

引用格式:何永红,靳鹏伟,舒敏.基于多尺度相关性分析的InSAR对流层延迟误差改正算法[J].地球信息科学学报,2020,22(9):1878-1886. [He Y H, Jin P W, Shu M. InSAR tropospheric delay error correction algorithm based on multi-Scale Correlation Analysis[J]. Journal of Geo-information Science 2020,22(9):1878-1886.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.200061

基于多尺度相关性分析的InSAR对流层延迟误差改正算法

何永红,靳鹏伟,舒敏

湖南科技学院 土木与环境工程学院,永州 425199

InSAR Tropospheric Delay Error Correction Algorithm based on Multi-Scale Correlation Analysis

HE Yonghong, JIN Pengwei, SHU Min

School of Civil and Environmental Engineering, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou 425199, China

Abstract: Tropospheric delay error in synthetic aperture radar interferometry can affect DEM accuracy. This study adopts wavelet multi-scale correlation analysis to reduce the influence of tropospheric delay error on DEM estimation. This method is based on the wavelet multi-resolution analysis theory and the frequency characteristics of different components in differential interference phases. Firstly, the wavelet decomposition reconstruction RMS error rate is used to determine the decomposition layers. The terrain residual phase and noise phase are reduced to extract the frequency band where the troposphere delayed error phase is located. Secondly, we quantify the correlation between tropospheric delay error phase and DEM in radar coordinates and further down-weight the correlated coefficients. Lastly, the differential interferogram is reconstructed which reduces the influence of elevation-related tropospheric delay in InSAR. In this study, the ENVISAT ASAR data in Yima, Henan province are processed using the method proposed in this study. The differential interferogram with tropospheric delay error corrected are obtained to estimate elevation. The estimated tropospheric delay phase correlated with elevation is consistent with the topographic changes. Results show that the standard deviation of DEM error compared to Aster GDEM decreases from 30.7 m to 26.37 m, which indicates an increased accuracy of InSAR DEM.

Key words: interferometric synthetic aperture radar; multi-scale analysis; tropospheric delay error; digital elevation model; correlation; wavelet analysis; atmospheric error; root mean square error

*Corresponding author: He Yonghong, E-mail:365022968@qq.com

摘要:针对合成孔径雷达干涉技术中对流层延迟误差会影响DEM精度的问题,提出采用小波多尺度相关性分析方法来减弱与高程相关的对流层延迟误差的影响,来提高合成孔径雷达干涉DEM的估计精度。该方法基于小波多分辨率分析理论,根

收稿日期:2020-02-08;修回日期:2020-05-18.

基金项目:国家自然科学基金项目(41531068、41671356);湖南省自然科学基金项目(2020JJ4031);湖南省教育科学规划课题研究成果(XJK19CGD051)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41531068, 41671356; Natural Science Foundation of Hunan Province, No.2020JJ4031; Education Science Planning Research Results of Hunan Province, No.XJK19CGD051.]

作者简介:何永红(1978—),女,河北定州人,博士,副教授,主要从事InSAR数据处理及应用研究。E-mail: 365022968@qq.com

据差分干涉相位不同组成的频率特性,利用小波分解重构均方根误差变化率确定分解层数,降低地形残差相位、噪声相位等对大气延迟误差相位估计的干扰,提取对流层延迟误差相位所在频带;然后结合对流层延迟误差相位和雷达坐标系下的DEM在不同尺度上的相关性定权并进行降权处理,重构解缠差分干涉图,改正差分干涉相位中与高程相关的对流层延迟的影响。采用本文方法对覆盖河南义马地区的2景ENVISAT ASAR数据进行处理,得到对流层延迟误差改正后的差分干涉图,估计的与高程相关的对流层延迟相位,与地形变化情况吻合。将对流层延迟误差改正后的干涉图用于DEM高程估计,结果显示本文方法重建的DEM与Aster GDEM的标准差由30.7 m提高到26.37 m,提高了InSAR DEM估计精度。

