

干涉合成孔径雷达数据处理实现方法¹

黄 岩 徐华平 陈 杰 李春升 李景文 周荫清

(北京航空航天大学电子工程系 203 教研室 北京 100083)

摘 要 本文提出了干涉合成孔径雷达 (INSAR) 从 SAR 单视复图像到非模糊相位图的一种实用数据处理方法。详细讨论了其中的去平地相位、相位图噪声抑制、相位展开等的实现方法,并用 ERS-1/2 的真实 SAR 图像数据验证该方法的有效性。

关键词 干涉合成孔径雷达, 干涉相位图噪声抑制, 相位展开

中图分类号 TN957.7, TN958

1 引 言

干涉合成孔径雷达 (INSAR) 是在合成孔径雷达 (SAR) 基础上发展起来的一种新技术。它是由 Graham 首先在 1974 年提出^[1], 应用于月球和火星表面探测。80 年代中期, INSAR 技术在美国 JPL 实验室 Goldstein 等科学家的带领下发展起来。近几年来, 由于 INSAR 在地形图成像、数字高度模型建立、斜度测量、变化检测、分类、环境监测、行星探测及极地研究等方面有广阔的应用前景, 因此发展很快。

SAR 干涉不同于传统的光学干涉, 它是由具有视角差的两部天线观测同一地面区域, 得到具有相关性的两幅 SAR 图像, 通过计算干涉后的非模糊相位, 可以得到观测区域地形高度或地表的变化等。SAR 干涉还可以通过一部天线的重复飞行来实现。

最典型的 INSAR 用于测高的空间几何关系如图 1 所示。图中 A_1, A_2 分别表示两部天线或一部天线的两次飞行, r 表示斜距, θ 表示雷达视角, B 表示基线, ξ 表示基线倾角。地形高度 z 的表达式为

$$z = H - r[\cos \xi \sqrt{1 - \sin^2(\theta - \xi)} - \sin \xi \sin(\theta - \xi)]. \quad (1)$$

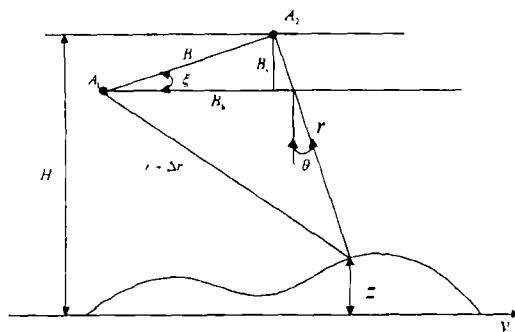


图 1 典型 INSAR 测高空间几何关系

¹ 1998-10-26 收到, 1999-06-05 定稿
国家“863 计划”资助项目

其中

$$\sin(\theta - \xi) = \frac{(r + (\lambda/4\pi)\psi)^2 - r^2 - B^2}{2rB}. \quad (2)$$

ψ 是由天线 A_1, A_2 得到的两幅 SAR 图像的非模糊干涉相位, 可见, 在雷达参数已知时, 只要得到干涉相位的非模糊解, 就可以求得地形高度。

INSAR 数据处理的基本过程包括基线确定和非模糊相位确定。本文中仅给出其中的非模糊相位的确定过程, 即从单视 SAR 图像到非模糊相位图的数据处理过程。主要步骤有: SAR 图像预览, 图像配准, 干涉图产生, 平地相位去除, 相位图噪声抑制和相位展开。

2 INSAR 数据处理实现方法

2.1 图像预览

一般的地面场景是非平稳的, 两幅 SAR 图像之间的相关系数不是一个常数, 它随像素点的不同变化很大。通过求相关系数图, 浏览所有数据的相关性, 选取相关系数大的可靠区域, 可以更好地进行图像配准和相位展开处理。

设两幅 SAR 图像分别表示为

$$z_1(m, n) = a_1(m, n)e^{j\phi_1(m, n)}, \quad z_2(m, n) = a_2(m, n)e^{j\phi_2(m, n)}, \quad (3)$$

其中 $m = 0, 1, 2, \dots, M-1, n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, 图像大小为 $M \times N$ 。两幅图像之间的相关系数 γ 为 [2]

$$\gamma = \frac{|E(z_1 z_2^*)|^2}{\sqrt{E(|z_1|^2)E(|z_2|^2)}}. \quad (4)$$

可以认为在较小范围内, 信号具有各态历经性, 用空间平均代替集平均, γ 的估计为

$$\hat{\gamma}(m, n) = \frac{\left| \sum_{l=-(L-1)/2}^{(L-1)/2} \sum_{k=-(K-1)/2}^{(K-1)/2} z_1(m+l, n+k) z_2^*(m+l, n+k) e^{-j\phi(m+l, n+k)} \right|}{\sqrt{\sum_{l=-(L-1)/2}^{(L-1)/2} \sum_{k=-(K-1)/2}^{(K-1)/2} |z_1(m+l, n+k)|^2 \sum_{l=-(L-1)/2}^{(L-1)/2} \sum_{k=-(K-1)/2}^{(K-1)/2} |z_2(m+l, n+k)|^2}} \quad (5)$$

