

文章编号: 1008-2786-(2020)6-926-09

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000568

# 植被及坡度对 SAR 干涉相干性的影响分析

余祥伟<sup>1,2</sup>, 薛东剑<sup>1\*</sup>, 陈凤娇<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059; 2. 四川省冶金地质勘查院, 成都 610051)

**摘 要:** 相干性是雷达干涉测量的基础, 直接影响数据处理的难度和地形提取的精度, 其研究对完善 InSAR 相干性分解模型及改进形变解算方法具有重要意义。本文从分析地表目标对雷达波束的后向散射特征出发, 以灰色关联分析及建模分析相结合, 重点研究了植被及坡度两个关键去相干源对相干性的影响。以 C 波段的哨兵 1A TOPS 模式数据验证了两个因素对干涉测量的限制, 在统计分析的基础上, 利用灰色关联度探讨了植被、坡度对相干性损失的贡献比例及影响规律, 利用采样点建立了植被、坡度与相干性的函数关系, 模拟出了三者的经验关系模型并进行了验证。研究发现: (1) 植被是高覆被山区 SAR 影像空间失相干的主导因素, 相干性和植被覆盖度之间呈幂函数关系, 相关系数为 0.5812; (2) 相干性随坡度增加平稳衰减, 且两者为反比例函数关系, 相关系数为 0.8027; (3) 模型预估两个特征差异区域的相干性与短时间基线影像间的实际相干性接近, 平均绝对误差均低于 0.14。本文研究对理解干涉测量条件, 完善 InSAR 相干性估计方法以及指导 InSAR 数据选取及参数配置具有一定的参考价值。

**关键词:** InSAR; 空间失相关; 地表起伏; 植被覆盖区; 数值模拟; 相关分析

**中图分类号:** TP70

**文献标志码:** A

合成孔径雷达干涉测量技术 (InSAR, Interferometric Synthetic Aperture Radar) 因具有高分辨率、动态监测和连续空间覆盖的能力, 已被广泛应用于地形测量、形变监测等领域<sup>[1-2]</sup>。但由于该技术的复杂性, 干涉测量的性能仍然受到众多因素的制约, SAR 像对的失相干就是阻碍因素之一<sup>[3-4]</sup>。SAR 像对的相干性是指两次雷达回波中蕴含的相位信息和强度信息的相似程度, 且是干涉测量地形和形变的基本条件及处理前提<sup>[5]</sup>, SAR 影像干涉相干性受到许多因素的影响, 例如: 时空基线、多普勒质心偏移及复图像配准误差等, 这些因素严重制约了 InSAR 技术的应用<sup>[6]</sup>。研究去相干因素对相干

性的影响, 完善 InSAR 相干性分解模型, 已成为雷达遥感的一个研究热点。许多学者<sup>[7-12]</sup>对此展开了研究, 发现相干性与时空基线长度的变化成反比关系, 且时间基线的影响随机, 难以定量描述; 雷达系统热噪声造成的失相干分量比例固定, 主要受系统增益及天线特征的影响; 方位向多普勒质心偏移引起的失相干很小, 可用方位向滤波或拟合多普勒函数予以消除; 数据处理引起的相干性损失主要包括复图像的配准去相关、插值误差去相干等, 该分量可通过改进算法予以修正; 而形变梯度过大所致的失相干区也可用自适应局部克吕格技术、正反演技术等进行恢复。然而上述研究多侧重于系统特征、

收稿日期 (Received date): 2019-05-31; 改回日期 (Accepted date): 2020-12-10

基金项目 (Foundation item): 四川省科技计划项目 (2019YJ0505); 国家重点研发计划子课题 (2018YFC0706003-1)。[The Science and Technology Plan Project of Sichuan (2019YJ0505); Sub-project of National Key R&D Program of China (2018YFC0706003-1)]

作者简介 (Biography): 余祥伟 (1994-), 男, 四川巴中人, 硕士研究生, 主要研究方向: 雷达干涉测量。[YU Xiangwei (1994-), male, born in Bazhong, Sichuan province, M. Sc., candidate, research on synthetic aperture radar interferometry] E-mail: 601119707@qq.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): 薛东剑 (1977-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 雷达图像处理及干涉测量。[XUE Dongjian (1977-), male, Ph. D., associate professor, specialized in radar image processing and interferometry] E-mail: xdj101@sina.com

数据组合及处理等造成的失相干,除这些影响因素之外,起伏地表不同位置的反射谱偏差及覆被地表引起的多路径散射、体散射效应均会造成相干性的衰减,分析这两个因素与相关性的关系十分必要。据成像参数和地表属性建立的坡度、植被散射物理模型<sup>[13-14]</sup>,由于定量参数获取困难,推广应用较困难。已有研究<sup>[15]</sup>统计了不同坡度和地类的相干性,定性分析了复杂山区的相干特征,但未考虑各因素的贡献度和综合作用。

为此,本文在分析起伏地表、覆被地表的后向散射特征的基础上,以 C 波段的哨兵 1A 星载 SAR 数据为例,利用灰色关联分析和统计分析相结合,综合分析局域坡度与地表覆被对相干性的影响规律,进而比较两个因素对相干性衰减的贡献率,总结覆被斜坡的相干性特征;利用采样点分析坡度、植被与相干性的函数关系,并建立三者的经验关系模型,最后,采用模拟数据和样点数据对模型进行了验证。本文的研究将为 InSAR 技术适用范围的划分和参数配置提供依据,有助于避免资源的浪费和推动 InSAR 的高效应用。