关键词:合成孔径雷达干涉测量;多尺度分析;对流层延迟误差;数字高程模型;相关性;小波分析;大气误差;均方根误差

1 引言

合成孔径干涉雷达技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)是近几十年快速发展起来的一种卫星遥感技术,已被广泛用于地形测绘^[1]及地表形变监测^[2]。但是仍存在几方面的限制,如时间去相干、轨道误差、对流层延迟及电离层延迟误差,制约了利用InSAR技术获取准确的地形信息^[3],特别的,对流层延迟误差是主要误差源。对流层延迟误差是由于在星载SAR成像时,雷达信号受到大气折射而使其传播路径发生了变化,而导致干涉相位发生延迟,其直接影响获取的DEM产品的精度^[4]。1997年,Zebker等^[5]指出在垂直基线为400~100 m、对流层水汽含量发生20%的变化时,会引起80~290 m的高程测量误差,或者形变测量误差10~14 cm。对于高精度InSAR来说,对流层大气的这种影响将大大降低InSAR高程测量或者形变测量的精度^[6],在获取DEM产品、分析干涉形变相位时大气延迟成为了一个重要的误差源。研究和选用合适的大气误差校正方法,成为InSAR应用中的关键问题之一。

目前,消除或抑制InSAR对流层延迟误差的主要方法大致可以分为3类。①干涉相位—高程相关分析法^[7]。其主要思想是:对流层延迟可分为垂直分层部分及湍流部分,其中,垂直分层部分与地形起伏相关^[8]。基于该思想^[9],可通过建立干涉相位与外部地形数据之间的函数关联提取对流层垂直分层部分^[10]。该方法主要优势为外部辅助数据容易获取,可适用于多种InSAR数据。缺点为无法适用于平坦地区,无法处理湍流部分延迟。②外部水汽数据辅助法^[11]。其主要的外部大气数据源有:GNSS估计的天顶延迟数据^[12],MODIS^[13]及MERIS^[14]光学遥感手段获取的水汽数据,气象模型^[15](如WRF,NWM)估计出的对流层延迟数据^[16]。这类方法相比第一类方法的优势在于无需依赖干涉相位—高程之间的相关关系,可对垂直分层及湍流部

分进行处理。缺点在于外部大气数据非常受限于外部数据自身的观测质量以及数据的时空分辨率,如这些水汽资料相比InSAR数据具有低分辨率(公里级);光学遥感水汽数据无法在夜间获取,且受时间同步性限制,只适用于个别SAR卫星数据。

③时序InSAR数据时空分析法。其主要思想是:在多幅SAR影像构成的干涉数据集上,提取在时间上保持高相干的目标点,利用干涉相位的各个分量各自不同的时间和空间分布特性^[17],采用滤波方式进行探测、滤除^[18]。该类方法被PS-InSAR、SBAS-InSAR、Stacking InSAR、PCT-InSAR等时序InSAR技术广泛采用。相比前2类方法,该类方法的优势在于无需依赖干涉相位—高程之间的相关关系,无需借助外部水汽数据。但该类方法的缺陷在于需要大量干涉对进行联合分析,对于少量InSAR数据条件下,对流层延迟误差去除不理想或无法去除。

综上所述,由于对流层延迟在时空上的随机性,很难采用解析方法估计它们的大小,导致在获取DEM产品、分析干涉形变相位时造成不可忽略的高程误差或形变测量误差。常用的方法中都有其优势及原理本身的局限性,因此具有各自的适应性,目前对流层延迟误差仍是InSAR数据处理及应用中的最大误差源。

为此,本文面向InSAR地形提取,给出一种基于小波多尺度相关性分析方法去除与地形相关的对流层延迟误差相位。该方法的主要思想是:离散小波变换可以较好地对于干涉图不同相位成分进行分析,通过小波多分辨率分析,把干涉相位分离到不同空间尺度上,再建立不同空间尺度上干涉相位与外部地形数据之间的函数关联提取对流层垂直分层部分延迟相位成分。具体做法是对InSAR系统中差分干涉相位进行多尺度分析,采用小波分解重构均方根误差变化率确定多尺度分解层数,初步分离出干涉图中不同波长的成分,并结合对流层延迟相位和地形在频率域上的相关性,进行与地形相关的对流层延迟误差相位降权改正,最终获得与地

形相关的对流层延迟误差去除后的干涉图。并通过实测数据对算法的有效性进行了分析验证,实验结果表明该方法减弱了与地形相关的对流层延迟误差的影响,提高了生成DEM的精度。

2 多尺度相关性分析法改正对流层延迟误差算法

2.1 InSAR干涉相位成分分析

在不考虑地表形变及电离层延迟影响下,干涉相位成分可以表示为:

$$\phi = \phi_{\text{flat}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{orbit}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}} \quad (1)$$