上式中 $L \times K$ 为估计窗口的大小; $\phi(m, n)$ 表示两幅图像间的干涉相位。一般利用功率图的相关系数 ρ 来求 γ , 大大减少由于 ϕ 存在引起的大运算量。 γ 和 ρ 之间的关系式为

$$\hat{\gamma}(m, n) = \begin{cases} \sqrt{2\hat{\rho}(m, n) - 1}, & \hat{\rho}(m, n) > 0.5; \\ 0, & \hat{\rho}(m, n) \leq 0.5. \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\hat{\rho}(m, n) = \frac{\sum_{l=-(L-1)/2}^{(L-1)/2} \sum_{k=-(K-1)/2}^{(K-1)/2} |z_1(k+m, l+n)|^2 \cdot |z_2(k+m, l+n)|^2}{\sqrt{\sum_{l=-(L-1)/2}^{(L-1)/2} \sum_{k=-(K-1)/2}^{(K-1)/2} |z_1(k+m, l+n)|^4 \cdot \sum_{l=-(L-1)/2}^{(L-1)/2} \sum_{k=-(K-1)/2}^{(K-1)/2} |z_2(k+m, l+n)|^4}} \quad (7)$$

2.2 图像精配准

用来干涉的两幅 SAR 图像的像素并不点对应, 大大降低了图像间的相关程度。通过图像配准可以提高图像间的相关性, 获得高质量的干涉图。ERS-1 和 ERS-2 的轨道基本平行, 两幅图像的偏移量不随方位向改变。在配准区域较小时, 图像的精配准参数有: 距离向偏移量和方位向偏移量。

相关系数是 INSAR 中衡量干涉图像质量的一个重要指标, 它的大小直接反应了干涉图信息的可靠程度。所以可以用相关系数最大化的方法确定配准参数。基本步骤为: 在两幅复图像中用 $E \times E$ 的窗口选取对应的区域 (E 的大小根据实际情况而定); 通过移动第二幅图像中窗口的位置, 根据相关系数最大化的原则确定第一偏移量; 在第一偏移量的邻域内差值确定第二偏移量; 按照得到的距离和方位向偏移量 (第一偏移量加第二偏移量), 对第二幅图像在距离和方位向上进行重新插值采样实现精配准。

由 INSAR 的空间几何关系可以得知, 距离向上图像之间的偏移量与像素点位置成二次关系。在配准区域较大时, 需要确定的距离向配准参数为距离向尺度因子。改变窗口的初始位置, 得到不同距离坐标上对应的距离向偏移量; 用二次曲线拟合, 确定距离向尺度因子, 然后根据距离向尺度因子和方位向偏移量对第二幅图像插值重采样。

2.3 去平地相位

INSAR 干涉复图像是用精配准后的两幅 SAR 图像共轭相乘得到的。直接由干涉复图像得到的干涉相位图是关于 2π 模糊的, 它由两部分组成: 一是地形相对高度引起的相位成分; 另一部分是由平地引起的。如图 2, 平地相位 ψ_p 与距离 Δx 之间的关系可近似表示为

$$\psi_p = [(x_0^2 + R_2^2)^{-1/2} - (x_0^2 + R_1^2)^{-1/2}] \frac{4\pi x_0}{\lambda} \cdot \Delta x, \quad (8)$$

其中 λ 是雷达工作波长, x_0 是地面测绘带距地面航迹的最短距离。

平地相位的存在, 增加了相位展开的困难, 在相位图中减去 (8) 式所给出的平地相位就可以实现去平地相位。去掉的平地相位在相位展开后要加回到非模糊相位图中。在系统参数不能准确知道时, 一种近似的方法是通过对于干涉复图像进行距离向 FFT, 检测距离向主要干涉条纹的频率, 在相位图中加上相应的补偿量去除平地相位。

