

基于三幅子图的干涉合成孔径雷达 数据处理方法研究

于起峰^{1,2} 龙学军^{1*} 伏思华¹ 杨 夏²

(国防科技大学¹ 光电科学与工程学院, ² 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 现有干涉合成孔径雷达(InSAR)数据处理方法需要单视复图像对包含的所有四幅子图信息,且生成的干涉相位图去相关噪声非常严重。提出了基于三幅子图的 InSAR 数据处理方法:等值线相关干涉法,包括图像对配准和干涉相位图生成。首先介绍了条纹方向图和条纹等值线窗口求取的方法,并对算法进行了改进,然后采用相关的方法详细推导了在等值线窗口内 InSAR 图像的配准和干涉相位图生成的公式。模拟和实测数据表明,等值线相关干涉法(CCI 方法)仅需用 InSAR 复数图像对的 4 个实虚部子图中任意 3 个能得到基本无斑点噪声、无模糊效应的干涉相位图,并且减少了数据的传输和处理量,是一种 InSAR 数据处理的全新方法。

关键词 合成孔径雷达;等值线相关干涉法;三幅子图;等值线窗口;图像配准;干涉相位图

中图分类号 TN957.52 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0292

Study of Interferometric Synthetic Aperture Radar Data Processing Method Based on Three Part Images

Yu Qifeng^{1,2} Long Xuejun¹ Fu Sihua¹ Yang Xia²

(¹ Opto-Electronic Science and Engineering, ² College of Aerospace Engineering,
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, 410073, China)

Abstract The single look complex image of synthetic aperture radar interferometry (InSAR) data includes four parts, all the parts of which will be used with the current InSAR data processing methods, which, however, is loaded with high-level decorrelation noise. In this paper, the InSAR data processing method proposed by the authors based on three part images are introduced comprehensively. The new technology includes image pair registration and the creation of interferograms, which is named contoured correlation interferometry (CCI). Firstly, the algorithm for the calculating of fringe orientations is introduced and improved. Secondly, the formulations of the image pair registration and the creation of interferograms are deduced with the correlation method in this paper. Simulative and practical experiments indicate that CCI method which needs only arbitrary three image parts from the four image parts of InSAR complex image pair to get interferogram without noise and blurring effect is a totally novel method to InSAR data processing, which also can save the time to data transferring and processing.

Key words synthetic aperture radar interferometry; contoured correlation interferometry; three part images; contoured window; image registration; interferometric phase image

1 引 言

合成孔径雷达(InSAR)干涉测量^[1]是用来提取地表三维和高程变化信息的一项先进技术,它通过建立传感器、轨道和地球模型之间的几何关系,利用雷达干涉数据导出的相位信息可快速大面积地获取高精度数字地形信息。目前,InSAR 技术正在朝实

用化方向发展,并不断拓展应用领域。已经从最初的地形测绘领域,扩展到灾害监测、资源调查等许多领域,测量精度已达到毫米级,应用潜力巨大。

InSAR 数据处理所用到的单视复图像对包含四幅子图信息:两个实部数据和两个虚部数据。现有方法对复图像对进行精确配准和生成干涉相位图

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z121)和国防科技大学优秀研究生创新基金(B080701)资助项目。

作者简介: 于起峰(1958—),男,博士,教授,主要从事精密光测图像处理等方面的研究。E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

* **通信联系人**。E-mail: xuejun.long@gmail.com

都要用到复图像对的全部四幅子图信息,且生成的干涉相位图去相关噪声严重。这种高噪声的存在严重地影响了相位解缠和高精度数字高程图的获取,已经成为干涉合成孔径雷达数据处理中的瓶颈^[3~5]。

本文在研究光学的电子散斑干涉(ESPI)技术中提出的散斑干涉图的等值线相关条纹图法^[6]的基础上,提出了基于三幅子图的 InSAR 数据处理方法:InSAR 等值线相关干涉法(CCI 方法),包括图像对精准准方法^[7]和干涉相位图生成方法^[8]。CCI 方法仅需 InSAR 复数图像对的 4 个实虚部子图中的任意 3 个子图就得到基本无斑点噪声、无模糊效应的干涉相位图,是一种 InSAR 数据处理的全新方法。这对于星载 InSAR,若 SAR 成像过程在星上完成,则只需要将 3/4 的数据传回地面,即可得到 InSAR 数据结果,本方法具有重要的理论与应用意义。

2 InSAR 干涉纹图条纹等值线窗口的确定

干涉条纹图或相位条纹图具有如下特点:条纹场是灰度方向流场形成的,在条纹法线方向相位梯度最大,而在条纹的切线方向灰度(相位)的变化最小,即相位为常数。条纹等值线即相位在此线上保持为常数,是条纹图上的等灰度线。在条纹等值线上做各种低通滤波,可有效滤除噪声并保持相位不受损害。本文作者提出了系列的利用条纹方向信息进行条纹图处理的方法,如旋滤波^[9]、等值线滤波^[10]等。这些方法已成功地应用于各种干涉条纹的处理,包括全息、云纹、电子散斑干涉等干涉条纹图,以及最近的 InSAR 相位图^[11]。并且等值线的特殊性能使多种新条纹处理方法成为可能^[6~8]。

