

# A Method for Atmospheric Phase Correction of Synthetic Aperture Radar

Yougen Li

Testing and Testing Branch, Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611730, China

## Abstract

Landslide is one of the main geological disasters in China, especially the massive landslide, which often causes serious loss of wealth and casualties. The surface deformation of landslide is an important auxiliary information to realize geological disaster monitoring and early warning. With the development of science and technology, new slope monitoring technologies represented by three-dimensional laser scanning technology and interferometric synthetic aperture radar have been applied more and more to landslide monitoring. Interferometric synthetic aperture radar has been gradually applied in large-scale landslide monitoring with its characteristics of fast arrangement, high measurement accuracy, flexible observation Angle and large observation field. Through repeated scanning and imaging of the same field, interferometric synthetic aperture radar is used to extract the deformation information of the target area and realize the high precision monitoring of the slope.

## Keywords

interferometric synthetic aperture radar; repeated scanning and imaging; interferometric measurement methods; high precision monitoring

## 一种合成孔径雷达大气相位校正方法

李有根

中国水利水电第七工程局有限公司试验检测分公司, 中国·四川·成都 611730

## 摘要

滑坡是中国主要的地质灾害之一, 其中特大型滑坡体量巨大, 往往会造成严重的财产损失和人员伤亡, 滑坡地表变形是实现地质灾害监测和预警的重要辅助信息。随着科技的发展, 以三维激光扫描技术、干涉合成孔径雷达为代表的新型边坡监测技术越来越多地应用到滑坡监测中来, 干涉合成孔径雷达以其布置快速、测量精度高、观测角度灵活、观测视场大等特点在大型滑坡监测中的应用也逐渐增多, 常用的干涉合成孔径雷达通过对同一场的重复扫描和成像, 采用干涉测量方法提取目标区域的形变信息进而实现边坡的高精度监测。

## 关键词

干涉合成孔径雷达; 重复扫描和成像; 干涉测量方法; 高精度监测

## 1 干涉合成孔径雷达概述

目前常用的干涉合成孔径雷达以其布置方式, 通常分为地基干涉合成孔径雷达<sup>[1]</sup> (Ground-Based Interferometric Synthetic Aperture Radar, GB-SAR) 和星载干涉合成孔径雷达 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR); 地基干涉合成孔径雷达是一种高精度的地表变形监测设备, 雷达天线在线性轨道上移动, 形成方位合成孔径, 有效提升了影响方位向的分辨率, 通过对同一场的重复扫描和成像, 采用干涉测量方法提取目标区域的形变信息<sup>[2]</sup>。与星载干涉合成孔径雷达相比, GB-SAR 具有观测角度灵活, 测量精度高 (可达亚毫米) 的优点, 是局部区域高精度形变监测的重要监测手段。对于特大型滑坡监测, 不仅要求 GB-InSAR 平

台实现远距离覆盖, 而且在方位向上具有大视场角度成像能力, 来满足特大型滑坡广域范围监测要求。

## 2 地基雷达形变监测技术流程

GB-InSAR 基本原理是通过零基线差分干涉测量技术获取距离向和方位向的二维图像<sup>[3]</sup>。距离向通过步进频率连续波技术实现高分辨率, 方位向利用天线在直线轨道匀速运动和孔径综合技术实现高分辨率<sup>[4]</sup>。在 GB-InSAR 技术上, 国内外很多学者提出了不同的形变处理算法, 虽然处理流程上会有一些差别, 但主要的处理技术相同, 主要流程包括地基 SAR 影像获取、干涉处理、相位滤波、PS 点选择、大气相位校正、形变结果反演计算、地理编码等步骤<sup>[5]</sup>。在地基 SAR 影像获取过程中, 将具有零基线的数据集, 通过一定的组合策略, 经过干涉处理, 获取干涉图<sup>[6]</sup>。基于数据集相干性和幅度信息选择合适的 PS 点, 对干涉图进行相位滤波和大气相位校正处理, 即可以实现形变量的解算。

