

利用线性相位模型提高干涉 SAR 图像相干性及改进相干性估计

朱岱寅, 朱兆达

(南京航空航天大学电子工程系, 江苏南京 210016)

摘要: 本文提出一种对干涉合成孔径雷达(干涉 SAR)处理中单视复图像(SLC)进行地形自适应预滤波的方法,提高从不同入射角获得的 SAR 图像之间的空间相干性,并同时改进相干性估计.通过 Chirp Z 变换进行干涉图局部频率估计,从而提取干涉图线性相位模型,并利用其进行距离和方位向的地形自适应预滤波.由于滤波器参数随地形进行调整,其性能优于仅仅依赖轨道参数或平坦地球相位估计的固定带宽非自适应滤波器.文中对 SIR-C/X-SAR 的 Etna 火山干涉数据同时进行了距离和方位向地形自适应处理,利用相干系数直方图对该方法与固定带宽非自适应滤波方法的性能作了比较.最后,本文还应用线性相位模型改进相干性估计,得到了去除地形变化因素后的相干系数图.

关键词: 干涉合成孔径雷达(干涉 SAR); 线性相位模型; 预滤波; 地形自适应滤波器; 相干系数估计

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)09-1594-05

Improving the Coherence for InSAR Processing and Coherence Estimation Using the Linear Phase Model

ZHU Dai yin, ZHU Zhao da

(Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: A topography adaptive filter is proposed to improve the coherence of single look complex (SLC) images obtained from different looking angles for interferometric synthetic aperture radar (InSAR) processing, and to improve the coherence estimation as well. The extraction of the linear phase model of the interferogram via local frequency estimation based on the 2-D Chirp Z transform makes this filter topographically adaptive both in range and azimuth. Adjusting the filter parameters according to the local topography, the adaptive filter performs better than the fixed bandwidth non adaptive one designed through flat earth phase estimation. Interferometric data set of Mt. Etna is processed topographically adaptively in range and azimuth, and the results are employed for the comparison of the performances of the proposed and conventional filters. Finally, the linear phase model is also used to improve the coherence estimation by eliminating the topography variation in the estimator.

Key words: interferometric synthetic aperture radar (InSAR); linear phase model; prefiltering; topography adaptive filter; coherence estimation

1 引言

干涉 SAR 在大尺度遥感方面具有重要意义,该项技术能够有效地测量地形高度,并具有全天候、全天时的优点.干涉 SAR 信号处理是一个复杂的流程,包括 SAR 成像、图像配准、干涉图形成及预滤波、二维相位展开以及地理学编码.

在干涉图的形成过程中,单视 SAR 图像之间的相干性决定了干涉相位是否能够可靠反映地形高度,而相干性受到若干因素的影响:图像配准精度、接收机热噪声、时间和空间解相关^[1].时间解相关是在重复轨道干涉中,雷达在不同时间飞临同一目标区域,但目标已发生某种变化所引起的解相关效

应;而空间解相关是由获得二幅 SAR 图像时电磁波的入射角不同,即由轨道基线引起的视差造成的.轨道基线引起的解相关一方面归结于目标的电磁散射特性在不同视角下发生的变化,即体散射效应;另一方面,视角不同还使 SAR 图像在波数域发生偏移^[2],从而使地形本身也成为降低相干性的因素.但是,后者可以通过对 SAR 图像的波数域预滤波予以消除,本文主要着眼于这方面的研究.

2 干涉图线性相位模型的建立

干涉相位条纹的存在表明干涉图的频谱中心是偏离零频率点的,干涉相位的线性成分对应于形成干涉图的二幅 SAR

图像之间在频域上相互之间存在偏移量 $\Delta\omega$, 该偏移量由干涉 SAR 的几何关系以及地形坡度决定, 文 [2] 已从波数域的角度对此进行了推导.