式中: ϕ_{flat} 表示平地相位; ϕ_{topo} 表示地形相位; ϕ_{orbit} 表示轨道误差相位; ϕ_{atm} 表示对流层延迟相位; ϕ_{noise} 表示相关噪声相位。

ϕ_{flat} 可通过如下表达式进行计算:

$$\phi_{\text{flat}} = -\frac{4\pi}{\lambda}(R_2 - R_1) \quad (2)$$

式中: λ 为波长; R_1 和 R_2 为参考斜距。

ϕ_{topo} 可以表达为:

$$\phi_{\text{topo}} = \frac{4\pi B \cos(\theta - \alpha)}{\lambda R \sin(\theta)} h \quad (3)$$

式中: B 为基线长度; θ 为入射角; α 为基线倾角; R 为天线到地面目标的距离。

在利用 InSAR 技术生成 DEM 时,首先应该将平地相位、轨道误差相位及地形相位进行去除。通过差分干涉测量,得到的差分干涉相位 $\Delta\phi$ 可以表达为:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{orbit}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}} \quad (4)$$

式中: $\Delta\phi_{\text{topo}}$ 表示地形残差相位。为了估计对流层延迟误差相位,需要降低地形误差相位、轨道误差相位、噪声相位的干扰。噪声相位可以采用对干涉图滤波^[19],如 Goldstein 法,对噪声进行压制^[20]。 ϕ_{orbit} 轨道误差相位在频域呈现为低频,可以在数据处理过程中利用精密轨道数据或多项式模型拟合方法去除^[21]。可以通过如下一次曲面多项式进行去除:

$$\phi_{\text{orbit}}(x, y) = a + bx + cy \quad (5)$$

式中: ϕ_{orbit} 是轨道误差相位; (x, y) 是 SAR 坐标系下轨道误差距离向和方位向的坐标; a, b, c 是待求一次曲面多项式模型参数。根据轨道误差分布特征,可以选取更高阶数的二次曲面模型去除,最终得到的差分干涉相位可以表达为:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}} \quad (6)$$

2.2 多分辨率分析

小波多分辨率分析(Multi-Resolution Analysis)是一种时间频率或空间频率的局部化分析方法,它是通过一定的伸缩平移运算等对信号进行逐步的多尺度化,从而实现最终的高频处时间细分和低频处频率细分。

假设 $f(x_1, x_2)$ 是给定大小为 $p \times q$ 干涉图的差分解缠相位,对其进行如下二维多分辨率分析^[22]:

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2) &= \sum_{k_1}^{p-1} \sum_{k_2}^{q-1} v_{jk_1k_2} \varphi_{jk_1k_2}(x_1, x_2) + \\ &\sum_j^J \sum_{k_1}^{p-1} \sum_{k_2}^{q-1} \sum_{\varepsilon}^3 w_{jk_1k_2}^{\varepsilon} \psi_{jk_1k_2}^{\varepsilon}(x_1, x_2) \quad (7) \\ &= A^J + \sum_j^J \sum_{\varepsilon}^3 D_j^{\varepsilon} \end{aligned}$$

式中: $v_{jk_1k_2} = \langle f(x_1, x_2), \varphi_{jk_1k_2}(x_1, x_2) \rangle$ (8)

$$w_{jk_1k_2}^{\varepsilon} = \langle f(x_1, x_2), \psi_{jk_1k_2}^{\varepsilon}(x_1, x_2) \rangle, \varepsilon = 1, 2, 3 \quad (9)$$

$$\varphi_{jk_1k_2}(x_1, x_2) = \varphi_{jk_1}(x_1) \varphi_{jk_2}(x_2) \quad (10)$$

$$\psi_{jk_1k_2}^{\varepsilon}(x_1, x_2) = \begin{cases} \varphi_{jk_1}^{\varepsilon}(x_1) \psi_{jk_2}^{\varepsilon}(x_2), & \varepsilon = 1 \\ \psi_{jk_1}^{\varepsilon}(x_1) \varphi_{jk_2}^{\varepsilon}(x_2), & \varepsilon = 2 \\ \psi_{jk_1}^{\varepsilon}(x_1) \psi_{jk_2}^{\varepsilon}(x_2), & \varepsilon = 3 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\varepsilon = 1, 2, 3$, 分别表示小波函数 $\psi(x_1, x_2)$ 水平、垂直和对角 3 个方向的尺度伸缩和位移。

