监测意大利那不勒斯市地铁施工引起的地面沉降, 王超等^[10]利用 InSAR 技术研究中国苏州的地面沉降。InSAR 技术在水库形变监测方面也取得了初步的应用结果, 如游新兆等^[11]利用 InSAR 技术监测中国三峡地区水库引起的地面形变。在 InSAR 图像的处理过程中, 相位解缠是其中关键技术之一, 相位解缠结果的好坏, 直接影响 InSAR 图像处理结果的质量。相位解缠技术最早出现在 20 世纪 70 年代初, 当时主要研究的是一维相位解缠法, 一般采用积分法进行相位解缠。从 20 世纪 70 年代末起, 特别是 90 年代后, 由于 InSAR 等二维图像处理的需要, 二维相位解缠技术得到迅速发展。目前相位解缠法已有将近 40 种^[12]; 按解缠方式可分为

[收稿日期] 2004 04 21

[基金项目] 山东省基础地理信息与数字化技术重点实验室
开放式基金项目(SD2003-1)

两大类, 一类是以路径跟踪为基础, 如 Goldstain 枝切法^[13]; 另一类是以最小二乘法为基础, 如加权最小二乘法等。Ghiglia 于 1996 年首先提出了 L^p 最小范数相位解缠法^[14], 笔者在对该方法理论和方法研究的基础上, 基于数据处理和实用的目的, 对 L^2 最小范数相位解缠法进行了系统深入的研究, 并与 Goldstain 枝切法进行了对比计算分析。

1 二维 L^2 最小范数相位解缠的理论和方法

在实际的 InSAR 图形处理中, 卫星在两次进行 SAR 图像拍摄时得到的是一个区域面图像数据。为便于数据处理方便, 约定从图像的左上角起算, 由上向下采用行来标记, 而由左向右采用像素来标记。而每个像素到卫星间的相位观测值是相位经过周期性叠加的缠绕相位, 相位解缠的目的,

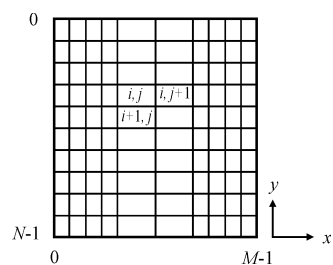


图 1 二维图像的相位差关系

Fig. 1 Two dimensional phase difference in x and y direction

就是在一定准则下, 求出缠绕相位的主值。为此, 设二维缠绕观测相位为 $\Psi_{i,j}$, 与其对应的解缠相位为 $\varphi_{i,j}$, 二维缠绕相位与解缠相位的关系为:

$$\Psi(\varphi_{i,j}) = \varphi_{i,j} + 2k_{i,j}\pi \quad (1)$$

式中: $k_{i,j}$ 为第 i 行第 j 个像素到卫星的整周模糊度(图 1), 在 x 方向的相邻像素间的相位差为:

$$\begin{aligned} \Delta_{i,j}^x &= \Psi(\varphi_{i+1,j}) - \Psi(\varphi_{i,j}) = \\ &= \varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j} + 2\Delta k_{i,j}\pi \end{aligned} \quad (2)$$

在 y 方向的相邻像素间的相位差为:

$$\begin{aligned} \Delta_{i,j}^y &= \Psi(\varphi_{i,j+1}) - \Psi(\varphi_{i,j}) = \\ &= \varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j} + 2\Delta k_{i,j}\pi \end{aligned} \quad (3)$$

如果式(2)、式(3)相邻像素间在 x, y 方向的地形没有陡坎, 当像素间的距离小到足以使得相邻像素到卫星间的相位差小于一个整周数时, 则 $\Delta k_{i,j}$ 等于零。

离散二维相位差的 L^2 范数为:

$$J = \left\{ \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} |\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j} - \Delta_{i,j}^x|^2 + \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-2} |\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j} - \Delta_{i,j}^y|^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