本文等值线窗口是根据条纹方向进行跟踪得到的,所以条纹方向精度决定了等值线窗口的精度。这里提出使用梯度方法来代替原来的平面拟合法^[12],以得到适应性更好、更精确的方向结果。

2.1 条纹方向图的求取

文献^[6~8]中使用平面拟合的方法来求条纹方向,但是平面拟合法很容易受到计算窗口的影响,通常在计算窗口尺寸接近当地条纹宽度的一半时,才能得到最佳精度。这里提出用指纹方向图常用的梯度方法^[12,13]确定 InSAR 的条纹方向。理想情况下,条纹的切线方向矢量与图像灰度的梯度矢量垂直,两个矢量的内积为零:

$$(\cos \theta, \sin \theta) \nabla I(x, y) = 0, \quad (1)$$

式中 I 为图像灰度,即相位图相位, $\theta(x, y)$ 为图像当地条纹切线方向。于是得到

$$\theta(x, y) = \arctan \left[\frac{\partial I(x, y)}{\partial x} / \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \right]. \quad (2)$$

图 1 的左边是仿真的 InSAR 条纹图,右边是用上述方法求得的方向图。图 2 是平面拟合法与梯度法的结果精度对比图,横坐标是计算窗口尺寸,纵坐标是提取的方向结果图与方向真值的误差,表示为

$$E = \frac{1}{N} \sum_{x, y \in s} |\sin[\theta(x, y) - \theta_T(x, y)]|, \quad (3)$$

式中 $\theta(x, y)$ 为得到的方向结果, $\theta_T(x, y)$ 为方向真值, s 为计算窗口。从图 2 上看到随着窗口尺寸的改变,平面拟合法的精度变化较大,这是因为当拟合平面的窗口尺寸为条纹宽度的整数倍时,拟合平面近似为水平面,容易受到噪声影响。而梯度法精度随着计算窗口的增大而增高。

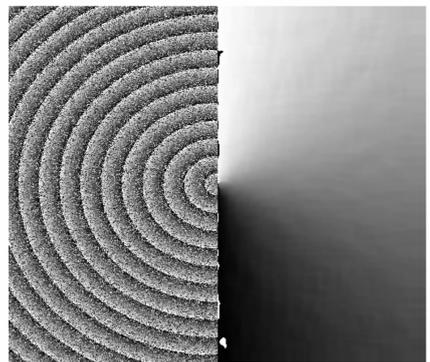


图 1 左图是仿真的 InSAR 相位图,右图是用梯度法得到的左图的方向图

Fig. 1 Simulated phase image of InSAR (left) and its orientation image (right) obtained with gradient method

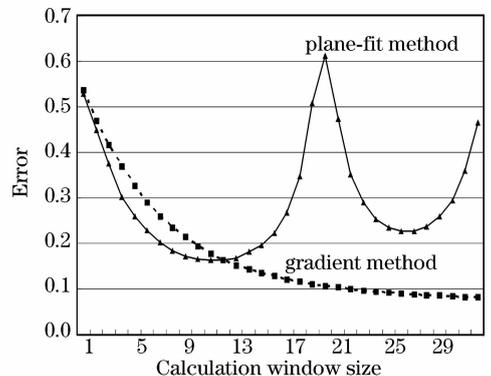


图 2 平面拟合法与梯度法的精度对比
Fig. 2 Accuracy comparison of the plane-fit method and the gradient method

2.2 条纹等值线窗口的确定

干涉条纹具有明显条纹方向流特性,可以沿着条纹切线方向进行跟踪,得到条纹等值线。假定当前点的坐标位置为 $P_0(x_0, y_0)$,其条纹方向为 θ_0 。分别沿着条纹正反两个方向进行跟踪,可以得到与当前点相邻的两点 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_{-1}(x_{-1}, y_{-1})$,继续跟踪,可以得到 $P_n(x_n, y_n)$ 和 $P_{-n}(x_{-n}, y_{-n})$,跟踪的通式为

$$\begin{cases} x_{\pm i} = x_{\pm(i-1)} \pm \cos \theta_{\pm(i-1)}, \\ y_{\pm i} = y_{\pm(i-1)} \pm \sin \theta_{\pm(i-1)} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $1 \leq i \leq n$, θ_i 为点 (x_i, y_i) 所对应的条纹方向,如图 3(a) 所示。注意当跟踪到点 (x_i, y_i) 时,下一步跟踪的方向是 θ_i 。这样逐点进行亚像素跟踪后,可得到一条近似为等值线的曲线。将该曲线两边拓宽,就得到图 3(b) 所示的条纹等值线窗口。图 3(d) 显示了等值线窗口能够很好地拟合条纹等值线。在条纹曲率大的区域,矩形窗口与条纹等值线有大的误差,如图 3(c) 所示。只有在条纹等值线上条纹的相位保持不变。