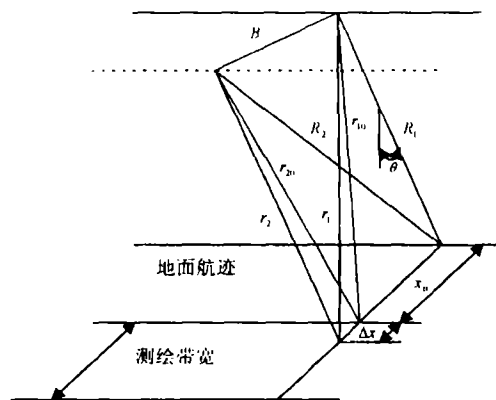


图 2 平地相位几何关系图

2.4 干涉相位图的噪声抑制

INSAR 中最有效的抑制统计噪声的方法是图像域多视平均。由于多视处理会造成图像空间分辨率的降低,当分辨率低于一定门限时,相邻像素的相位差超过 π ,使相位展开无法正常进行,所以在 INSAR 的多视平均降噪时,平均视数必须小于一定的极限值,即极限视数。

多视平均对干涉相位图中噪声的抑制是非常有限的。为了进一步降低相位图中的噪声,需要对相位图进行非线性滤波^[3]。由于干涉相位分布的周期性,采用一种模糊的中值滤波方法对干涉相位图进行降噪处理。模糊中值滤波的表达式如下:

$$\mu_M(f(x)) = [f(x) - v] + \underset{l}{\text{median}}\{f(y) + [v - f(x)] : y \in M_x \cap T\}. \quad (9)$$

T 代表待处理的整幅图像, v 是图像 T 上所有点的值域的中值, $\underset{l}{+}$ 表示模 l 加运算,

M_x 是一个 3×3 的模板,中心在 x 点。将式 (9) 用于模糊的相位图得

$$\mu_M(\phi(i, j)) = \phi(i, j) + \underset{2\pi}{\text{median}}\{\phi(m, n) - \phi(i, j) : (m, n) \in M_{i,j} \cap \Phi\}. \quad (10)$$

2.5 相位展开

消除平地效应后的相位图,仍然是被 2π 所模糊的,通过相位展开可以恢复出真实相位。在现有的相位展开方法中,最小均方 (LMS) 法是最理想的。它的主要思想是使相位展开后的相位相对于真实相位的均方误差最小,可以通过 FFT 简单有效地实现。该方法一般分为瞬时频率估计和非模糊相位求解两步。瞬时频率的估计通过最大似然 (ML) 法实现, ML 法是一种很好的估计方法,在干涉图信噪比足够大时,它的估计偏差可以达到克拉美罗界^[4]。估计出瞬时频率后,利用 (11) 式^[5] 就可以求解非模糊相位。

$$\Psi_{m,n} = \frac{P_{m,n}}{2 \cos(\pi m/M) + 2 \cos(\pi n/N) - 4}, \quad (11)$$

其中 $P_{m,n}$, $\Psi_{m,n}$ 分别是 $p_{i,j}$, $\psi_{i,j}$ 的傅里叶变换。 $p_{i,j} = S_{i,j}^x - S_{i-1,j}^x + S_{i,j}^y - S_{i,j-1}^y$, $S_{i,j}^x$, $S_{i,j}^y$ 分别表示距离和方位向的瞬时频率, $\psi_{i,j}$ 是非模糊相位值。

LMS 相位展开算法中需要准确估计瞬时频率和正确确定非模糊相位求解的边界。

2.5.1 瞬时频率估计 由于所处理的是山区地形,用 ML 方法估计瞬时频率的准确度受回波信号的调幅效应影响非常严重,采用幅度归一化的方法对 SAR 图像数据进行去调幅处理。

在去掉调幅效应的干涉复图像中用 ML 方法估计 IF: 用一个 FFT 模板处理图像,估计每一像素点处的瞬时频率值。得到的瞬时频率值比较粗略,还需用半牛顿法来精确估计瞬时频率值^[6]。

2.5.2 非模糊相位求解中的边界问题 最小均方法相位展开算法中的边界问题的正确解决是一个关键的技术。利用周期扩展可以简化纽曼边界条件的确定。国内外现有的文献中仅给出了图像大小为 $(2^N + 1) \times (2^M + 1)$ 的相位展开算法。经过仿真数据证实,采用迭代的镜像周期扩展方法可以实现任意大小图像的 LMS 法相位展开。

3 数据处理结果

通过预览 ERS-1/2 在某一山区的 SAR 图像数据, 找出相关系数较大的几幅图像区域进行处理。图 3 是其中一个区域的干涉幅度图, 图 4 是对应的相位图。图 5 是对图 4 采用近似的方法去平地相位后的结果, 可以看出, 山区地面场景的干涉相位的平地相位比较小, 平地效应不明显, 所以后面的处理可以直接对图 4 进行。图 6 是干涉相位图经过模糊中值滤波后的图像, 很明显地抑制了相位图中的噪声。图 7 是利用最小均方法对图 6 进行相位展开的结果, 基本上反映了测试地形的高度变化。