如图 1 所示, 假设轨道相互平行, 天线 S_1 与 S_2 之间的基线长度为 B , 轨道高度为 H , θ 为入射角, h 为地面某点高度, α 为该处坡度角, 则波数域偏移为^[2]

$$\Delta k = \frac{4\pi B_{\perp} \cos(\theta - \alpha)}{\lambda r} \quad (1)$$

其中 B_{\perp} 为基线 B 在垂直于视线方向的投影, 即有效基线长度. 由于波数 k 与频率 ω 有如下关系,

$$k = \frac{2}{c} \omega \sin(\theta - \alpha) \quad (2)$$

距离向频谱偏移量为

$$\Delta\omega = \frac{2\pi c B_{\perp} \cos\theta}{\lambda r \tan(\theta - \alpha)} = \frac{2\pi c B_{\perp}}{\lambda r \tan(\theta - \alpha)} \quad (3)$$

由式(3)可知, 干涉 SAR 图像对之间的距离向频谱偏移量 $\Delta\omega$ 与局部地形坡度 α 以及斜距 r 有关, 因此在干涉图中 $\Delta\omega$ 是空变的, 而 $\Delta\omega$ 即为干涉图在距离向的局部频率. 基于以上分析, 我们可以通过对局部干涉图的频率估计得到干涉图上任意点处的 $\Delta\omega$. 干涉图的局部频率估计可以通过频谱分析实现, 频谱分析有多种方法, 二维傅立叶变换得到的结果是最大似然的^[3]. 在具体实现过程中, 为了降低二维 DFT 的量化效应, 减小估计结果的方差, 应采用补零二维 FFT. 但补零 FFT 计算量过大, 为解决这一问题, 我们采用二维 Chirp Z 变换估计局部干涉条纹的频率, 二维 Chirp Z 变换是对一维 Chirp Z 变换^[4]的扩展.

以 16×16 点的局部干涉图为例. 我们用 16×16 点 FFT 先找出频谱主瓣位置, 再通过 3 个 32×32 点 FFT 实现二维 Chirp Z 变换, 将主瓣内的频谱再细化 16 倍, 可以达到 256×256 点补零 FFT 的估计精度. 通过二维 Chirp Z 变换进行频率估计, 计算量仅为补零二维 FFT 的三分之一.

在计算二维傅立叶谱的同时, 可以对干涉图局部信噪比进行估计

$$SNR = \frac{\sum_{j, k \in w_s} \max(|S(j, k)|^2)}{\sum_{j, k \in w_s} |S(j, k)|^2 - \max(|S(j, k)|^2)} \quad (4)$$

$S(j, k)$ 是 w_s 范围内干涉图的频谱. 信噪比可作为衡量局部频率估计准确性的尺度. 如果在频率估计的同时得到的信噪比小于某一给定的门限, 则认为频率估计结果不可信, 并将估计窗口 w_s 增大一倍, 并再次计算信噪比. 如果重新计算的信噪比高于给定门限, 则采用新的频率估计结果, 否则将频率估计的结果置为零.

将干涉图分为小块, 对每一块分别用二维 Chirp Z 变换进行频率估计, 然后通过一阶近似用平面来代替局部干涉相位, 从而得到干涉图的线性相位模型

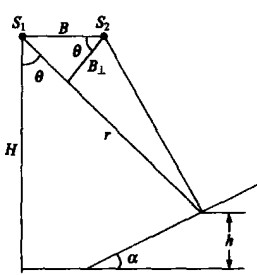


图 1 干涉 SAR 几何关系示意图

$$l_m(j, k) = e^{j2\pi(f_j + f_k)} \cdot \frac{\sum_{j, k \in w_s} I(j, k) e^{-j2\pi(f_j + f_k)}}{\left| \sum_{j, k \in w_s} I(j, k) e^{-j2\pi(f_j + f_k)} \right|} \quad (5)$$

其中, f_j, f_k 为通过二维 Chirp Z 变换得到的二维空间频率分量, 其中 f_j 对应于距离向频谱偏移量 $\Delta\omega, f_j = \frac{\Delta\omega}{2\pi F}$, 其中 F 为系统的距离向采样率. f_k 对应于方位向频谱偏移量. 方位向频率分量通常较小, 可由观测轨道不平行以及轨道方向的地面斜坡引起. 方位向频率分量对应于 SAR 图像对的方位向波数域偏移, 与距离向类似, 也会造成 SAR 图像对的解相关. 式(5)中 $I(j, k)$ 为被截取局部干涉图, 式(5)中第一个因子为一阶近似相位平面, 第二个分式因子为线性相位模型 $l_m(j, k)$ 的复常数部分.