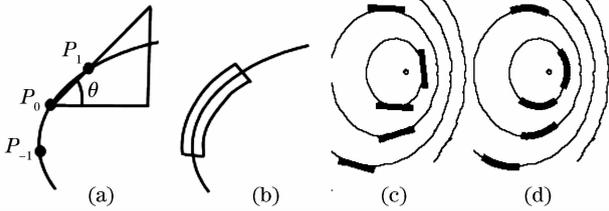


图 3 (a)和(b)为等值线跟踪过程,(c)和(d)为矩形窗口和等值线窗口的对比

Fig. 3 (a) and (b) are the process of getting a contoured window, (c) and (d) are the comparison of rectangle windows and contoured windows

3 三幅子图的 InSAR 复图像对配准方法

在 InSAR 数据处理中,两幅单视复图像的精确配准技术是提高测量精度的关键因素之一。通常使用的评价复数图像配准质量的标准有三个:1) 两幅复数图像的相关系数^[14];2) 由两幅复数图像得到的相位图的信噪比;3) 两个复数图像差图像的平均波动方程。相关系数是其中常用的一种。相关系数是指由两幅复数图像进行复数相关的结果值:

$$\gamma = \frac{E[V_1 V_2^*]}{\sqrt{E[|V_1|^2]} \sqrt{E[|V_2|^2]}}, \quad (5)$$

式中 γ 为相关系数,InSAR 中也称为相干系数。 V_1 和 V_2 是两个雷达天线分别得到的复数信号,* 表示复数共轭, $E[\]$ 表示 $M \times N$ 像素窗口内的均值。此时

相关系数也可以表示为

$$\bar{\gamma} = \frac{\left| \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M V_1(n, m) \cdot V_2^*(n, m) \right|}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |V_1(n, m)|^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |V_2(n, m)|^2}}. \quad (6)$$

本文提出三幅子图的 InSAR 复图像配准准则^[7],它和相干系数的定义非常类似,新配准准则只需要其中的四幅子图中的任意三幅子图。InSAR 复图像对 $V_1(r, x)$ 和 $V_2(r, x)$ 记为

$$\begin{aligned} V_1(r, x) &= A_1 e^{i\phi_1} = A_1 \cos \phi_1 + i A_1 \sin \phi_1 = \\ &A_1 \cos(\phi_{1c} + u_1) + i A_1 \sin(\phi_{1c} + u_1) = \\ &a_1 + b_1 i, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_2(r, x) &= A_2 e^{i\phi_2} = \\ &A_2 \cos(\phi_{2c} + u_2) + i A_2 \sin(\phi_{2c} + u_2) = \\ &a_2 + b_2 i, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 ϕ_1 和 ϕ_2 分别为两个天线含有噪声的回波相位,它由两部分组成:一是由往返路径相关的确定相位 ϕ_{1c} 和 ϕ_{2c} ,另一部分是由各种不同散射特性造成的随机相位 u_1 和 u_2 。使用的相关公式可以是标准化相关、标准化协方差相关等多种数学表达形式。下面以标准化相关公式为例来推导:

$$C(r, x) = \frac{\langle f_1 \cdot f_2 \rangle_{m \times n}}{\sqrt{\langle f_1^2 \rangle_{m \times n} \cdot \langle f_2^2 \rangle_{m \times n}}}, \quad (9)$$

$\langle \cdot \rangle_{m \times n}$ 算符代表在 $m \times n$ 像素范围内对某一变量求均值。先将主图像实部与辅图像实部互相关并计算它们的自相关系数,得

$$\begin{aligned} \langle a_1 a_2 \rangle_{m \times n} &= \\ \langle A_1 \cos(\phi_{1c} + u_1) \cdot A_2 \cos(\phi_{2c} + u_2) \rangle_{m \times n} &= \\ \langle \frac{1}{2} A_1 A_2 \cdot [\cos(\phi_{1c} + \phi_{2c} + u_1 + u_2) + \\ \cos(\phi_{1c} - \phi_{2c} + u_1 - u_2)] \rangle_{m \times n}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \langle a_1 a_1 \rangle_{m \times n} &= \\ \langle A_1 \cos(\phi_{1c} + u_1) \cdot A_1 \cos(\phi_{1c} + u_1) \rangle_{m \times n} &= \\ \langle A_1 A_1 \cos^2(\phi_{1c} + u_1) \rangle_{m \times n} &= \\ \langle \frac{1}{2} A_1 A_1 \cdot [\cos(\phi_{1c} + \phi_{1c} + u_1 + u_1) + \\ \cos(\phi_{1c} - \phi_{1c} + u_1 - u_1)] \rangle_{m \times n} &= \\ \frac{1}{2} \langle A_1 A_1 \rangle_{m \times n} \cdot \langle 1 + \cos(2\phi_{1c} + 2u_1) \rangle_{m \times n}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \langle a_2 a_2 \rangle_{m \times n} &= \\ \frac{1}{2} \langle A_2 A_2 \rangle_{m \times n} \cdot \langle 1 + \cos(2\phi_{2c} + 2u_2) \rangle_{m \times n}, \end{aligned} \quad (12)$$