本文中所给出的图像采用了距离向 2 点、方位向 10 点的多视平均, 满足极限视数的要求。

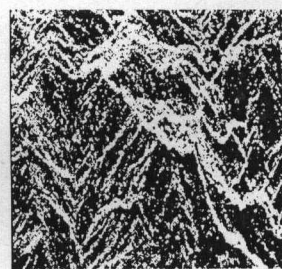


图 3 干涉幅度图

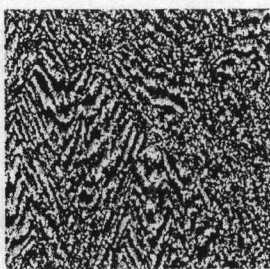


图 4 干涉相位图

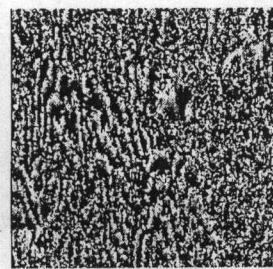


图 5 去平地后的相位图



图 6 噪声抑制后的相位图

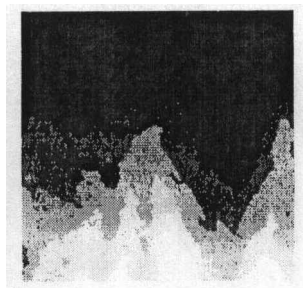


图 7 LMS 法得到的非模糊相位图

4 结束语

本文详细研究了 INSAR 数据处理中相关系数计算、图像配准、平地相位去除、相位图噪声抑制、相位展开的实现方法。提出了多视平均降噪处理中极限视数的概念, 给出了 LMS 相位展开中边界问题的解决方法。最后利用 ERS-1/2 在某一山区相隔一天的 SAR 图像成功地实现了 INSAR 中从 SAR 单视复图像到非模糊相位图的数据处理过程, 得到了基本能够反应地形高度的非模糊干涉相位图。

参 考 文 献

- [1] Graham L C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. Proc. IEEE, 1974, 62: 763-768.

- [2] Guarnieri A M, Prati C. SAR Interferometry: A "quick and dirty" coherence estimator for data browsing. *IEEE Trans. on Geoscience Remote Sensing*, 1997, GRS-35(3): 660-669.
- [3] Candeias A L B, Mura J C, Dutra L V, Moreira J R. Interferogram phase noise reduction using morphological and modified median filters. *IGARSS'95, Florence, Italy: 1995*, 166-168.
- [4] Pritt M D, Shipman J S. Least-Squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's. *IEEE Trans. on Geoscience Remote Sensing*, 1994, GRS-32(3): 706-708.
- [5] Spagnolini U. 2-D phase unwrapping and instantaneous frequency estimation. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, GRS-33(3): 579-589.
- [6] Abatzoglou T. A fast maximum likelihood algorithm for frequency estimation of a sinusoid based on newton's method. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1985, ASSP-33(1): 77-89.

AN ALGORITHM FOR INTERFEROMETRIC SAR DATA PROCESSING

Huang Yan Xu Huaping Chen Jie Li Chunsheng Li Jingwen Zhou Yinqing

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Electron. Eng., Beijing 100083)

Abstract In this paper, an algorithm of generating INSAR unwrapped phase image from SAR single-look complex images is presented. Besides the general processing technique, this article focuses on the methods of flat-earth phase removal, phase noise reduction and phase unwrapping. The availability is tested by the results of processing ERS-1/2 SAR images.

Key words Interferometric synthetic aperture radar, Interferometric phase noise reduction, Phase unwrapping

黄 岩: 女, 1972 年生, 博士生. 主要从事信息获取与处理, 高分辨率雷达成像, 干涉 SAR 等方面的研究工作.

徐华平: 女, 1977 年生, 硕士生. 主要从事信息获取与处理, 干涉 SAR 等方面的研究工作.

陈 杰: 男, 1973 年生, 博士生. 主要从事信息获取与处理, 雷达系统分析, 高分辨率雷达成像等方面的研究工作.

李春升: 男, 1963 年生, 副教授, 博士. 主要从事信号与信息处理, 高分辨率雷达成像, 雷达系统仿真, 时空二维自适应信号处理, 等方面的研究工作.

李景文: 男, 1964 年生, 副教授, 博士. 主要从事信号与信息处理, 雷达系统仿真, 高分辨率雷达成像, 电子对抗等方面的研究工作.

周荫清: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师. 主要从事信号与信息处理, 雷达系统仿真, 高分辨率雷达成像, 电子对抗, 时空二维自适应信号处理等方面的研究工作.