## 1 原理与理论分析

### 1.1 星载 SAR 干涉测量原理

星载 InSAR 技术是利用同一地区的具有相同观测几何的两幅单视复数影像构成干涉像对,根据干涉像对的相位差结合观测平台与观测点的几何关系(图 1),对相位差进行滤波、解缠等操作,提取出地表真实高程的技术。

$O_1$ 、 $O_2$  为 SAR 传感器对地面点  $p$  两次观测时的位置, $O_1$  与  $O_2$  之间的相对距离为空间基线  $B$  (m), $R_1$ 、 $R_2$  分别为  $O_1$ 、 $O_2$  到地面点  $p$  的距离(m), $\alpha$  为空间基线  $B$  与水平面的夹角( $^\circ$ ), $\theta$  为  $O_1$  的入射角( $^\circ$ )。在卫星的位置参数( $H$ , $B$ , $\alpha$ )、入射角  $\theta$  及  $O_1$ 、 $O_2$  位置所接受的回波解缠相位差  $\Delta\varphi$  已知的条件下,利用 InSAR 技术可测量获得较高精度的地面高程  $h$ 。

### 1.2 植被、坡度引起空间去相关

相干性作为衡量两个干涉信号的幅度和相位信息复杂相关的重要参数,与 InSAR 测量精度紧密相关<sup>[12-15]</sup>。假设地表为众多随机且分布均匀的散射点构成且满足一阶扭曲波近似,对于起伏不大的地块,

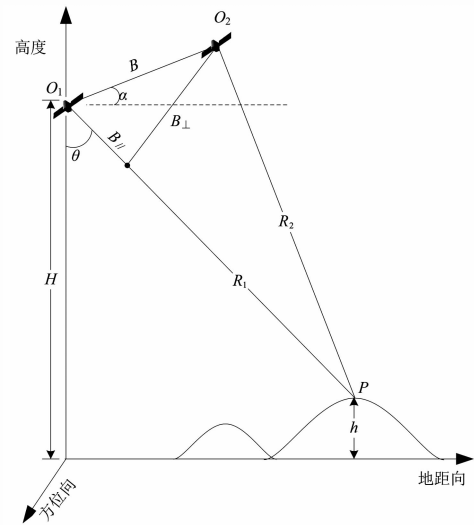


图1 InSAR 几何关系

Fig. 1 Geometrical relationship of InSAR

两个回波信号  $I_1$ 、 $I_2$  的相干系数 可以定义为<sup>[16]</sup>:

$$\gamma = \frac{|E(I_1 \cdot I_2^*)|}{\sqrt{E(|I_1|^2) \cdot E(|I_2|^2)}} \quad (1)$$

式中, $E$  代表信号值的数学期望;\* 表示复共轭。相干系数  $\gamma$  的值域为  $0 \sim 1$ , $\gamma$  的值越趋近于 1 表示两复数信号的相干程度越高,值越接近 0 代表两复数信号越不相干。在现实情况中,地表是复杂起伏的,散射体并不同质均匀,重复轨道星载 SAR 对地面目标观测的局部入射角也是不同的。这会导致 SAR 信号空间去相关,制约 InSAR 测量的效果。空间去相关( $\gamma_{\text{spatial}}$ )主要由局部坡度的面散射去相关( $\gamma_{\text{surface}}$ )和植被覆盖区的体散射( $\gamma_{\text{volume}}$ )去相关两部分组成:

$$\gamma_{\text{spatial}} = \gamma_{\text{surface}} + \gamma_{\text{volume}} \quad (2)$$

合成孔径雷达常采用斜侧视成像模式,成像区域的地势起伏会导致入射角( $\alpha$ )在斜坡的不同位置是变化的<sup>[17]</sup>(图 2a),进而导致 SAR 图像产生叠掩、阴影等失真区域。同时重复轨道星载 SAR 系统对同一区域进行多次观测的视角也存在差异,这造成了不同地形条件下的观测目标响应谱<sup>[18]</sup>的差异。这些因素共同作用致使经地表面散射回 SAR 系统的回波信号存在相对偏差,影像间的相干性小于 1。在植被覆盖区域,电磁波穿透散射介质引起的体散射会严重影响 SAR 像对的相干性<sup>[19-20]</sup>。一方面,植被在不同时期的特性差异造成回波信号的相似性衰减;另一方面,微波信号具穿透性,植被叶面、细

枝、树干等的后向散射特性不同,引起雷达信号的体散射,甚至是多路径散射(图 2b),使得影像斑点噪声增加,导致回波信号去相关。

前人对空间去相关的研究已有很多<sup>[8-13]</sup>,但这些研究主要关注空间基线的影响,对局部坡度和地表覆被损失相干性的量化分析有待深入,因此,本文以坡度(Slope)和植被覆盖度(Vegetation Fractional Coverage, VFC)为因子,定量分析其对相干性的影响,尝试建立坡度和植被指数与相干性的经验模型,综合分析覆被斜坡对雷达回波相干性的限制。

2 研究区与数据处理

选取广元地区的哨兵 1A 卫星 2017 年 5 月 21 日、2017 年 6 月 3 日的重复轨道干涉宽幅数据组成干涉像对,该成像模式影像的分辨率为 5 m × 20 m (距离向 × 方位向),SAR 数据的详细情况见表 1。