由于 u_1 和 u_2 为随机分布变量,根据散斑统计理论^[15],可以认为在满足一定尺度($m \times n$)的窗口上,下式成立:

$$\langle \cos u_i \rangle_{m \times n} = \langle \sin u_i \rangle_{m \times n} = 0, \quad (i = 1, 2) \quad (13)$$

进而有 $\langle \cos(\phi_{1c} + \phi_{2c} + u_1 + u_2) \rangle_{m \times n} = \langle \sin(\phi_{1c} + \phi_{2c} + u_1 + u_2) \rangle_{m \times n} = 0,$ (14)

将(10)~(12)式代入(9)式,并考虑到(13),(14)式,可得

$$C_1 = \frac{\langle A_1 A_2 \rangle_{m \times n} \cdot \langle \cos(\phi_{1c} + \phi_{2c} + u_1 + u_2) + \cos(\phi_{1c} - \phi_{2c} + u_1 - u_2) \rangle_{m \times n}}{\sqrt{\langle A_1^2 \rangle_{m \times n}} \cdot \langle 1 + \cos(2\phi_{1c} + 2u_1) \rangle_{m \times n} \cdot \sqrt{\langle A_2^2 \rangle_{m \times n}} \cdot \langle 1 + \cos(2\phi_{2c} + 2u_2) \rangle_{m \times n}} = \frac{\langle A_1 A_2 \rangle_{m \times n}}{\sqrt{\langle A_1^2 \rangle_{m \times n}} \cdot \sqrt{\langle A_2^2 \rangle_{m \times n}}} \cdot \langle \cos(\Delta\phi_c + \Delta u) \rangle_{m \times n}, \quad (15)$$

式中 $\Delta\phi_c = \phi_1 - \phi_2$ 为待求的相位, $\Delta u = u_1 - u_2$ 为去相关的随机斑点噪声。同理,将主图像的实部与辅图像的虚部代入(9)式相关,可得

$$C_2 = \frac{\langle A_1 A_2 \rangle_{m \times n}}{\sqrt{\langle A_1^2 \rangle_{m \times n}} \cdot \sqrt{\langle A_2^2 \rangle_{m \times n}}} \cdot \langle -\sin(\Delta\phi_c + \Delta u) \rangle_{m \times n}, \quad (16)$$

由(15)和(16)式定义如下配准准则

$$g = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} = \frac{|\langle A_1 A_2 \rangle_{m \times n}|}{\sqrt{\langle A_1^2 \rangle_{m \times n}} \cdot \sqrt{\langle A_2^2 \rangle_{m \times n}}} \cdot \sqrt{\langle \cos(\Delta\phi_c + \Delta u) \rangle_{m \times n}^2 + \langle \sin(\Delta\phi_c + \Delta u) \rangle_{m \times n}^2}, \quad (17)$$

另一方面,如果将 $V_1(r, x)$ 和 $V_2(r, x)$ 代入相关公式(6)就得到传统的相关系数配准法准则

$$\gamma = \frac{\left| \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M V_1(n, m) \cdot V_2^*(n, m) \right|}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |V_1(n, m)|^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |V_2(n, m)|^2}} = \frac{|\langle A_1 A_2 \rangle_{m \times n}| \cdot |\langle e^{i(\phi_{1c} - \phi_{2c} + u_1 - u_2)} \rangle_{m \times n}|}{\sqrt{\langle A_1^2 \rangle_{m \times n}} \cdot \sqrt{\langle A_2^2 \rangle_{m \times n}}} = \frac{|\langle A_1 A_2 \rangle_{m \times n}|}{\sqrt{\langle A_1^2 \rangle_{m \times n}} \cdot \sqrt{\langle A_2^2 \rangle_{m \times n}}} \cdot \sqrt{\langle \cos(\Delta\phi_c + \Delta u) \rangle_{m \times n}^2 + \langle \sin(\Delta\phi_c + \Delta u) \rangle_{m \times n}^2}, \quad (18)$$

(17)与(18)式的最终表达式完全相同,说明新的配准准则 g 与传统常用准则 γ 具有完全相同的物理意义,可以作为配准准则。

为了提高配准精度,减小相位梯度对相关的影响,进一步提出在相位等值线窗口内进行相关运算。由于两个复数图像((7)和(8)式)是地面相近位置的 SAR 信号,它们具有相似的随机噪声 u_1 和 u_2 , 因此 u_1 和 u_2 的差 Δu 是以零为均值且分布在零附近的小值。假设窗口足够大,可以得到

$$\langle \sin \Delta u \rangle_{m \times n} = 0, \quad \langle \cos \Delta u \rangle_{m \times n} \neq 0, \quad (19)$$