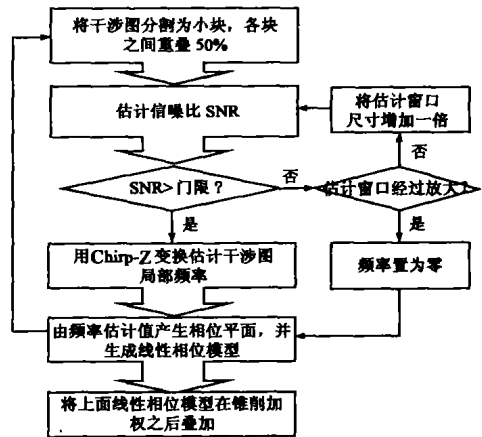


图 2 求取干涉图线性相位模型处理流程图

由于一阶近似和噪声导致频率估计不精确, 干涉图线性相位模型在局部干涉图边界处存在相位的不连续现象. 为了解决这一问题, 我们将频率估计的窗口相互重叠百分之五十, 并将估计所得相量在锥削加权之后重新进行叠加^[5-7]. 这一处理有效地消除了相位的不连续性, 并避免了对干涉图上每一点都进行频率估计, 因此可视作对分块估计结果的内插. 图 2 是上述求取干涉图线性相位模型的处理流程图.

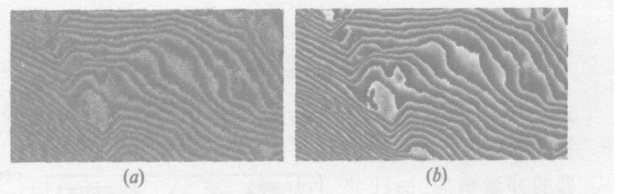


图 3 干涉图的线性相位模型, (a) 干涉图, (b) 图 (a) 的线性相位模型

图 3 是通过二维 Chirp Z 变换对整幅干涉图进行距离向频率偏移量估计得到的线性相位模型 l_m . 其中水平向为方位向, 垂直向为距离向, 由图中干涉条纹的走向可见距离向频率分量是干涉图中的主要频率分量.

3 单视 SAR 图像的地形自适应预滤波

由于 SAR 系统带宽有限, 图像波数域上的偏移使得从不同入射角获得的 SAR 图像反映地形复反射率频谱的不同部

分,因而用作干涉处理的 SAR 图像频谱存在非公共部分. 滤除频谱中的非公共部分可以减小空间解相关^[2]. 频谱偏移量与局部地形坡度有关,文[8]提出一种根据地形对 SAR 图像进行自适应处理的预滤波方法. 该方法将二幅 SAR 图像频谱朝相反方向移动,使非公共部分移至系统带宽之外后被截去. 由于对干涉图的局部频率进行了估计,频谱的移动量是根据局部地形自适应变化的. 文[8]中的方法是基于对干涉图局部频率的多分辨率估计,并且滤波仅限于距离向. 本文提出用干涉图的线性相位模型来实现地形自适应预滤波. 同时,由图 3 可见,观测轨道不平行或沿轨道方向的地面斜坡可引起 SAR 图像对方位向的波数域偏移,本节将基于干涉图线性相位模型的地形自适应滤波器同时应用于方位向处理,以克服方位向波数域偏移引起的 SAR 图像对解相关. 干涉图线性相位模型的提取已在上一节中作了介绍.