以广元市主城区 63.5 km × 54.5 km 矩形范围为本文研究区,SAR 影像覆盖区域在光学图像上的位置如图3所示。该区域为典型山地地形,地形起

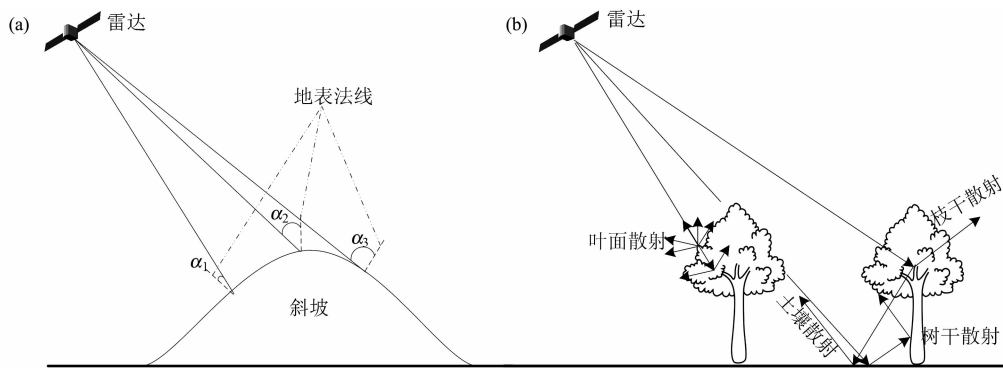


图 2 起伏地表的雷达波束散射特征(a)和植被的雷达波束散射特征(b)

Fig. 2 Radar beam scattering feature of irregular topography (a) and radar beam scattering feature of forest (b)

表 1 SAR 数据参数

Tab. 1 SAR data parameters

影像	成像模式	成像时间	入射角/(°)	空间基线/m	2π 模糊高程/m
SLC1	IW	2017 - 05 - 21	39.32	- 62.22	249.35
SLC2	IW	2017 - 06 - 03	39.31		

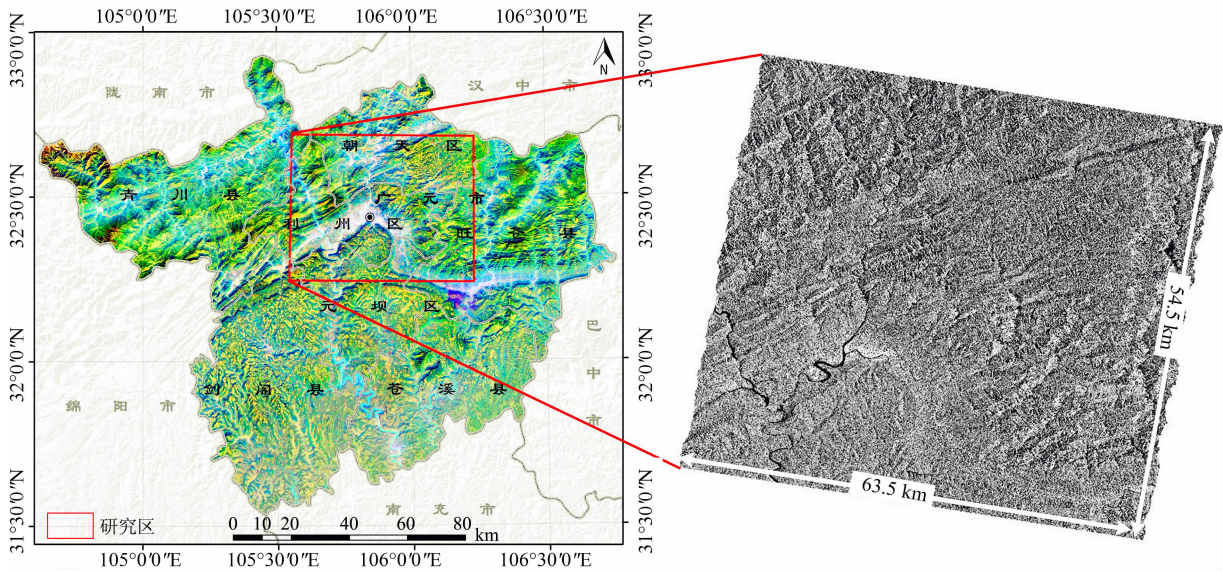


图 3 研究区位置图

Fig. 3 Location of study area

伏变化和高植被覆盖常导致干涉相位衰减,是造成 InSAR 测量精度低的主要因素。

选取干涉像对时间间隔范围内的 2017 年 5 月 26 日获取的 landsat-8 OLI 数据获取研究区的地表覆盖特征,该数据的空间分辨率为 30 m,云量为 3.2%。对数据进行辐射定标,大气校正等预处理后,利用像元二分模型<sup>[21]</sup>提取研究区的植被覆盖度因子(VFC);据 ASTER GDEM V2 产品提取出研究区的坡度因子(Slope);配准主从影像,计算干涉相干系数( $\gamma$ ),地理编码相干图。重采样植被覆盖度因子、坡度因子、相干系数图至 30 m × 30 m 空间分辨率并统一至 WGS-84 坐标系下,以植被覆盖度分布图为主参考影像选取控制点配准坡度分布图、相干系数图至亚像元偏差。

预处理的结果如图 4 所示,研究区的平均植被覆盖度为 0.55,最小植被覆盖度为 0,最大植被覆盖度为 1;平均坡度为 21.1°,最大坡度为 80°,最小坡度为 0;干涉像对的平均相干性为 0.324,相干性最小值为 0.176,最大值为 0.994,相干性较高的区域往往植被稀少且地势平坦。