式(7)一式(11)中, φ 和 ψ 分别是尺度函数和小波函数; $j = 1 \sim J$, J 是小波分解尺度; $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 是内积运算符; $v_{jk_1k_2}$ 为近似值或尺度系数,即 $f(x_1, x_2)$ 低频分量的小波分解系数; $w_{jk_1k_2}^{\varepsilon}$ 为不同分辨率下的细节或者小波系数, $\varepsilon = 1, 2, 3$, 分别表示干涉相位 $f(x_1, x_2)$ 水平、垂直和对角 3 个方向高频分量的小波分解系数。

本文选择了序列 5 的 *coiflet* 正交小波母函数,小波函数是在综合考虑计算效率和小波支撑长度的条件下选取的,离散小波变换分解和重构操作简单,容易实现,且其具有正交性、紧支撑性、对称性、消失矩等特性,但如何进行最优小波函数的选取已超出本文目前的研究范畴。

2.3 小波变换相关性分析法改正与地形相关的对流层延迟误差

在小波域,一个差分干涉图可以被分解为多个具有不同波长的相位成分,文献[10]已证明离散小波变换可以较好的对干涉图不同相位成分进行分析,允许在不同分辨率条件下分析差分干涉相位的

空间分布。依据文献[10]做法,采用coiflet小波对差分干涉图进行分解,对流层延迟误差相位在频率域上表现为高频特性,结合外部DEM数据,对差分干涉相位和DEM数据进行多尺度分析,对差分干涉相位的高频部分与DEM数据进行相关性分析并降权改正,建立与地形相关的对流层延迟误差垂直分层部分改正模型。

假设 $U(x_1, x_2)$ 和 $D(x_1, x_2)$ 分别表示解缠后的差分干涉相位图和配准到SAR坐标系下的DEM,分别对其进行小波多分辨率分析:

$$U(x_1, x_2) = \sum_{k_1}^{p-1} \sum_{k_2}^{q-1} u_{jk_1k_2} \varphi_{jk_1k_2}(x_1, x_2) + \sum_j^J \sum_{k_1}^{p-1} \sum_{k_2}^{q-1} \sum_{\varepsilon}^3 u_{jk_1k_2}^{\varepsilon} \psi_{jk_1k_2}^{\varepsilon}(x_1, x_2) \quad (12)$$

$$D(x_1, x_2) = \sum_{k_1}^{p-1} \sum_{k_2}^{q-1} d_{jk_1k_2} \varphi_{jk_1k_2}(x_1, x_2) + \sum_j^J \sum_{k_1}^{p-1} \sum_{k_2}^{q-1} \sum_{\varepsilon}^3 d_{jk_1k_2}^{\varepsilon} \psi_{jk_1k_2}^{\varepsilon}(x_1, x_2) \quad (13)$$

式中: $u_{jk_1k_2}^{\varepsilon}$ 和 $d_{jk_1k_2}^{\varepsilon}$ 分别是解缠后的差分干涉相位高频小波系数和配准到SAR坐标系下DEM的高频小波系数。经过二维小波分解,分离出低频和高频相位,如果差分干涉相位中存在与地形相关的大气延迟相位,差分干涉相位图中的一部分高频小波系数和DEM的高频小波系数在不同的分解尺度上就存在一定的相似性,对这种不同尺度上的相似性进行相关分析。为了衡量这种相似性,对每个分解尺度,差分干涉图和DEM对应的高频小波系数的相关性可以通过如下方式进行计算:

$$c_j^{\varepsilon} = \frac{\langle (u_{jk_1k_2}^{\varepsilon} - \bar{u}_{jk_1k_2}^{\varepsilon})(d_{jk_1k_2}^{\varepsilon} - \bar{d}_{jk_1k_2}^{\varepsilon}) \rangle}{\sqrt{\langle (u_{jk_1k_2}^{\varepsilon} - \bar{u}_{jk_1k_2}^{\varepsilon})^2 \rangle} \sqrt{\langle (d_{jk_1k_2}^{\varepsilon} - \bar{d}_{jk_1k_2}^{\varepsilon})^2 \rangle}} \quad (14)$$