由于等值线窗口内 $\Delta\phi_c = \text{const}$,代入(17)式可以得到

$$\begin{aligned} &\langle \cos(\Delta\phi_c + \Delta u) \rangle_{m \times n} = \\ &\langle \cos \Delta\phi_c \cos \Delta u - \sin \Delta\phi_c \sin \Delta u \rangle_{m \times n} = \\ &\cos \Delta\phi_c \langle \cos \Delta u \rangle_{m \times n}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} &\langle \sin(\Delta\phi_c + \Delta u) \rangle_{m \times n} = \\ &\langle \sin \Delta\phi_c \cos \Delta u + \cos \Delta\phi_c \sin \Delta u \rangle_{m \times n} = \\ &\sin \Delta\phi_c \langle \cos \Delta u \rangle_{m \times n}, \end{aligned} \quad (21)$$

将(20)和(21)式代入(17)式可以得到

$$g = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} = \frac{|\langle A_1 A_2 \rangle_{m \times n}|}{\sqrt{\langle A_1^2 \rangle_{m \times n}} \cdot \sqrt{\langle A_2^2 \rangle_{m \times n}}} \cdot \langle \cos \Delta u \rangle_{m \times n}, \quad (22)$$

(22)式直接得到了配准度量 g 和去相关噪声 Δu 的关系。其关系表明当两幅复数图像完全配准时去相关噪声 Δu 应该为最小。噪声项 Δu 越小,配准度量 g 就越大,相应的配准就越好,这与实际的物理概念一致。与(17)式相比,(22)式避免了 $\Delta\phi_c$ 的影响,物理意义更明确,精度更高,所以 g 可以用来作为 InSAR 复数图像配准的准则。

本文提出的配准方法主要有以下几个步骤:1)用(17)式的 g 作为配准评价准则在 $m \times n$ 的矩形窗口内对主、辅图像进行粗配准。2)由 CCI 方法用矩形窗口生成相位图,然后用该相位图得到条纹方向图。根据方向图确定等值线窗口。3)用条纹等值线窗口根据(22)式的配准准则对主、副图像进行再配准。模板窗口以小于或等于 0.1 pixel 的步长在粗配准位置附近移动搜索最佳匹配点。用来配准运算的窗口都为 $m \times n$ 的等值线窗口。

4 用于生成 InSAR 干涉纹图的等值线相关干涉法

4.1 现有共轭相乘法

精确配准 InSAR 复图像对后,InSAR 数据处理流程是生成干涉相位图。将精配准后的复图像对

$V_1(r, x)$ 和 $V_2(r, x)$ 仍用(7)和(8)式表示。现有的干涉相位图生成主要采用共轭相乘法

$$\begin{aligned} \phi_1 - \phi_2 &= (\phi_{1c} - \phi_{2c}) + (u_1 - u_2) = \\ &\Delta\phi_c + \Delta u = \\ &\arctan\left\{\frac{\text{Im}[V_1(r, x) \cdot V_2^*(r, x)]}{\text{Re}[V_1(r, x) \cdot V_2^*(r, x)]}\right\} = \\ &\arctan\left(\frac{a_2 b_1 - a_1 b_2}{a_1 a_2 + b_1 b_2}\right), \end{aligned} \quad (23)$$

由(23)式看到,共轭相乘法得到的干涉相位中包含有去相关噪声项 Δu 。同时该方法对复图像对进行配准和生成干涉相位图都要用到复图像对的全部四幅子图信息,且生成的干涉相位图去相关噪声非常严重。这种高噪声严重影响了相位解缠和高精度数字高程图的获取,已经成为 InSAR 数据处理中的瓶颈之一。作者提出的生成 InSAR 干涉条纹图的条纹等值线相关干涉法^[8]生成的干涉相位不再包含有噪声项 Δu 。并且它和三幅图配准方法一样,也只需用到四个子图的任意三个。

4.2 等值线相关干涉法的公式推导

本算法使用的相关公式可以有多种形式:直接相关、标准化相关及标准化协方差相关等。下面先以直接相关公式为例来推导 InSAR 的 CCI 方法。

直接相关公式为

$$C(r, x) = \langle f_1 \cdot f_2 \rangle_{m \times n}, \quad (24)$$

$\langle \cdot \rangle_{m \times n}$ 算符代表在 $m \times n$ 像素范围内对某一变量求均值。

对于两幅复图像 $V_1(r, x)$ 和 $V_2(r, x)$ 分别取其 实部数据 a_1, a_2 进行相关运算,由(14)式可得

$$\begin{aligned} \langle a_1 a_2 \rangle_{m \times n} &= \left\langle \frac{1}{2} A_1 A_2 \cdot [\cos(\phi_{1c} + \phi_{2c} + u_1 + u_2) + \right. \\ &\left. \cos(\phi_{1c} - \phi_{2c} + u_1 - u_2)] \right\rangle_{m \times n}. \end{aligned} \quad (25)$$