式中, $\Delta_{i,j}^x, \Delta_{i,j}^y$ 分别表示 x, y 方向的观测相位差。因

为范数最小等价于范数的平方最小, 将式(4)两边平方后对相位未知数求偏导数得:

$$2J \vartheta = \hat{q} + \hat{q} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \hat{q} &= \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} (\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j} - \Delta_{i,j}^x) \cdot \\ &\quad (\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \hat{q} &= \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-2} (\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j} - \Delta_{i,j}^y) \cdot \\ &\quad (\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}) \end{aligned} \quad (7)$$

令

$$a_{i,j} = \begin{cases} \varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j} - \Delta_{i,j}^x & 0 \leq i \leq M-2; 0 \leq j \leq N-1 \\ 0 & i = -1, M-1; 0 \leq j \leq N-1 \end{cases} \quad (8)$$

$$b_{i,j} = \begin{cases} \varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j} - \Delta_{i,j}^y & 0 \leq i \leq M-1; 0 \leq j \leq N-2 \\ 0 & 0 \leq i \leq M-1; j = -1, N-1 \end{cases} \quad (9)$$

则式(6)和式(7)可分别写为:

$$\hat{q} = \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} a_{i,j} (\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}) \quad (10)$$

$$\hat{q} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-2} b_{i,j} (\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}) \quad (11)$$

令 $\vartheta = 0$, 并将 i, j 互换得:

$$\hat{q} = \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} (a_{i,j} - a_{i-1,j}) \varphi_{i,j} \quad (12)$$

$$\hat{q} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-2} (b_{i,j} - b_{i,j-1}) \varphi_{i,j} \quad (13)$$

将式(12)和式(13)代入式(5)得:

$$2J \vartheta = \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} (a_{i,j} - a_{i-1,j} + b_{i,j} - b_{i,j-1}) \varphi_{i,j} \quad (14)$$

如果 $\varphi_{i,j}$ 是随机的, $\vartheta = 0$ 意味着:

$$\begin{aligned} a_{i,j} - a_{i-1,j} + b_{i,j} - b_{i,j-1} &= 0 \\ 0 \leq i \leq M-1 \quad 0 \leq j \leq N-1 \end{aligned} \quad (15)$$

将式(8)和式(9)代入式(15)并整理得:

$$\begin{aligned} &(\varphi_{i+1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j}) + (\varphi_{i,j+1} - \\ &2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}) = \rho_{i,j} \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $\rho_{i,j} = \Delta_{i,j}^x - \Delta_{i-1,j}^x + \Delta_{i,j}^y - \Delta_{i,j-1}^y$, 将式(16)整理, 并用前次的递推结果作近似值进行下一次递推计算:

$$\varphi_{i,j}^{k+1} = \frac{1}{4}(\varphi_{i+1,j}^k + \varphi_{i-1,j}^k + \varphi_{i,j+1}^k + \varphi_{i,j-1}^k - \rho_{i,j}) \tag{17}$$

通过式 (17) 递推计算, 可求得二维图像中不同像素点相位解缠结果。

2 算例分析

InSAR 数据处理过程是一个比较复杂的过程, 当通过购买等方式获得 InSAR 单视复影像图(SLC image)和卫星星历后, 需要对主图像与辅图像进行配准, 估计配准参数, 然后进行相位干涉、消出地平效应(减去参考相位), 最后将相位干涉结果进行相位解缠, 才能将相位观测值转换成距离观测值, 以便进一步计算高程、变形等。为了深入理解和验证最小范数相位解缠方法, 采用波兰 Delft 科技大学 Doris 软件^[15]对 SLC 图像数据进行处理, 处理后的干涉相位图如图 2a, 干涉图的行数和像素为 555×293。去掉地平效应后, 干涉图如图 2b。去掉地平效应后干涉图的行数与像素仍为 555×293。由于 Doris 软件目前还没有相位解缠功能, 因此, 笔者分别对 Goldstain 枝切法和最小范数相位解缠法独立进行处理软件的编译, 并采用 Doris 软件处理的同一干涉相位图分别采用 Goldstain 枝切法^[8]和最小范数相位解缠方法进行了对比计算分析。在计算中, Goldstain 枝切法通过识别残差点设置枝切树, 以防止误差传播。Goldstain 枝切法处理相位残差 791 个, 枝切点 538 个, 采用多视因子为(5×1), 即在进行相位解缠后, 相位解缠结果相位图的行数和像素个数分别为原来的 1/5 和不变。此时, 相位解缠结果图的行数和像素大小为 111×293。Goldstain 枝切法相位解缠的结果如图 2c。与此同时,