式中: $\langle \rangle$ 为窗口平均, \bar{w} 为窗口内高频小波系数的均值。由于地形误差相位及噪声相位的影响,相关性 c_j^{ε} 小于1。换言之,高频小波系数并不都是对流层延迟误差相位的贡献。为了削减对流层延迟误差相位的影响,原始高频小波系数通过如下方式进行降权处理:

$$\overline{w_{jk_1k_2}^{\varepsilon}} = w_{jk_1k_2}^{\varepsilon} * (1 - c_j^{\varepsilon}) \quad (15)$$

式中: $\overline{w_{jk_1k_2}^{\varepsilon}}$ 表示改正后高频系数; $w_{jk_1k_2}^{\varepsilon}$ 改正前高频系数; c_j^{ε} 表示高频部分各方向的相关系数。

利用改正后的高频小波系数重构,得到对流层延迟误差改正后的差分干涉相位 $\overline{U(x_1, x_2)}$,重构方程:

$$\overline{U(x_1, x_2)} = \sum_{k_1}^{p-1} \sum_{k_2}^{q-1} u_{jk_1k_2} \varphi_{jk_1k_2}(x_1, x_2) + \sum_j^J \sum_{k_1}^{p-1} \sum_{k_2}^{q-1} \sum_{\varepsilon}^3 \overline{w_{jk_1k_2}^{\varepsilon}} \psi_{jk_1k_2}^{\varepsilon}(x_1, x_2) \quad (16)$$

在这里,需要重点考虑的一个问题是如何设置一个合理的分解尺度确保小波窗口大小能够基本涵盖地形误差相位、噪声相位及对流层延迟误差相位的空间分布范围。如果已知地形误差相位及对流层延迟误差相位不同成分的波长,可以根据计算小波函数的均方根半径RMSR(Root-Mean-Square Radius)确定分解尺度^[10]。然而,实际中实测数据中地形误差相位及对流层延迟误差相位等信息空间分布先验信息一般难以事先知道,这在实际应用中受到了限制。针对这一问题,本文不去考虑具体空间分布范围,而是假定不同分解尺度条件下,高频成分均包含地形误差相位及噪声相位的贡献,这种贡献通过式(15)进行自适应调节。利用原始信号去除高频部分的重构信号均方根误差RMSE(Root Mean Square Error)变化率是否趋于稳定来确定分解尺度^[23],以便分离出全部高频信号。最大分解尺度设置的原则为小波窗口尺寸应能够涵盖差分干涉图的整体范围。

原始信号经过多尺度 k 次分解,得到原始信号与去除高频部分的重构信号的均方根误差为:

$$RMSE(k) = \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{x=1, y=1}^{m, n} (\phi(x, y) - \hat{\phi}^k(x, y))^2} \quad (17)$$

($k = 1, 2, \dots, n$)

求出相邻尺度均方根误差变化率:

$$r_{k+1} = \frac{RMSE(k+1)}{RMSE(k)} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

当均方根误差变化率趋于1时确定的小波分解层数,即可认为高频部分与低频部分进行了有效的分离,这时可取尺度 $J=k$ 。图1为多尺度相关性分析法改正对流层延迟误差实验流程图。

3 实验数据及结果分析

3.1 实验数据及处理

采用覆盖河南义马试验区的2景ASAR影像作为实验数据,来验证上述方法的可行性。研究区域覆盖范围约为100 km×100 km,影像分别获取于2006年11月19日和2007年1月28日,影像维数大小为100像元×100像元,数据详细信息见表1。实

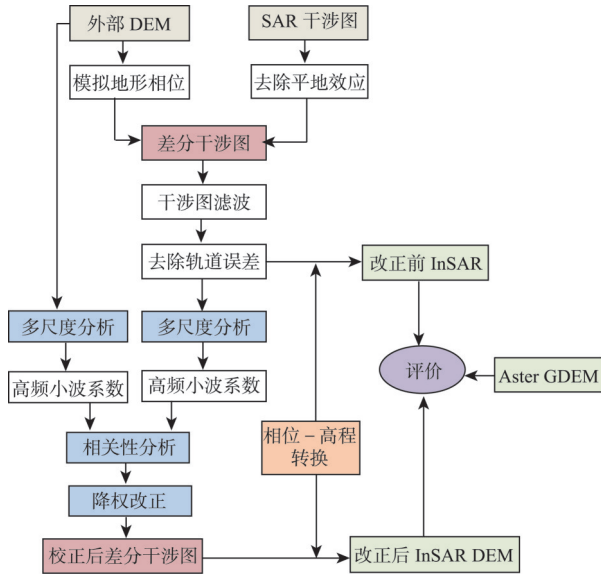


图1 本文多尺度相关性分析法改正对流层延迟误差实验流程

Fig. 1 Experimental flow chart of correction the tropospheric delay error by multiscale correlation analysis