根据散斑统计理论^[15],考虑(13)和(14)式可得

$$\begin{aligned} \langle a_1 a_2 \rangle_{m \times n} &= \left\langle \frac{1}{2} A_1 A_2 \cdot \cos(\Delta\phi_c + \Delta u) \right\rangle_{m \times n} = \\ &\frac{1}{2} \langle A_1 A_2 \rangle_{m \times n} \cdot \langle \cos \Delta\phi_c \cos \Delta u - \\ &\sin \Delta\phi_c \sin \Delta u \rangle_{m \times n}, \end{aligned} \quad (26)$$

其中 $\Delta\phi_c = \phi_1 - \phi_2$ 为待求的相位, $\Delta u = u_1 - u_2$ 为去相关的随机斑点噪声。

在等值线窗口内求相关, $\Delta\phi_c = \text{const}$, 同时考虑(19)和(20)式,可以得到

$$\begin{aligned} \langle a_1 a_2 \rangle_{m \times n} &= \frac{1}{2} \langle A_1 A_2 \rangle_{m \times n} \cdot [\cos \Delta\phi_c \langle \cos \Delta u \rangle_{m \times n} - \\ &\sin \Delta\phi_c \langle \sin \Delta u \rangle_{m \times n}] = \\ &\frac{1}{2} \langle A_1 A_2 \rangle_{m \times n} \cdot \cos \Delta\phi_c \langle \cos \Delta u \rangle_{m \times n}, \end{aligned} \quad (27)$$

同理,分别取 $V_1(r, x)$ 和 $V_2(r, x)$ 的实部 a_1 与虚部 b_2 代入直接相关公式进行相同的推导过程,可得

$$\langle a_1 b_2 \rangle_{m \times n} = -\frac{1}{2} \langle A_1 A_2 \rangle_{m \times n} \cdot \sin \Delta\phi_c \langle \cos \Delta u \rangle_{m \times n}, \quad (28)$$

将(28)式除以(27)式可得

$$\frac{\langle -a_1 b_2 \rangle_{m \times n}}{\langle a_1 a_2 \rangle_{m \times n}} = \frac{\sin \Delta\phi_c \langle \cos \Delta u \rangle_{m \times n}}{\cos \Delta\phi_c \langle \cos \Delta u \rangle_{m \times n}} = \frac{\sin \Delta\phi_c}{\cos \Delta\phi_c}, \quad (29)$$

于是得到 $\Delta\phi_c$ 可以写为

$$\Delta\phi_c = \arctan\left(\frac{\langle -a_1 b_2 \rangle_{m \times n}}{\langle a_1 a_2 \rangle_{m \times n}}\right) = \arctan\left(\frac{\sin \Delta\phi_c}{\cos \Delta\phi_c}\right), \quad (30)$$

对比(30)式与传统共轭相乘方法的(23)式可以看出,CCI方法消除了随机项 u_1, u_2 和 Δu 的影响,得到的是纯相位 $\Delta\phi_c$ 的主值,不包含传统方法所有的去相关噪声 Δu 。并且 CCI 方法只需两幅复图像的任意三个子图就可得到纯干涉相位图。

4.3 用三幅子图 CCI 法生成 InSAR 干涉纹图的主要步骤

1) 对两幅复数图像中对应的每一像素点,以当前点为中心,确定大小为 $m \times n$ 的等值线窗口,在窗口内对两幅复图像的实部或虚部进行相关运算,求出其相关系数 C ;

2) 用相同方法对主图像实部和辅图像虚部进行相关运算,求出其相关系数 C' ; 或对主图像虚部和辅图像实部进行相关运算,求出其相关系数 $-C'$;

3) 对 C' 与 C 的比值求反正切即可获得干涉相位图像。

5 CCI 法的 InSAR 数据处理实例

为了验证本文 CCI 方法的有效性,用该方法处理真实 InSAR 数据,数据来自 ERS1/2。图 4 是本文三幅图配准方法和已有四幅图相关系数配准方法的结果对比。图 4 中对比的是用两种方法配准后对应的主副图像的相干系数,横坐标为相关系数,纵坐标为配准结果中对应于某相关系数的点数。图 4 结果表明,本文配准方法的相关系数比传统方法的相关系数整体偏右(偏高),这说明本文配准方法不仅能够只通过三幅子图进行正确配准,而且精度优于传统配准方法。