设 l_m 为干涉图线性相位模型,其瞬时频率对应于二幅单视 SAR 图像 S_1 和 S_2 的局部频谱偏移量. 按式(6)所示,二幅 SAR 图像分别乘以 l_m 及其共轭,

$$S'_1 = S_1 \cdot l_m^* \quad S'_2 = S_2 \cdot l_m \quad (6)$$

S'_1 和 S'_2 的频谱相对 S_1 和 S_2 发生移动,造成空间解相关的非公共部分已在系统带宽 W 之外. 再经过低通滤波,

$$S''_1 = S'_1 \odot h_p \quad S''_2 = S'_2 \odot h_p \quad (7)$$

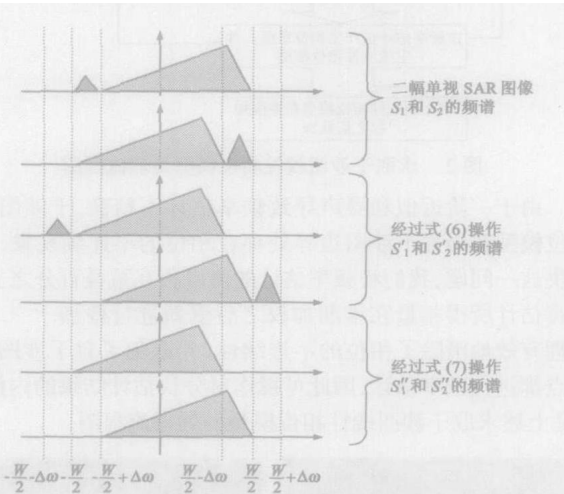


图 4 单视 SAR 图像的预滤波

去除单视 SAR 图像频谱中的非公共部分. 式(7)中 h_p 是通带宽度为 W 的低通滤波器的冲激响应, \odot 代表距离向的一维卷积. 图 4 是单视 SAR 图像的预滤波过程,其中大三角形代表频谱的公共部分,小三角形代表频谱的非公共部分. 由于 l_m 的瞬时频率随地形坡度不断变化,对 SAR 图像频谱的移动量也随局

部地形坡度变化,因而该滤波器是地形自适应的.

上述距离向的自适应滤波过程可以扩展至方位向,此时式(7)中 h_p 为二维低通滤波器,其距离向带宽为系统带宽 W ,方位向带宽为成像过程中所用的多普勒带宽. 下面我们通过对 SIR-C/X-SAR 录取的重复轨道 Etna 火山数据的处理,对上述距离以及方位向的地形自适应预滤波方法进行验证.

所选取二幅 Etna 火山 SAR 图像尺寸均为 1024×4067 点. 图 5(a) 为干涉图的幅度,图 5(b) 为干涉相位,图 5(c) 为由 (b) 提取的线性相位模型.

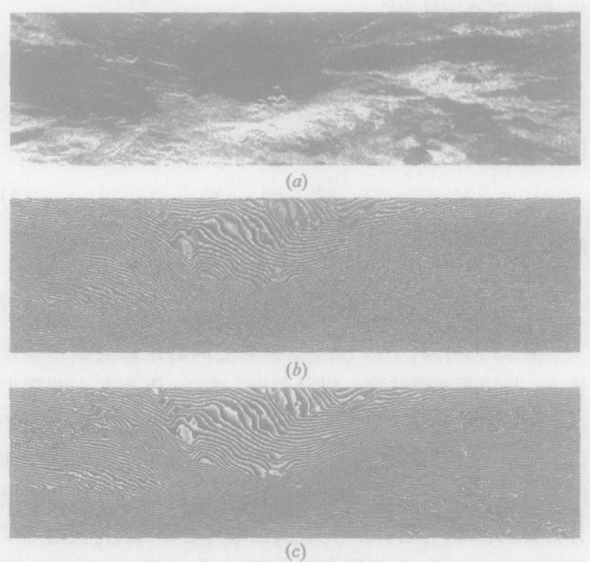


图 5 Etna 火山干涉图,垂直方向为距离向,水平方向为方位向, (a)干涉图幅度, (b)干涉相位, (c)线性相位模型

由频率分析可以得出本例中 SAR 图像对距离向平均频谱偏移量约为 1.5MHz,它粗略给出了 SAR 图像频谱中的非公共部分的频率范围,可以按照该偏移量对 SAR 图像进行预滤波. 这种固定带宽的滤波器是文[2]中提出的,但它忽略了实际情况下局部地形的变化,利用图 4 所示地形自适应预滤波过程能够进一步提高相关性. 下面,我们利用相干系数直方图对此进行验证. 相干系数按下面式(8)计算. 图 6(a) 为不采取预滤波和采取固定带宽预滤波所得相干系数直方图比较;图 6(b) 为固定带宽预滤波和距离向自适应预滤波所得相干系数直方图比较;图 6(c) 为只进行距离向自适应预滤波和距离、方位同时进行自适应预滤波所得相干系数直方图比较.