表1 义马实验区 ENVISAT 卫星 ASAR 数据列表
Tab. 1 Data list of envisat satellite Asar in Yima experimental area

影像	成像日期	轨道号	Track	垂直基线
主影像	2006-11-19	24678	75	166
从影像	2007-01-28	25680	75	

验中采用 SRTM DEM 作为外部 DEM 数据,为实验区提供初始高程估计值,采用日本空间局的 Aster GDEM 作为参考值,对 InSAR 重建的 DEM 的精度进行评价。SRTM DEM 和 Aster GDEM 这 2 种 DEM 由于采用不同的技术手段获取,其具有不同

且相互独立的高程误差。选取 Aster GDEM 作为参考值,是由于考虑到在平坦的地区, SRTM DEM 是可靠的,但在地形起伏的山地,由于受几何畸变影响较大, SRTM DEM 存在过高估计,同时考虑到研究区域没有更高精度的 DEM 作为参照,故采用 Aster GDEM 进行比较,其分辨率为 30 m。

首先采用 GAMMA 软件对数据进行处理,方位向和距离向的视数为 4 和 20,对两景 SAR 数据进行二轨差分干涉处理,生成干涉图并去除平地效应。然后将 30 m 分辨率的 SRTM DEM 数据编码到 SAR 坐标系下,并根据轨道参数模拟地形相位,去除干涉图中的地形相位。最后对差分干涉图进行滤波处理,根据相干图,设置相干性阈值为 0.3,对差分干涉图采用最小费用流法相位解缠,利用一次曲面多项式模型去除轨道误差后得到解缠相位图。

3.2 结果及分析

图 2 中(a)、(b)即为去除轨道误差的解缠差分干涉相位图和 30 m 分辨率的 SRTM DEM。从图中看出,该研究区域内地形起伏不平、沟壑纵横,地势变化比较剧烈,最大高程可达 1929 m,容易造成水汽时空分布不均匀性,并引起大气延迟对干涉测量的结果产生严重的影响,因此,有必要对干涉结果进行大气改正。

图 3(a)是小波分解重构均方根变化率图,代表了 RMSE 变化率随分解尺度的变化(分解尺度变化范围为 1-16)。由图可见, RMSE 变化率随分解尺度的增加先缓慢增加再减小,说明地形残差相位和噪声相位的部分成分被滤除,在分解尺度为 12 时,变化率为 1.01。之后, RMSE 变化率介于 1.00~1.01 之