图 5(a)是用三幅子图配准方法配准后,用传统共轭相乘法生成的干涉相位图;图 5(b)是用本文 CCI 方法生成的相位图。图 5 说明,三幅子图配准

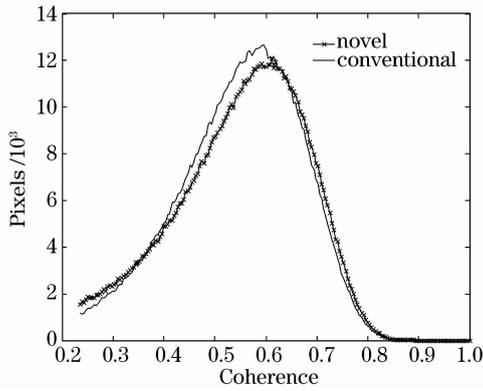


图 4 三幅子图等值线配准方法与原有相干系数配准方法的配准后相干性结果对比

Fig. 4 Coherence comparison between our coregistration method and traditional coregistration method based on coherence coefficient

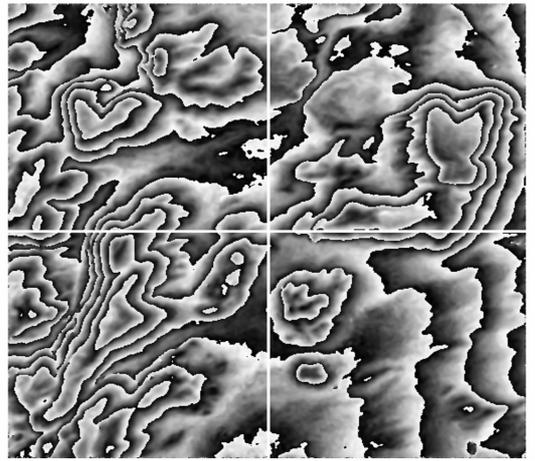


图 6 用本文方法选择不同子图进行处理得到的结果对比
Fig. 6 Four results of our method with different choices of part images

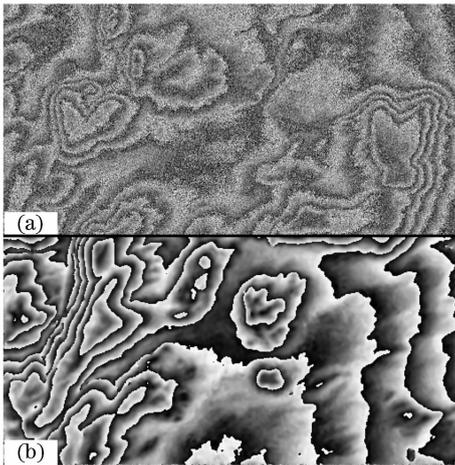


图 5 (a) 三幅子图方法配准后用共轭相乘法生成的相位图；(b) 用 CCI 方法得到的相位图

Fig. 5 (a) Phase map of obtained with conjugate multiplicative method after coregistrating by our three image method; (b) obtained by our CCI method

方法是正确有效的，并且三幅子图 CCI 方法得到的相位图结果明显优于共轭相乘用四幅图得到的结果。CCI 方法不仅能得到光滑的几乎无斑点噪声的干涉相位图，并且条纹相位信息保持很好，没有模糊效应。

图 6 是对同一组数据用两个复数图像不同的实虚部组合用 CCI 方法得到的结果对比。从 4 个子图中任取 3 个有 4 种组合，从图 6 可以看到，用 CCI 方法得到的 4 种组合结果几乎完全相同，说明 CCI 方法对子图的选取是任意的。

图 7 是对四幅子图共轭相乘得到的干涉图使用 Goldstein and Werner 滤波方法^[16]得到的结果，与

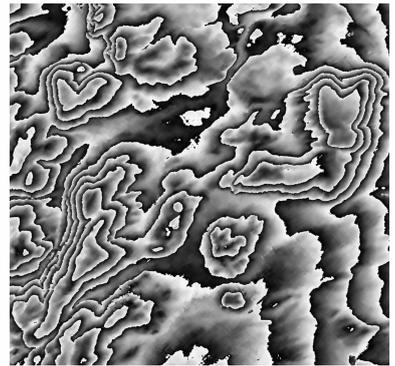


图 7 传统共轭相乘干涉相位图 Goldstein and Werner 滤波结果图

Fig. 7 Image generated with conjugate multiplicative method filtered by Goldstein and Werner filter method

三幅子图 CCI 方法得到的结果基本一致。为了对比两种方法的性能，分别计算了两种结果图的残点数，其中图 7 的残点数为 19596 个，CCI 生成的相位图残点数为 9245 个，明显低于图 7 的残点数，说明 CCI 方法可以更有效的去除噪声的影响，得到更好的干涉图。

图 8 是分别用传统共轭相乘法(上半部)和 CCI 法(下半部)对去相关噪声比较严重的同一块区域进行处理的结果。其结果表明对于传统方法难以处理的相关性较差的区域，CCI 方法仍然能够得到很好的相位信息。理论分析和多项实验处理结果表明，只要能够得到大致正确的条纹方位图信息，即近似的等值线窗口，在此近似等值线上作 CCI 的相关运算，能够很大程度上减轻甚至消除去相关效应，对去相关严重的区域仍可能得到不含高斑点噪声，并且保持相位信息的相位结果。由于条纹方向变化相比