采用最小范数相位解缠法对相同的干涉相位图也进行了独立处理, 采用的多视因子为(5×1), 干涉相位图行数和像素大小也为 111×293, 收敛准则为, $|\varphi_{i,j}^{k+1} - \varphi_{i,j}^k| \leq 0.001$, 在经过 6 次递推计算后, 获得的相位解缠结果如图 2d。比较图 2c, 图 2d 可以看出, 最小范数相位解缠法处理结果与 Goldstain 枝切法的处理结果基本一致。最小范数相位解缠法出现剩余残差点较 Goldstain 枝切法少, 图像较 Goldstain 枝切法光滑。Goldstain 枝切法在前 3 行前 5 个像素的数值结果及最小范数法前 3 行前 5 个像素的数值对比结果见表 1。

表 1 枝切法、最小范数法相位解缠的数值结果对比

| Table 1 Compared result between goldstain cut metnod and least norm method | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 枝切法相位解缠 /rad | | | | |
| 0.866 663 | 0.778 665 | 0.757 822 | 0.799 420 | 0.732 274 |
| 0.702 045 | 0.846 298 | 0.828 600 | 0.841 451 | 0.808 244 |
| 0.736 410 | 0.823 925 | 0.797 961 | 0.648 813 | 0.807 381 |
| 最小范数法相位解缠 /rad | | | | |
| 0.866 663 | 0.778 665 | 0.757 822 | 0.799 420 | 0.732 274 |
| 0.702 042 | 0.846 298 | 0.828 600 | 0.841 451 | 0.808 244 |
| 0.736 410 | 0.823 925 | 0.797 961 | 0.648 813 | 0.807 382 |

从表 1 数值结果可以看出, 最小范数法相位解缠法与传统的 Goldstain 枝切法的计算结果基本一致, 只有个别点的数值在最后一位小数上存在差异, 完全能满足相位解缠的精度要求。相位解缠在数学上属于欠定问题, 如何评定其精度有待进一步研究, 目前只有在超定问题上有较好的精度评定方法。

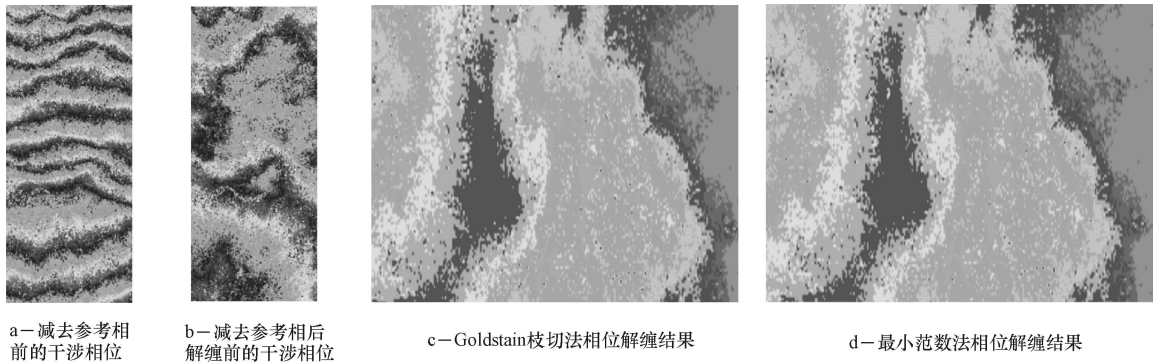


图 2 最小范数法与 Goldstain 枝切法结果比较

Fig 2 Comparing between the least norm and goldstain method unwrapping

3 结论与认识

通过对最小范数相位解缠方法的理论推导及最小范数法与 Goldstain 枝切法计算结果的对比分析, 可得出如下结论与认识:

(1) 最小范数相位解缠方法具有收敛快、计算结果精度高等优点。在经过 6 次递推后, 获得与 Goldstain 枝切法相同的结果, 只有个别点的数值存在差异, 完全能满足相位解缠要求。

(2) 最小范数相位解缠法出现残差点较 Goldstain 枝切法少, 图像较 Goldstain 枝切法光滑。

[参 考 文 献]

[1] Messonnet D K. Rader interometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake[J]. Nature, 1994, 369: 227 ~ 230.

[2] Zebker F H A. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake[J]. J Geophys Res, 1994, 99: 19, 617 ~ 19, 643.

[3] Tobita M. Deformation of the 1995 North Sahalin earthquake detected by JERS 1 /SARinterometry[J]. Earth Planets Space, 1998, 50: 313 ~ 325.

[4] 张红, 王超, 刘智. 获取张北地震同震形变场的差分干涉测量技术[J]. 中国图像图形学报, 2002, 5(A6): 497 ~ 500.

[5] 王超, 刘智, 张红, 等. 张北—尚义地震同震形变场雷达差分

干涉测量[J]. 科学通报, 2000, 45(23): 2 500 ~ 2 553.

[6] 单新建, 马谨, 王长林, 等. 利用星载 D InSAR 技术获取的地表变形场提取玛尼地震震源断层参数[J]. 中国科学 D 辑, 2002, 32(11): 837 ~ 844.

[7] Messonnet D, Broole P. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry[J]. Nature, 1995, 375: 567 ~ 570.

[8] Fielding E J. Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interometry[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(17): 3215 ~ 3218.

[9] Tesauro M, P Berardino. Urban subsidence inside the city of Napoli(Italy) observe by satellite radar interferomtry[J]. Gophysical Research Letters, 2000, 27(13): 1961 ~ 1964.

[10] 王超, 张红, 刘智, 等. 苏州地区地面沉降的星载合成孔径雷达干涉测量监测[J]. 自然科学进展, 2002, 12(6): 621 ~ 624.

[11] 游新兆, 李澍孙. 长江三峡工程库首区 InSAR 测量的初步研究[J]. 地壳形变与地震, 2001, 21(4): 58 ~ 66.

[12] 王超, 张红, 刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[13] Goldstain R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: two dimensional phase unwrapping[J]. Radio Science, 1988, 23(4): 713 ~ 320.

[14] Ghiglia D G, Romero L A. Minimum L^p norm two dimensional phase unwrapping[J]. J Opt Soc Am, 1996, 13(10): 1999 ~ 2013.

[15] 波兰 Delft 科技大学. Doris 软件[EB/OL]. <http://www.geo.tudelft.nl/doris>, 1999

Minimum L^2 norm two dimensional phase unwrapping

ZHANG Yong zhi, WANG Wei dong, LI Ping

(School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang' an University, Xi' an 710054, China)

Abstract A formula of Minimum L^2 norm two dimensional phase unwrapping are derived based on relationship between wrapping and unwrapping phase in this paper. In order to test the correctness and validness of the formula derived, the computed results of Minimum L^2 norm two dimensional phase unwrapping are compared with that by traditional Goldstain' s method. The results manifest that Minimum L^2 norm two dimensional phase unwrapping can get the better results only at the sixth step iterated than that by Goldstain' s method.

Key words: InSAR image; unwrapping; minimum L^2 norm method; goldstain cut method

[英文审定: 苏生瑞]