### 3 植被、坡度对相干性的影响分析

#### 3.1 灰色关联分析

灰色关联分析常被用于衡量事件因素和行为因素之间的不确定关联度,通过对事件因素序列和主要行为序列的几何特征的对比分析来确定因素之间的影响程度或事件因素对主要行为的贡献度量<sup>[22]</sup>。该算法不受样本类型和概率分布的限制,已被广泛用于研究有限数据的信息关联问题。基本原理如下:

(1)统一事件因素、行为因素各指标的单位与

数量级。

(2)定义行为因素序列为  $X^0$ ;事件因素序列为  $X^i$ :

$$X^0 = [X^0(1), X^0(2), X^0(3), \dots, X^0(n)] \quad (3)$$

$$X^i = [X^i(1), X^i(2), X^i(3), \dots, X^i(n)],$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

(3)计算  $X^0$  和  $X^i$  在  $K$  点位置的灰色关联系数  $r$ :

$$r(X^0(k), X^i(k)) = \frac{X(\min) + \xi X(\max)}{\Delta^{0i}(k) + \xi X(\max)} \quad (5)$$

$$\Delta^{0i}(k) = |X^0(k) - X^i(k)| \quad (6)$$

$$X(\min) = \min_i \min_k \Delta^{0i}(k) \quad (7)$$

$$X(\max) = \max_i \max_k \Delta^{0i}(k) \quad (8)$$

式中,  $\xi$  为灰色分辨率系数,  $\xi \in (0, 1)$ , 据文献[23], 取  $\xi = 0.5$ 。  $r$  作为衡量参考因子和比较因子之间的灰色关联度(Grey Relational Grade, GRG), 其值越接近 1 时, 表示参考因子和比较因子的关系越密切。本文选取干涉像对的相干系数作为参考因子( $X^0$ ), 将研究区的植被覆盖度、坡度作为( $X^i$ ), 分别计算出覆被状况、局域坡度对干涉像对相干系数的灰色关联度  $r$ 。为比较不同空间局域差异, 将结果可视化灰色关联系数图(图 5)。

分析图 5 发现, 覆被程度与干涉像对相关性的 GRG 为 0.33 ~ 1.00, 平均值为 0.76; 局部坡度与干涉像对相干性之间的 GRG 为 0.36 ~ 1.00, 平均 GRG 为 0.62。这说明覆被状况对干涉 SAR 像对的空间失相干的影响大于局部坡度。GRG 较高的地区主要位于河谷城镇区域两侧的山地区域, 这些区域山势陡峭, 河谷深切, 相对高差为 600 ~ 800 m, 平均斜面坡度 21.11°, 平均植被覆盖度 52.62%。而低 GRG 区域主要分布在河谷的城镇区域, 其地势较平坦, 建筑物的散射特征稳定且主导像元属性, 使

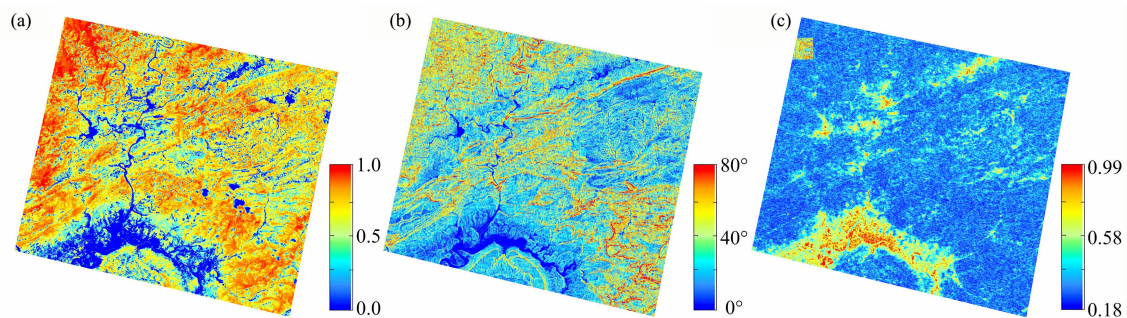


图 4 研究区的 VFC 指数图(a)、坡度分布图(b)及相关系数图(c)

Fig. 4 VFC index (a), slope (b) and coherence coefficient (c) of study area



得 SAR 影像间相干性保持较好。分别以  $10^\circ$  坡度和 10% 的植被覆盖度划分不同级别的坡度和覆被区域,对相干性及灰色关联度进行分析(图 6)可知,随着地面局部坡度和覆被程度的增加,SAR 像对的相干性逐步减小。覆被程度由 0~10% 变化到 30%~40% 时,SAR 像对的相干性锐减,两者的灰色关联度增加到最大值 0.85,而随着覆被程度的进一步增加,灰色关联度则逐渐减小,相干性衰减变慢。坡度变化引起相干性变化过程较为平滑。在坡度由  $0^\circ \sim 10^\circ$  变化到  $20^\circ \sim 30^\circ$  过程中,两者的灰色关联度逐步增加到峰值 0.80,随着坡度的进一步变化,灰色关联度下降,同时相干性衰减趋向稳定。

综上所述,在高植被覆盖的山区,植被覆盖程度相较于坡度对 SAR 干涉像对相干性的影响占主导地位,植被对相干性的影响呈阶段性,相干性衰减迅速阶段为覆被程度由 0~10% 变为 30%~40%,覆被程度进一步增加时,相干性衰减反而变缓。坡度对相干性的影响较为平稳,相干性随坡度的增加呈平滑衰减趋势。