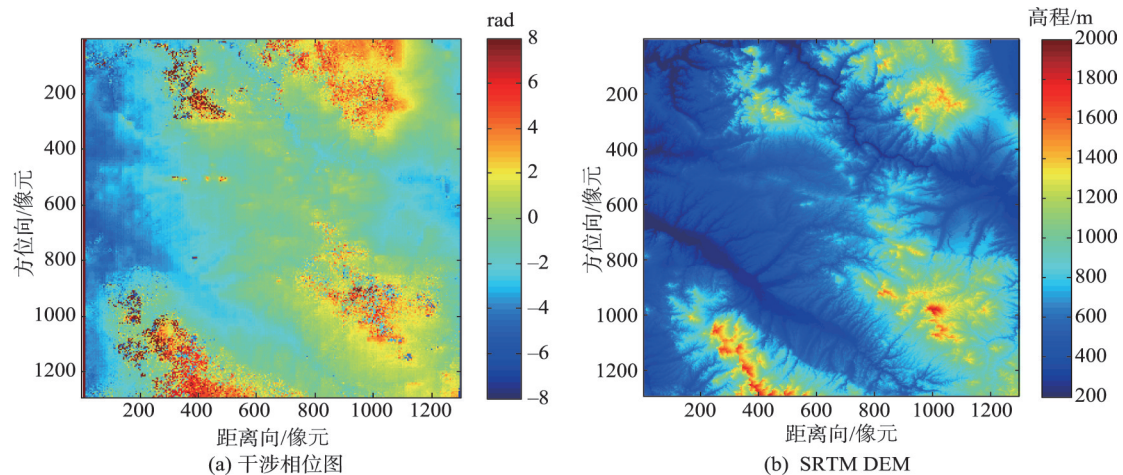


图2 实验区差分干涉图及 SRTM DEM

Fig. 2 Differential interferogram and SRTM DEM of the experimental area

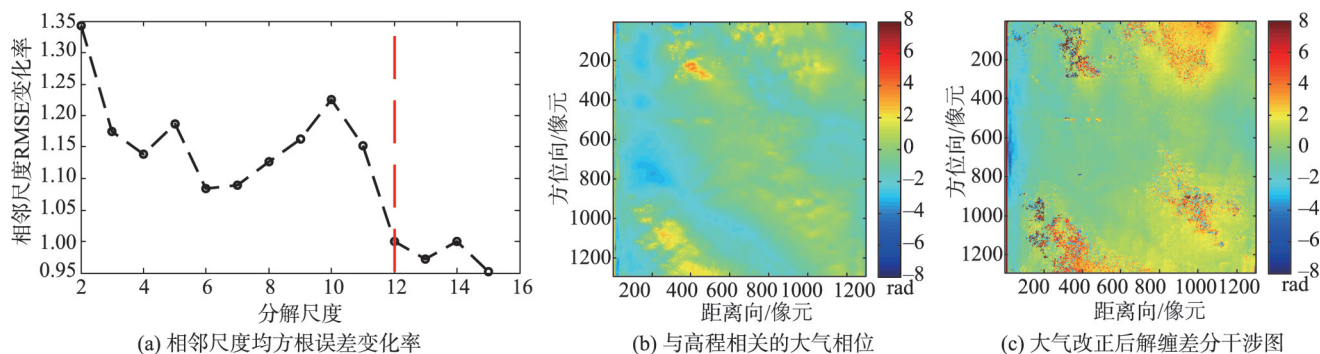


图3 本文方法实验结果

Fig. 3 Experimental results of this method

间,逐渐趋于稳定,当分解尺度为12时,小波窗口尺寸能够涵盖SAR影像覆盖范围100 km,故确定的小波分解尺度为12。

图3(b)是估计的与高程相关的对流层延迟相位。从图3(b)中可以看出,受大气影响较为严重的地区是地形变化比较剧烈的地区,与地形变化情况相吻合。将估计的与高程相关的对流层延迟相位从差分干涉图中减去后得到的干涉图如图3(c)所示,在干涉图的底部还存在明显的正值相位信号,而该区域地势平坦,不会出现如此显著的地形误差相位,这些信号应该为未去除的大气延迟误差相位,结合大气误差相位的空间分布特性,未消除的对流层延迟误差主要为与地形无关的湍流部分引起的。此外,校正后的干涉图残余相位中还含有地形误差相位、噪声相位等。

将去除与地形相关的对流层延迟误差差分干涉图经过高程解算,最终生成了InSAR DEM。

图4显示了与地形相关对流层延迟误差改正前后获取的InSAR DEM结果。图4(a)—图4(b)分别为地形相关对流层延迟误差改正前后获取的DEM。图4(c)为日本空间局提供的Aster GDEM参考值。图4(d)是改正前后重建的DEM与参考值Aster GDEM的偏差统计结果,由图中看出,重建的DEM与Aster GDEM的标准差由30.7 m提高到26.37 m。

为了详细显示本文算法对DEM的改正效果,现就对流层延迟误差改正前后获取的InSAR DEM结果进行局部放大分析。将图4(a)—图4(b)中白色矩形区域进行放大对比显示于图5(a)—图5(b),经对流层延迟误差改正后,InSAR DEM结果更接近与Aster GDEM。

在获取的DEM上选取了图4(a)—图4(b)图中

黑色实线A和B的剖面线进行分析,2条线上的高程剖面如图6所示,高程的变化量分别为200 m和100 m。对比改正前后InSAR DEM和Aster GDEM的高程剖面可知,大气改正后的高程更接近于Aster GDEM。A高程区间改正前的DEM与Aster GDEM的标准差为9.13 m,改正后的DEM与Aster GDEM的标准差为7.64 m;B高程区间改正前的DEM与Aster GDEM的标准差为19.65 m,改正后的DEM与Aster GDEM的标准差为10.14 m。