【作者简介】李有根 (1974-), 男, 中国江西抚州人, 本科, 高级工程师, 从事水利水电工程安全监测与管理研究。

### 3 大气相位对干涉合成孔径雷达观测的影响及解决方案

干涉合成孔径雷达在进行长距离、广域观测中，随着观测距离的增加观测范围增广，场景内的环境变得更为复杂，特别是观测中大气变化的影响，大气会引起电磁波折射，从而造成电磁波传播路径和方向的变化。在两次成像时刻大气条件（温度、气压和湿度）的变化会导致不同的传播延迟，并且在相位中将存在大气相位分量（通常称为“大气相位屏”），目前的 GB-InSAR 大气相位校正方法主要分为两类：一类基于气象数据的方法，依据电磁波传播的折射率与场景内温度、气压、湿度数据之间的关系来校正大气相位<sup>[7]</sup>；一类基于函数模型方法通常大气影响在空间上具有强相关性，当满足大气在空间均匀性假设时，稳定的永久散射体点相位差在距离方向上的投影呈线性函数关系，通过求取函数关系即可校正大气相位。此外，考虑了陡峭地形条件下大气折射率会随高程发生改变，有学者进一步考虑了高程对大气延迟系数的影响，给出了距离-高程的多元回归模型<sup>[8]</sup>或者兼顾水平位置和高程等信息的多参数函数模型。另一类空间插值法，当大气在空间非均匀变化时，依据稳定的特征点，通过插值的方式进行大气相位校正。

基于稳定永久散射体（Psistent Scatters, PS）线性函数模型和距离-高程的多元回归模型的方法易于实现，并且已广泛应用在 GB-SA 形变监测领域。然而在特大滑坡变形监测场景下，需要在方位向上具有较大的视场角度（>100°），GB-SAR 系统方位向范围扩大，使得观测场景内环境更为复杂，可能存在明显的湍流或者局部水汽变化，导致大气介质呈现非均匀性的特征。因此，传统的基于稳定 PS 点函数模型的方法无法在复杂大气条件下校正大气相位<sup>[7]</sup>。

在方位向上大视场角度山区复杂条件下，大气参数的随机变化，可能在空间上存在线性和非线性两个特定特征的异常相位波动。论文提出一种两阶段半经验模型校正线性和非线性大气相位方法。

## 4 两阶段半经验模型大气相位校正方法

### 4.1 PS 点选择

PS 点选择是进行大气相位校正的必要前提，需要根据实际观测场景，避免植被波动和水域等造成误选点情况，选择合适的选点策略。一般根据点的幅度离散和相位标准差的统计特性，在高信噪比的情况下，目标点的稳定性直接由幅度离散指数 DA 表示为：

$$DA = \frac{\delta A}{mA} \quad (1)$$

其中， $\delta A$  为幅度标准偏差； $mA$  为幅度平均值。幅度离散指数越小，幅度信息越稳定，然而场景中在水域时，往往会出现误选等情况，可以通过估算相干系数来估计每个像素点的干涉相位质量，滤除水域的误选点，公式如下：

$$\gamma = |\gamma| \cdot \exp\{j\varphi\} = \frac{E\{S1 \cdot S2^*\}}{\sqrt{E\{|S1|^2\} \cdot E\{|S2|^2\}}} \quad (2)$$

其中， $S1$  和  $S2$  为干涉图相同像素所对应的复值； $|\cdot|$  为绝对运算符； $E\{\cdot\}$  为期望值。将符合幅度离散阈值和相干性阈值的点选作 PS 点。

### 4.2 距离-高程模型补偿初补偿

GB-InSAR 目标点的干涉相位可表示为：

$$\varphi = \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise} + 2k\pi \quad (3)$$