### 3.2 建模分析

为进一步综合分析区域覆被和局部坡度与相干性的关系,文章在研究区随机选取 500 个地面样点,建立方程分别来模拟地表覆被、局部坡度对相干性的影响。利用  $3 \times 3$  窗口中值滤波消除采样点的随机噪声,多次迭代修正回归系数。

从图 7 可看出植被覆盖度和局域坡度与相干性均呈反向关系,植被覆盖程度与相干性呈幂函数关系,两者的相关性系数为 0.5812;而局域坡度与相干性呈反比例函数关系,相关性系数为 0.8027。地表覆被在由 0 逐渐变为 20% 时,相干性骤然减小,这是由于植被的散射特征随生长发育而改变,不同植物部位的散射特征也不相同,此外,植物的形状、朝向和类型等也是影响相干性的重要因素。当植被覆盖度大时,传感器接收到的回波信号极不稳定,相干性较差,而当植被覆盖度小于 20% 时,此时的地物多为人工建筑物、裸岩等,其散射特征稳定,故相干性较好。对于植被覆盖度高的区域,应尽量选择植被衰败阶段的像对,减小植被引起的失相干效应。

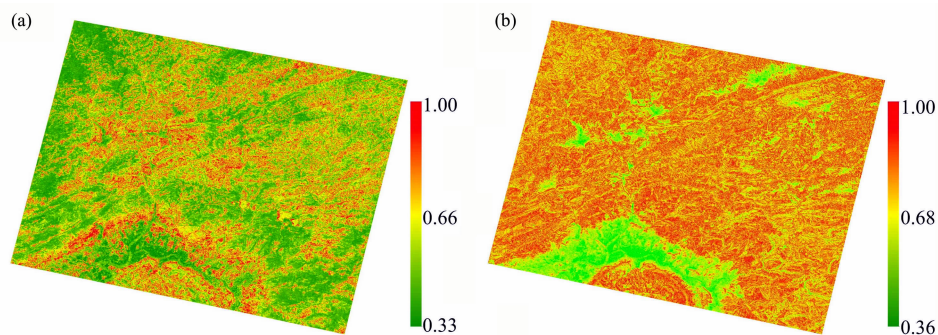


图 5 植被覆盖度与相干性的 GRG 图 (a) 和坡度与相干性的 GRG 图 (b)

Fig. 5 GRG between VFC and coherence (a) and GRG between slope and coherence (b)

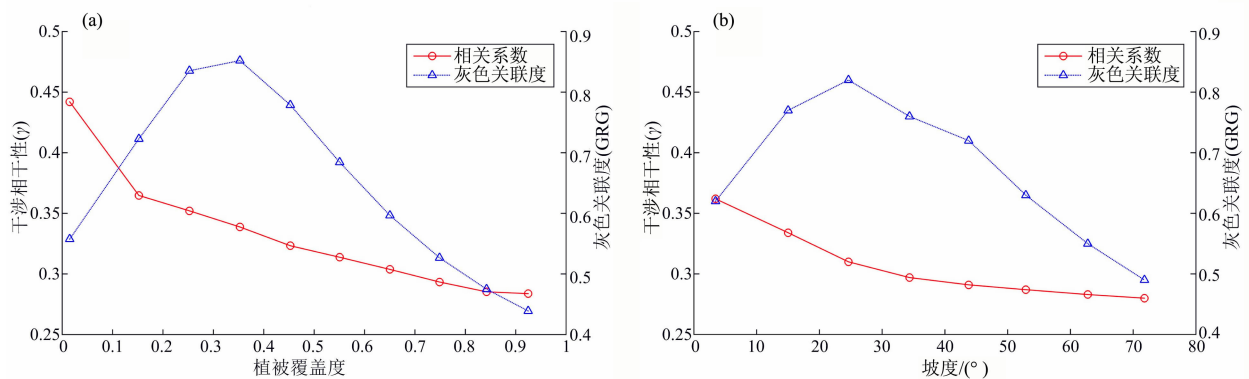


图 6 不同植被覆盖度等级的相干性 (a) 和不同坡度等级的相干性 (b)

Fig. 6 Coherence of different VFC levels (a) and coherence of different slope levels (b)

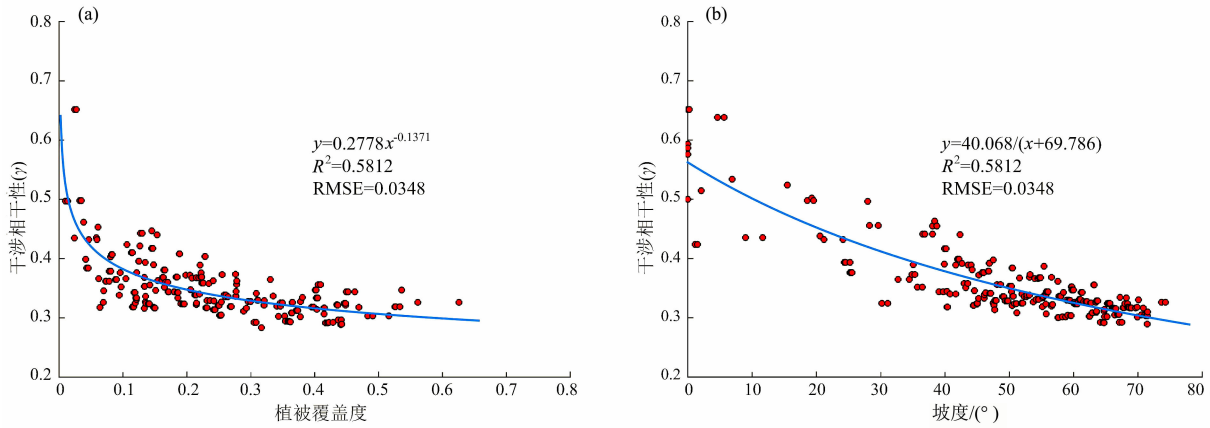


图 7 植被覆盖度与相干性的关系 (a) 和坡度与相干性的关系 (b)