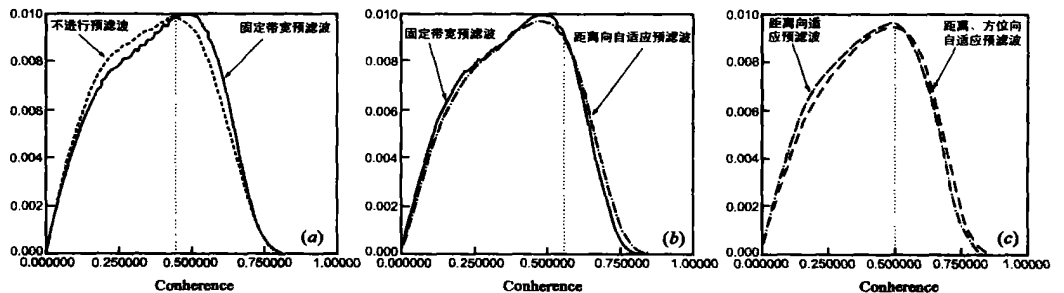


图 6 相干系数直方图, (a)不采取预滤波和采取固定带宽预滤波的比较; (b)固定带宽预滤波和距离向自适应预滤波的比较; (c)距离向自适应预滤波和距离、方位同时进行自适应预滤波的比较

在图 6(a) 中可见, 以 0.45 为分界点, 经过滤波后相干系数在分界点以上的像素数量增加, 而在分界点以下的像素数量减少. 这表明采用了预滤波后, 图像对的相干性得到提高. 图 6(b) 中, 当考虑了局部地形变化, 采用距离向地形自适应预滤波方法后, SAR 图像的相干性还可得到进一步改善, 相干系数大于分界点 0.55 的像素数量增加. 图 6(c) 中, 同时采用方位向自适应预滤波后, 相干系数大于分界点 0.55 的像素数量进一步增加.

4 基于线性相位模型的相干性估计

进行干涉处理的 SAR 图像对之间相干系数定义如下,

$$\gamma = \frac{|\sum_{j,k \in w} S_1(j,k) \cdot S_2^*(j,k)|}{\sqrt{\sum_{j,k \in w} |S_1(j,k)|^2 \cdot \sum_{j,k \in w} |S_2(j,k)|^2}} \quad (8)$$

其中, S_1 、 S_2 为经过预滤波的单视 SAR 图像, w 为进行相干性估计的矩形窗口. 相干系数可分解为三个因子的乘积^[1]

$$\gamma = \gamma_n \cdot \gamma_t \cdot \gamma_s \quad (9)$$

其中 γ_n 是由接收机热噪声引起的解相关; γ_t 是在重复轨道干涉 SAR 的情形下, 雷达在不同时间飞临同一目标区域, 而目标已发生某种变化所引起的时间解相关; γ_s 是由基线长度造成的空间解相关. γ 是衡量干涉图相位噪声功率的指标, 相干系数 γ 越大代表相位噪声功率越小, 因而干涉相位值反映的地形高度越准确.

以上式(8)中, 若不计相位噪声的影响, 则

$$S_2 = S_1 \cdot e^{-j\phi_T} \quad (10)$$

其中 ϕ_T 为干涉相位. 显然, 当窗口 w 中干涉相位值 $\phi_T(j,k)$ 为常数时, γ 等于 1. 但只有窗口尺寸较小, 且干涉相位变化缓慢时, w 中干涉相位值才能视为常数. 在地形陡峭处, ϕ_T 变化迅速, 即使忽略相位噪声, 应用式(8)估计相干系数时, $e^{j\phi_T(j,k)}$ 亦不能作为公因子从分子的求和号中提出, 故 γ 必然小于 1.