其中， $k$  为整数表示模糊度； $\varphi_{def}$  为形变相位分量； $\varphi_{atm}$  为大气相位分量； $\varphi_{noise}$  为噪声误差相位分量。为了获取高精度的形变相位  $\varphi_{def}$ ，需要有效的大气相位  $\varphi_{atm}$  校正方法。通过沿路径  $L$  积分得到雷达传感器与目标点相位为

$$\varphi_{atm} = \frac{4\pi}{\lambda} \int_L n(\gamma, t) dL \quad (4)$$

其中， $n$  为折射率的变化，它随时间  $t$  和距离  $\gamma$  而变化； $L$  为信号的传输路径； $\lambda$  为波长。一般情况下，假设大气在空间上是匀质的， $n$  在距离  $\gamma$  上不发生变化，在时间  $t$  上随机变化，因此可以将干涉图中大气相位分量表示为随距离变化的公式：

$$\varphi(t)_{atm} = \frac{4\pi}{\lambda} (\beta_0 + \beta_1 \gamma) \quad (5)$$

其中， $\beta_0$  为常数项； $\beta_1$  为与距离相关的线性系数； $\gamma$  为传感器与目标点的距离。另外，考虑到地形对大气相位的影响，兼顾距离和地形的大气相位可以表示为：

$$\varphi(t)_{atm} = \frac{4\pi}{\lambda} (\beta_0 + \beta_1 \gamma + \beta_2 \gamma h) \quad (6)$$

其中， $\beta_0$  为常数项； $\beta_1$  为与距离相关的线性系数； $\beta_2$  为与距离、地形相关的系数； $\gamma$  为传感器与目标点之间的距离； $h$  为目标点的高程值。可以建立大气相位与距离和地形的方程组：

$$\varphi = X\beta + \varepsilon, \quad \varphi = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_n \end{bmatrix}$$

$$X = \frac{4\pi}{\lambda} \begin{bmatrix} 1 & \gamma_1 & \gamma_1 h_1 \\ 1 & \gamma_2 & \gamma_2 h_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \gamma_n & \gamma_n h_n \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

其中， $\varphi$  为  $n$  个 PS 点干涉相位构成的  $n \times 1$  维向量； $X$  为常数 1 和  $n$  个 PS 点距离与高程值构成的  $n \times 3$  维向量； $\beta$  为待估计的  $3 \times 1$  维向量； $\varepsilon$  为相位误差构成的  $n \times 1$  维向量，采用最小二乘法对  $\beta$  求解：

$$\beta^{\wedge} = (X^T X)^{-1} X^T \varphi \quad (8)$$

则大气相位的估值为:

$$\varphi_{\text{atm}} = X \beta^{\wedge} \quad (9)$$

将干涉相位  $\varphi$  减去估计的大气相位  $\varphi_{\text{atm}}$  即为大气校正后的相位。在线性大气相位校正阶段, 基于相干性和幅度离差进行 PS 点选择, 设置较高的阈值选择高质量 PS 点, 采用距离-高程模型估算大气相位。此外, 高质量的 PS 点中可能存在一些不可靠点, 比如形变区的点和相位跳变点, 为了确保估算结果的准确性, 将大于二倍相位标准差的点剔除, 迭代求解距离-高程函数模型参数, 重新校正大气相位。

$$|\varphi - \varphi_{\text{atm}}| < 2\delta$$

### 4.3 空间维插值补偿

在校正随高程变化的大气相位后, 计算观测场内景内高质量 PS 点形变, 设定形变阈值掩模选择出稳定 PS 点。稳定 PS 点的相位主要包含大气相位和噪声相位, 大气相位在空间上表现出非均匀性特征, 但在较小的距离范围内可视为匀质特征, 噪声相位在空间上表现为随机特征, 不具备空间相关性。在一定的空间范围内进行均值滤波, 则可以有效滤除噪声相位影响, 同时基于稳定的 PS 点, 采用反距离权重插值法, 插值处采用较低阈值选取的 PS 点大气相位, 从而有效校正非线性大气相位, 论文所研究的高质量和低阈值设置在 4.2 节介绍。其中反距离权重插值法是利用已知点与待插值点的距离来定义权重, 根据周边的已知点加权计算待插值点相位值, 距离越近权重越大, 其公式为:

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{|d_i|^{\mu}} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{|d_i|^{\mu}}$$

其中,  $Z(x, y)$  为插值点结果;  $(x, y)$  为待插值点空间坐标;  $Z_i$  为第  $i$  个已知点相位值;  $|d_i|$  为第  $i$  个已知点与待插值点的空间距离;  $\mu$  为权重的幂指数, 一般取 2.0。此外, 考虑到大气相位的空间相关性和计算效率, 只选取待值点周边最近 3 个已知点参加计算。

### 5 结论

论文算法的大气相位校正流程如图 1 所示, 首先利用幅度离差阈值和相干性阈值选取 PS 点, 设置较高的阈值选作高质量 PS 点, 参与后续的线性大气相位估计, 然后, 根据经验判断干涉图中大气误差影响范围和特点, 基于高质量 PS 点采用距离-高程的函数模型对干涉相位校正高程相关的大气影响, 在计算中剔除大于二倍标准差的 PS 点, 迭代

求解距离-高程函数模型参数。最后计算序列图像形变, 设定阈值选出稳定 PS 点, 采用反距离权重插值法估计低阈值选取的 PS 点大气相位, 从而有效校正非线性大气相位。

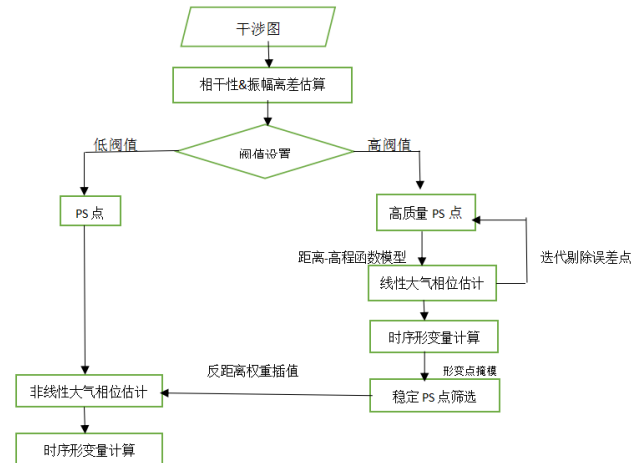


图 1 大气相位校正流程图

理论上在地形复杂区域距离-高程的函数模型可以提高大气校正的准确性。然而在实践中干涉图可能同时存在不同特征的大气相位, 简单的函数模型可能无法满足监测需求。为了在复杂大气条件下保持形变测量的可靠性, 拓展 GB-SAR 在大视场观测的应用场景, 本方法同时兼顾了线性和非线性大气相位, 实现不同特征大气相位的有效校正。

### 参考文献

- [1] 张志春,袁智,王彦平.地基于干涉合成孔径雷达形变监测应用综述[J].北京测绘,2020,34(1):27-32.
- [2] 郭森,王玉洁.地基合成孔径雷达干涉测量技术在形变监测中的应用[J].测绘与空间地理信息,2018,41(12):141-144.
- [3] 段斌,何加平,覃事河,等.基于GB-InSAR技术的水电工程高边坡变形监测[J].中国安全科学学报,2022,32(S2):64-69.
- [4] 陆桂斌.基于GB-InSAR微形变检测方法的研究[D].桂林:桂林电子科技大学,2022.
- [5] 郝凯东.基于深度学习的InSAR相位滤波算法研究[D].南昌:南昌大学,2023.
- [6] 全云霄.InSAR矿区地表形变监测及大气延迟校正研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
- [7] 王泊静.基于PS点分类的GB-InSAR复杂大气相位校正方法研究[D].北京:北方工业大学,2023.
- [8] 刘辉,徐青,靳国旺,等.基于DEM的单幅SAR影像直接定位[J].测绘科学,2018,43(10):22-32.