Fig. 7 Relationship of VFC and coherence (a) and relationship of slope and coherence (b)

当局域坡度在  $30^\circ$  以内时,干涉像对相干性能较好保持,随着坡度的增加,SAR 影像的几何畸变加重,干涉条纹生成困难,限制干涉测量的性能。因此,在对某一区域进行干涉测量,研究人员可根据先验信息获取研究区的坡度,预估不同斜面干涉相干特性。同一位置的植被和坡度共同对相干性产生影响,基于植被、坡度与相干性的关系,初步设定植被覆盖度、坡度共同影响相干性的模型为:

$$\begin{cases} \gamma = 1 - [a_1 * f_{\text{vfc}} + a_2 * f_{\text{slope}} + a_3 * x_{\text{vfc}}^b * c / x_{\text{slope}} + d_1], & x_{\text{slope}} \neq 0 \\ \gamma = 1 - [a_4 * f_{\text{vfc}} + d_2], & x_{\text{slope}} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\gamma$  为相干系数, $x_{\text{vfc}}$ 、 $x_{\text{slope}}$  分别为植被覆盖度及局域坡度, $x_{\text{vfc}} = 0.2778x_{\text{vfc}}^{-0.1371}$ 、 $f_{\text{slope}} = 40.068 / (x_{\text{slope}} + 69.786)$ 。根据覆被与坡度对相干性的平均灰色关联度,设定参数初始值  $a_1 = 0.76 / (0.76 + 0.62)$ 、 $a_2 = 0.62 / (0.76 + 0.62)$ 、 $a_3 = 0$ 、 $a_4 = 0$ 、 $b = 1$ 、 $c = 1$ 、 $d_1 = 0$ 、 $d_2 = 0$ ,多次非线性迭代拟合,获得植被覆盖度、局域坡度与相干性的经验模型为:

$$\begin{cases} \gamma = 1 - [12.92 * x_{\text{vfc}}^{-0.03} + 3.08 / (x_{\text{slope}} + 19.8) - 0.012 * x_{\text{vfc}}^{3.99} * 1.631 / x_{\text{slope}} - 12.668], & x_{\text{slope}} \neq 0 \\ \gamma = 1 - [11.79 * x_{\text{vfc}}^{-0.03} - 11.502], & x_{\text{slope}} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

为验证模型的合理性,随机取值  $x_{\text{vfc}} \in [0, 1]$ 、 $x_{\text{slope}} \in [0, 90]$ ,代入式 10 中。以模型输出的相干系数为 Z 轴,植被覆盖度为 X 轴,坡度为 Y 轴,建立三维坐标系,并用三维曲面拟合计算结果(图 8)。地表的植被覆盖和地势起伏对相干性产生影响,随着

地表覆被程度和地势陡峭程度的增加,干涉相位表现为逐步下降趋势。

相同起伏状况的斜坡,干涉相干性随地表覆被由 0 逐步变大时,先迅速衰减,再缓慢衰减。而局域坡度变化导致的干涉相位降低的趋势则相对平稳,相对衰减迅速阶段为坡度由  $0^\circ$  增加到  $30^\circ$  的过程。该结果与上文统计结果(图 6)相符,初步说明了文章所建的经验模型具有一定合理性。

为验证模型的适用性,随机以  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  方格提取甘肃省榆中县北部丘陵地区 120 个采样点及广元地区与训练点互斥的 150 个地面点的植被覆盖度、坡度代入模型中,比较模型所得相干性与短时间基线哨兵 1A 干涉像对相干性的误差的绝对值。用箱线图统计误差的分散情况(图 9)发现,广元市和榆中县地区采样点的模型预估相干性和实际相干性的分散特征十分接近,平均绝对值误差分别为 0.039、0.134,最小误差绝对值均接近 0。这证明文章建立的模型较为准确且具有一定适用性,在研究区的地形及植被覆盖程度已知的条件,可用来预估研究区的干涉相干性。

## 4 结论

相干性是 InSAR 技术得以有效应用的基础,SAR 像对的低(失)相干现象会直接限制 InSAR 测量的精度,无法得到理想的结果。本文在对干涉测量原理和失相干源的研究基础上,以覆盖广元城区 C 波段的哨兵 1A SAR 数据为例。采用灰色关联分析与仿真建模相结合的方法,对局域坡度、植被覆盖