由以上分析可推知, 在相位噪声功率相同的条件下, 应用式(8)估计的相干系数, 在陡峭地形处值小于在平坦地形处的 γ 值. 因此, 式(8)中并不能直接反映相位噪声的功率, 而是同时受到作为信号的干涉相位 ϕ_T 的影响. 但是, 在相位展开过程中, 我们常以相位噪声功率衡量干涉相位值的可信度. 因此为了精确衡量干涉相位的质量, 必须在相干性估计中先去除干涉相位 ϕ_T 的影响.

$$\gamma = \frac{|\sum_{j,k \in w} S_1(j,k) \cdot S_2^*(j,k) \cdot e^{-j\phi_T}|}{\sqrt{\sum_{j,k \in w} |S_1(j,k)|^2 \cdot \sum_{j,k \in w} |S_2(j,k)|^2}} \quad (11)$$

由于受到上述 γ_n 、 γ_t 和 γ_s 的影响, 无法得到干涉相位 ϕ_T 的精确值. 若能得到 ϕ_T 的估计值 $\hat{\phi}_T$, 则经修正的相干系数 $\hat{\gamma}$ 为,

$$\hat{\gamma} = \frac{|\sum_{j,k \in w} S_1(j,k) \cdot S_2^*(j,k) \cdot e^{-j\hat{\phi}_T}|}{\sqrt{\sum_{j,k \in w} |S_1(j,k)|^2 \cdot \sum_{j,k \in w} |S_2(j,k)|^2}} \quad (12)$$

在实际的干涉 SAR 信号处理中, 如果事先拥有被测量地区以其他方式(如光学)得到的地形高度图(DEM), 则干涉相

位的估计值 $\hat{\phi}_T$ 可以从已有 DEM 中得到. 否则, 为了减小对相干系数的估计误差, 可以在干涉 SAR 处理流程中引入迭代机制, 从干涉 SAR 的最终产品 DEM 中获得 $\hat{\phi}_T$, 但通过迭代方式来评价干涉相位质量显然代价太高. 因此, 必须寻求其他较为简单的方式来获得 $\hat{\phi}_T$. 如式(13)所示, 以平坦地球相位 ϕ_E 来代替 $\hat{\phi}_T$, 能够缓解估计值偏低的缺陷.

$$\hat{\gamma}' = \frac{|\sum_{j,k \in w} S_1(j,k) \cdot S_2^*(j,k) \cdot e^{-j\phi_E}|}{\sqrt{\sum_{j,k \in w} |S_1(j,k)|^2 \cdot \sum_{j,k \in w} |S_2(j,k)|^2}} \quad (13)$$

但是, 由于平坦地球相位只是整幅干涉图干涉相位中的平均线性分量, 式(13)的结果仍然偏低, 尤其在局部地形变化剧烈的地方更为如此.

线性相位模型 l_m 是从干涉相位图中提取的, 如图 3(b) 和图 5(c) 所示, l_m 能够可靠反映地形的变化. 为得到更加可靠的干涉相位质量图, 我们用线性相位模型 l_m 代替 $\hat{\phi}_T$, 并进行相干系数估计. 则式(12)成为

$$\hat{\gamma}' = \frac{|\sum_{j,k \in w} S_1 \cdot S_2^* \cdot l_m|}{\sqrt{\sum_{j,k \in w} |S_1|^2 \cdot \sum_{j,k \in w} |S_2|^2}} \quad (14)$$