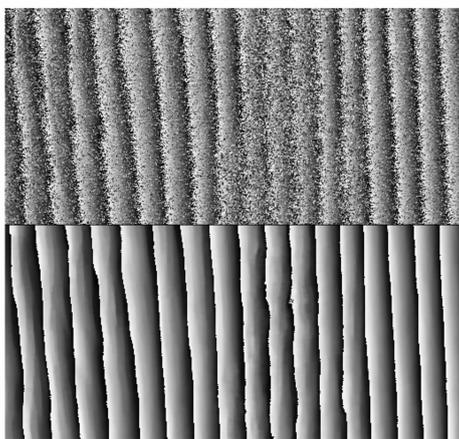


图 8 CCI方法和共轭相乘法对较差质量 InSAR 数据处理结果的对比

Fig. 8 Comparison between our method and traditional method for a poor quality InSAR data

相位变化(即条纹)变化要缓慢得多,提取大致正确的条纹方向要比直接得到正确的相位信息容易得多和可靠得多,特别是对去相关较明显的区域。因此 CCI 方法可有效地提高 InSAR 数据的适应性和可用性。此外,实验表明,CCI 方法对等值线窗口的精度不是很敏感,带有一定误差的等值线窗口仍可得到比常规矩形窗的结果明显要好的结果。

6 结 论

本文对作者提出的基于三幅图的等值线窗口相关干涉法的配准方法和相位图生成方法进行了系统的介绍和扩展。实际数据处理结果证明三幅图配准方法配准精度优于传统基于相关系数的配准方法,而三幅图 CCI 相位生成方法也明显优于传统共轭相乘方法,是一种全新概念的 InSAR 数据处理方法。用本文方法得到的相位结果不仅几乎不含斑点噪声,并且能完整地保持条纹信息,没有模糊效应。而传统方法在抑制斑点噪声的同时都难免会模糊信号。虽然 CCI 方法相对于传统方法过程较为复杂,但是它得到的相位图不含斑点噪声,省去了后续的滤波处理。

更重要的是,本文的配准法和干涉相位图生成方法一起构成了完整的仅用三幅图的 InSAR 数据处理方法。对于星载 InSAR 系统,如果成像过程在卫星上完成,则只需要向地面传输四个子图中的任意三个就可以完成 InSAR 数据处理,大大降低了数

据传输量,对于星载 InSAR 数据的传输和处理具有重要意义。CCI 方法的一个关键步骤是等值线窗口的求取,将针对如何进一步自适应、高效率、高精度地确定等值线窗口深入研究。

参 考 文 献

- 1 Paul A. Rosen, Scott Hensley, Ian R. Joughin. Synthetic aperture radar interferometry [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, **88**(3):~
- 2 R. Bamler, P. Hartl. Synthetic aperture radar interferometry [J]. *Inverse Problem*, 1998, **14**:1~54
- 3 Jong-Sen Lee, K. P. Papathanassiou, T. L. Ainsworth *et al.*. A new technique for noise filtering of SAR interferometric phase images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**(5):~
- 4 Andriyan Bayu Suksmo, Akira Hirose. Adaptive noise reduction of InSAR images based on a complex-valued MRF model and its application to phase unwrapping problem [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(3):~
- 5 Giancarlo Ferraiuolo, Giovanni Poggi. A bayesian filtering technique for SAR interferometric phase fields [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **13**(10):~
- 6 Qifeng Yu, Sihua Fu, Xiaolin Liu *et al.*. Single-phase-step method with contoured correlation fringe patterns for ESPI [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(20):4980~4985
- 7 Qifeng Yu, Sihua Fu, Helmut Mayer *et al.*. Co-registration based on three parts of two complex images and contoured windows for synthetic aperture radar interferometry [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* (to be published)
- 8 Qifeng Yu, Sihua Fu, H. Mayer. Generation of speckle-reduced phase images from three complex parts for SAR interferometry [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**:114106
- 9 Qifeng Yu. Spin filtering process and automatic extraction of fringe center-lines from interferometric patterns [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(18):3782~3784
- 10 Qifeng Yu, X. Sun, X. Liu. Spin filtering with curve windows for interferometric fringes [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**:2650~2654
- 11 Qifeng Yu, Xia Yang, Sihua Fu *et al.*. An adaptive contoured window filter for interferometric synthetic aperture radar [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, **4**(1):23~26
- 12 M. Kass, A. Witkin. Analyzing oriented patterns [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1987, **37**(3):362~385
- 13 P. Perona. Orientation diffusions [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1998, **7**(3):457~467
- 14 Howard A. Zebker, Fellow, IEEE, Katherine Chen. Accurate estimation of correlation in InSAR observations [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, **2**(2):~
- 15 J. C. Dainty. *Laser Speckle and Related Phenomena* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1975. Chap. 2
- 16 Richard M. Goldstein, Charles L. Werner. *Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications* [M] California: Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 1998