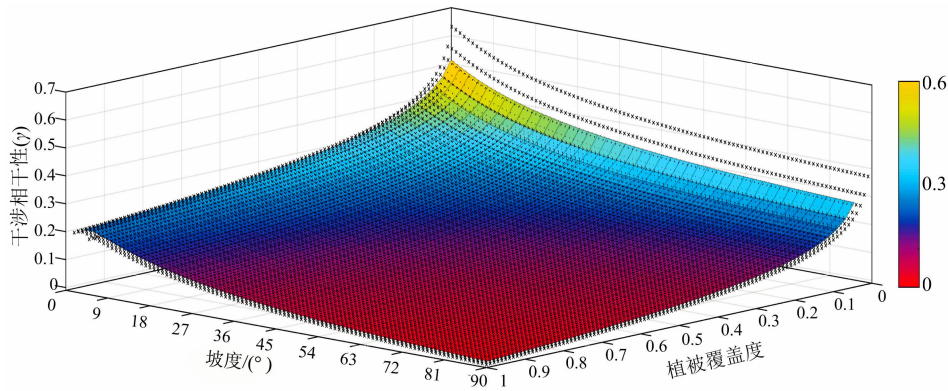


图8 模型仿真计算结果

Fig. 8 Calculation of modeling simulation

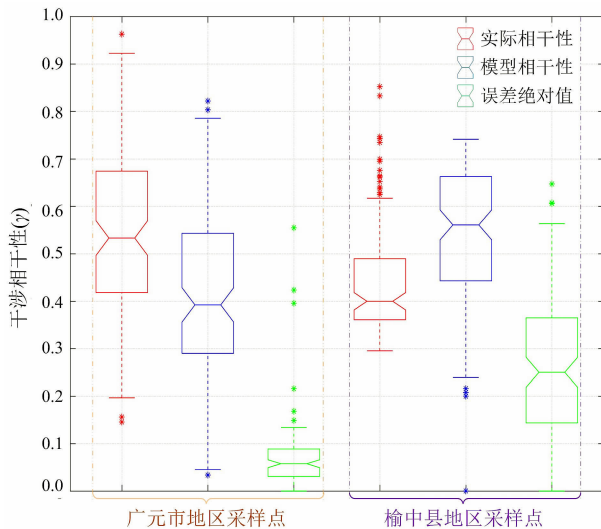


图9 误差统计箱线图

Fig. 9 Box plot of absolute error

度与相干性的关系进行了研究,主要结论包括:

(1) C波段的哨兵1A数据在地面被植被广泛覆盖的起伏山区的整体干涉相干性较低,平均干涉相位为0.3~0.4。

(2) 干涉相干性随着斜坡的覆被程度、坡度的增加呈非线性衰减趋势,且地表覆被与相干性的灰色关联度大于坡度与相干性的灰色关联度,表明在覆被斜坡的失相干效应中,植被引起的衰减占主导地位。

(3) 仿真试验结果表明,植被覆盖度与相干性呈幂函数关系,相关性系数为0.5812,在地面覆被程度由0增加到20%时,相干性衰减程度最大,其后相干性衰减变缓。而局域坡度则与相干性呈反比例关系,相关性系数为0.8027,相干性随坡度加大呈

平稳衰减趋势。

(4) 利用随机采样点建立植被覆盖度与坡度共同影响相干性的经验模型。利用广元市、榆中县的地面点分别对模型进行验证,模型的相干性与短时间基线像对的相干性统计特征相近,平均绝对误差均小于0.14,这说明该模型具有一定合理性,且对差异类型地表具有一定适用性。

本文在假设数据处理过程理想,大气层介质均匀等的前提下,对地表特征差异造成的去相干进行了研究。而实际中,造成相干性衰减的因素还有很多,为便于进行仿真实验,文章未考虑局部大气组成及性质的差异,时间基线等因素,所建模型仅估算了相干系数在空间去相干后的最优值,更为精确的相关性计算方法还需要进一步的研究。

## 参考文献 (References)

- [1] 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. [WANG Chao, ZHANG Hong, LIU Zhi. Spaceborne synthetic aperture radar interferometry [M]. Beijing: Science Press,2002:167-198]
- [2] 张诗茹,蒋建军,缪亚敏,等. 基于SBAS技术的岷江流域潜在滑坡识别[J]. 山地学报,2018,36(1):91-97. [ZHANG Shijia, JIANG Jianjun, MIAO Yamin, et al. Application of the SBAS technique in potential landslide identification in the Minjiang Watershed[J]. Mountain Research, 2018, 36(1): 91-97]
- [3] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1717-1733. [ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717-1733]
- [4] NANNINI M, MARTONE M, RIZZOLI P, et al. Coherence-based SAR tomography for spaceborne applications[J]. Remote Sensing of