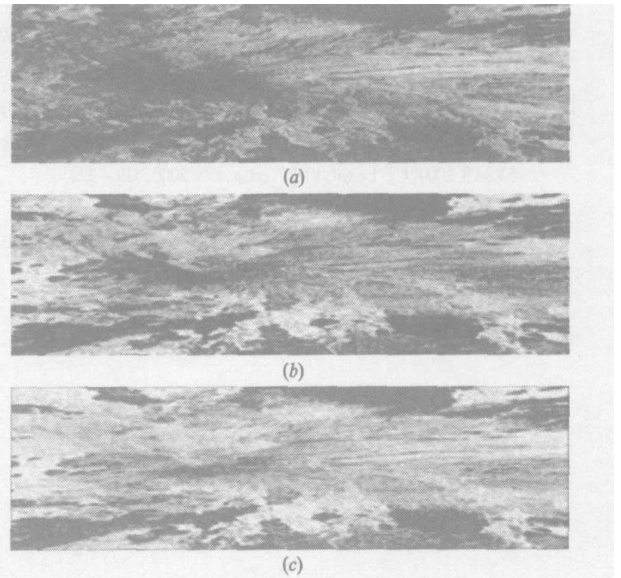


图 7 Etna 火山干涉数据相干性图, (a) 按照式(8)的估计结果; (b) 按照式(13)的估计结果, 去除平坦地球相位; (c) 按照式(14)的估计结果, 去除干涉图的线性相位模型

由于基本去除了 ϕ_T 的影响, 由式(14)所得相干性系数的估值应大于由式(13)所得结果. 图 7 是分别根据式(8)、(13)、(14)得到的相干性估计结果, 它们的均值逐次递增. 参照图 5(b) 可以看到, 在干涉条纹密集处, 即地形陡峭处, 图 7(c) 中相干系数值明显高于图 7(a) 和 (b), 可见利用式(14)能够更可靠地反映干涉相位的可信度.

5 结论

本文提出一种利用线性相位模型对干涉 SAR 处理中单视图像同时进行距离和方位向自适应预滤波, 以提高 SAR 图像相干性并可同时改进相干性估计的方法. 经过实测数据检

验,该方法能够比传统的固定带宽非自适应滤波方法进一步提高图像的相干性,从而更有利于后续的干涉 SAR 信号处理.由于采用 Chirp Z 变换进行条纹检测,滤波器计算效率较高.同时,由于在相干系数估计中利用线性相位模型事先去除了地形起伏的影响,所得的相干系数能够更加可靠地反映干涉相位的精确度.

致谢 作者感谢德国宇航院提供 X SAR 干涉数据.

参考文献:

- [1] H Zebker, J Villaseñor. Decorrelation in interferometric radar echo[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Sept. 1992, 30(5): 950-959.
- [2] F Gatelli, A Guarnieri, F Parizzi, P Pasquali, C Prati, F Rocca. The wave number shift in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, July 1994, 32(4): 855-865.
- [3] S M Kay. Modern Spectral Estimation: Theory and Application[M]. Englewood Cliffs, N J: Prentice Hall, 1988.
- [4] A V Oppenheim, R W Schaffer. Digital Signal Processing[M]. New Jersey: Prentice Hall, INC., Englewood Cliffs, 1975.
- [5] R Goldstein and C Werner. Radar ice motion interferometry[A]. Proc. 3rd ERS symp on Space at the Service of Our Environment[C]. Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, ESTEC, March 1997. 969-971.
- [6] D Y Zhu, R Scheiber, Z D Zhu. Impacts of an efficient topography adaptive filter on coherence estimation and phase unwrapping[A]. Proc EUSAR 2000[C]. Dertin: VDE Verlag, May 2000. 319-322.

- [7] 朱岱寅,朱兆达,谢求成.一种基于局部频率估计的地形自适应干涉图滤波器[J].电子学报,2002,30(12):1853-1856.
D Y Zhu, Z D Zhu, Q C Xie. A topography adaptive Interferogram filter based on local frequency estimation[J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2002, 30(12): 1853-1856. (Chinese Source)
- [8] G W Davison, R Bamler. Multiresolution phase unwrapping for SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Jan 1999, 37(1): 163-174.

作者简介:



朱岱寅 男,1974年7月出生于江苏省无锡市,1996年本科毕业于东南大学无线电工程系,1998年和2002年于南京航空航天大学电子工程系分别获硕士和博士学位.现为南航电子工程系副研究员,IEEE会员,研究方向为:雷达信号处理. E-mail: zhudy@nuaa.edu.cn.



朱兆达 男,1939年3月出生于山东省青岛市,1960年毕业于南京航空学院.现为南京航空航天大学电子工程系教授、博士生导师,中国电子学会会士,IEEE高级会员,研究方向为:雷达信号检测与处理. E-mail: zzdec@nuaa.edu.cn.