- Environment, 2019, **225**:107–114.
- [5] GOLDSTEIN R M, WERNER C L. Radar interferogram filtering for geophysical applications[J]. Geophysical Research Letters, 1998, **25**(21):4035–4038.
- [6] AHMED R, SIQUEIRA P, HENSLEY S, et al. A survey of temporal decorrelation from spaceborne L-Band repeat-pass InSAR [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, **115**(11):2887–2896.
- [7] JUNGKYO J, DUK-JIN K, LAVALLE M, et al. Coherent change detection using InSAR temporal decorrelation model: a case study for volcanic ash detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, **54**(10):5765–5775.
- [8] WANG Teng, LIAO MingSheng, PERISSIN D. InSAR coherence-decomposition analysis[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, **7**(1):156–160.
- [9] SANTOS, RÚBEN, CALDEIRA B, BEZZEGHOUD M, et al. The rupture process and location of the 2003 Zemmouri-Boumerdes earthquake (Mw 6.8) inferred from seismic and geodetic data[J]. Pure and Applied Geophysics, 2015, **172**(9):2421–2434.
- [10] 龙江平, 丁晓利. 利用矩阵值域的极化干涉 SAR 相干性的研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, **40**(11):1526–1532. [LONG Jiangping, DING Xiaoli. Polarimetric interferometry SAR coherence using the field of matri [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, **40**(11):1526–1532]
- [11] OLESK A, PRAKS J, ANTROPOV O, et al. Interferometric SAR coherence models for characterization of hemiboreal forests using TANDEM-X data [J]. Remote Sensing, 2016, **8**(9):700–722.
- [12] HANSSEN R F. Radar interferometry data interpretation and error analysis[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [13] ASKNE J, SANTORO M. Multitemporal repeat-pass SAR interferometry of boreal forests [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, **43**(6):1540–1550.
- [14] 廖明生, 张路, 史绪国, 等. 滑坡变形雷达遥感监测方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 34–35. [LIAO Mingsheng, ZHANG Lu, SHI Xuguo, et al. Method and practice of landslide deformation monitoring by radar remote sensing [M]. Beijing: Science Press, 2017: 34–35]
- [15] LIU Guang, FAN JingHui, ZHAO Feng, et al. Monitoring elevation change of glaciers on Geladandong Mountain using TANDEM-X SAR interferometry[J]. Journal of Mountain Science, 2017, **14**(5):859–869.
- [16] 龙江平, 刘峰, 段祝庚. 联合干涉相位和相干性幅度的极化干涉 SAR 最优相干性估计[J]. 测绘学报, 2017, **46**(1):73–82. [LONG Jiangping, LIU Feng, DUAN Zhugeng. A new method of coherence optimization based on the phase and coherence magnitude in polarimetric SAR interferometry[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, **46**(1):73–82]
- [17] 张永红, 张继贤, 林宗坚, 等. 地形引起的雷达辐射畸变及其校正[J]. 测绘科学, 2002, **27**(4):23–26. [ZHANG Yonghong, ZHANG Jixian, LIN Zongjian, et al. Terrain induced SAR radiometric distortions and their correction [J]. Science of Surveying and Mapping, 2002, **27**(4):23–26]
- [18] 田馨, 廖明生. InSAR 技术在监测形变中的干涉条件分析[J]. 地球物理学报, 2013, **56**(3):812–823. [TIAN Xin, LIAO Mingsheng. The analysis of conditions for InSAR in the field of deformation monitoring[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, **56**(3):812–823]
- [19] PICHIERRI M, HAJNSEK I, ZWIEBAC S, et al. On the potential of Polarimetric SAR interferometry to characterize the biomass, moisture and structure of agricultural crops at L-, C- and X-Bands [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, **204**:596–616.
- [20] GARESTIER F, DUBOIS-FERNANDEZ P C, CHAMPION I. Forest height inversion using high-resolution P-band Pol-InSAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, **46**(11):3544–3559.
- [21] GUO Bing, HAN Fang, JIANG Lin. An improved dimidiated pixel model for vegetation fraction in the Yarlung Zangbo River Basin of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018, **46**(2):219–231.
- [22] YAZDANI M, KAHRAMAN C, ZARATE P, et al. A fuzzy multi attribute decision framework with integration of QFD and grey relational analysis [J]. Expert Systems with Applications, 2019, **115**:474–485.
- [23] 李春江, 沈国状, 张继超. 基于灰色系统理论的植被物理参数与极化分解参数的关联分析——以鄱阳湖湿地为例[J]. 遥感技术与应用, 2019, **34**(4):839–846. [LI Chunjiang, SHEN Guozhuang, ZHANG Jichao. Correlation analysis of vegetation physical parameters and polari-zation decomposition parameters based on grey system theory: a case study in Poyang Lake Wetland [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, **34**(4):839–846]



## Analysis of Influence of Vegetation Coverage and Slope on SAR Interferometric Coherence

YU Xiangwei<sup>1,2</sup>, XUE Dongjian<sup>1\*</sup>, CHEN Fengjiao<sup>1</sup>

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Sichuan Institute of Metallurgical Geology and Exploration, Chengdu 610051, China )

**Abstract:** Coherence is the basis of radar interferometry, which directly increases the difficulties in data processing and affects the accuracy of terrain extraction. Its research is of great significance for perfecting the InSAR coherence decomposition model and improving the deformation monitoring method. Starting from the analysis of the back-scattering characteristics of the radar beam from surface targets, this paper combined gray correlation analysis and modeling analysis, and focused on the impact of vegetation and slope – two key decoherent sources on the coherence. The limitations of the two factors on traditional interferometry were verified by the C-band sentinel 1A TOPS model SAR data. Based on statistical analysis, the gray correlation was used to explore the contribution ratio and influence law of vegetation and slope to the loss of coherence. With sampling points, the functional relationship between fractional vegetation cover, slope and coherence was established, and the empirical relationship model of them was simulated and verified. The study achieved the following: (1) Vegetation was the dominant factor of the spatial incoherence of SAR images space in densely vegetated mountainous areas. There was a power function relation between coherence and fractional vegetation cover, with a correlation coefficient of 0.5812; (2) The coherence decayed steadily as the slope increases. And the relationship between the two was an inverse proportional function, and the correlation coefficient was 0.8027; (3) The model predicted that the coherence of the two feature difference regions was close to the actual coherence of the short-term baseline SAR image series, and the average absolute value error was less than 0.14. The research in this paper has certain reference value and application significance for understanding the conditions of interferometry, establishing improved InSAR coherence estimation model and assisting of researchers to determine the most appropriate data and set the most suitable processing parameters by different deformation characteristics.

**Key words:** InSAR; spatial incoherence; irregular topography; vegetation-covered area; numerical simulation; correlation analysis