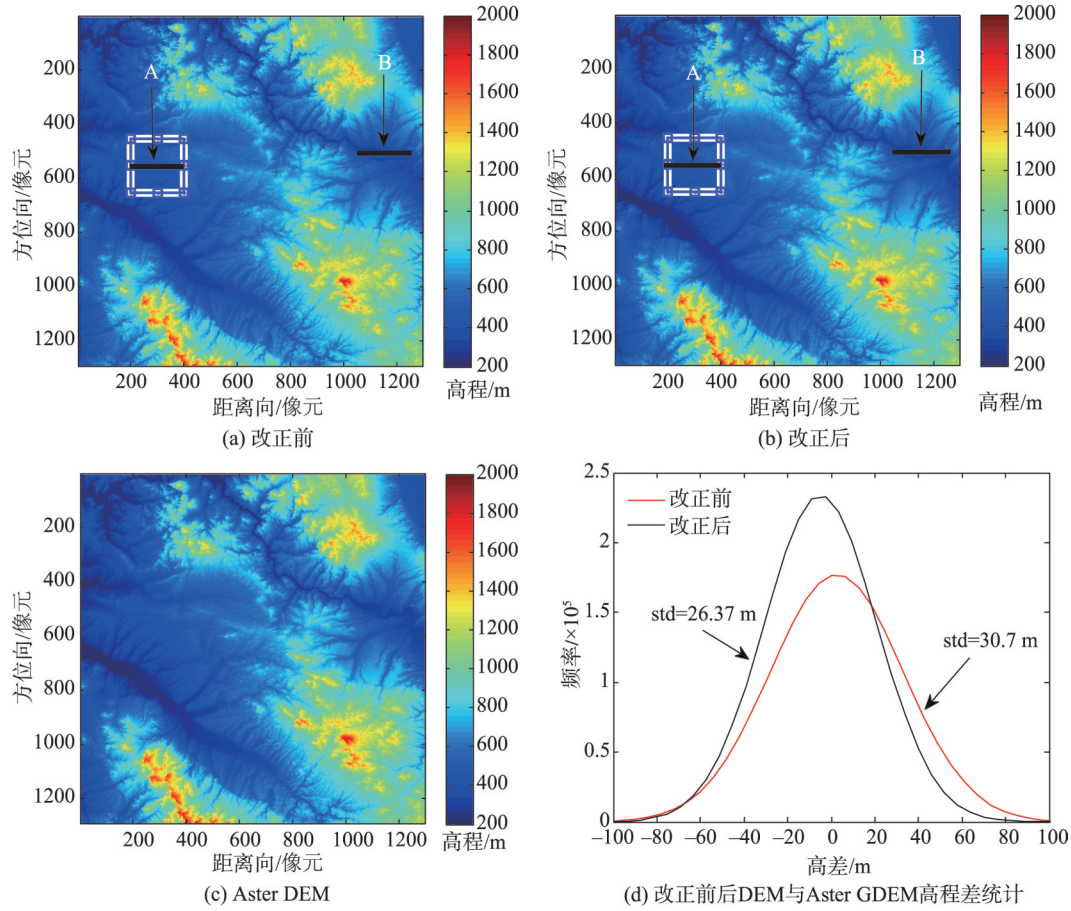
从结果上来看,该方法可以去除与地形相关的对流层延迟误差,然而由于大气与地形并未呈现出强相关,改正效果较弱,因此选择大气与地形呈现强相关地区的数据进行分析。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)本文方法基于小波多分辨率分析理论的基础上,首先根据差分干涉相位不同组成频率特性,利用小波分解重构均方根误差变化率确定分解层数,将差分干涉相位分解到不同尺度上,减弱地形残差相位、噪声相位等对大气延迟误差的干扰,这样可以更好地进行对流层延迟误差相位的探测,然后在高频部分根据大气相位和地形在不同尺度上相关性,进行相关性定权并降权改正干涉相位中与高程相关的对流层延迟的影响,整体上减弱了研究区域对流层延迟的影响。

(2)将对流层延迟误差改正后的干涉图用于DEM高程估计,结果显示本文方法重建的DEM与Aster GDEM的标准差由30.7 m提高到26.37 m,提高了InSAR DEM估计精度。



注:白色矩形框为选取放大区域,黑色实线A、B为选取剖面线。

图4 改正后生成InSAR DEM结果

Fig. 4 Corrected InSAR DEM results

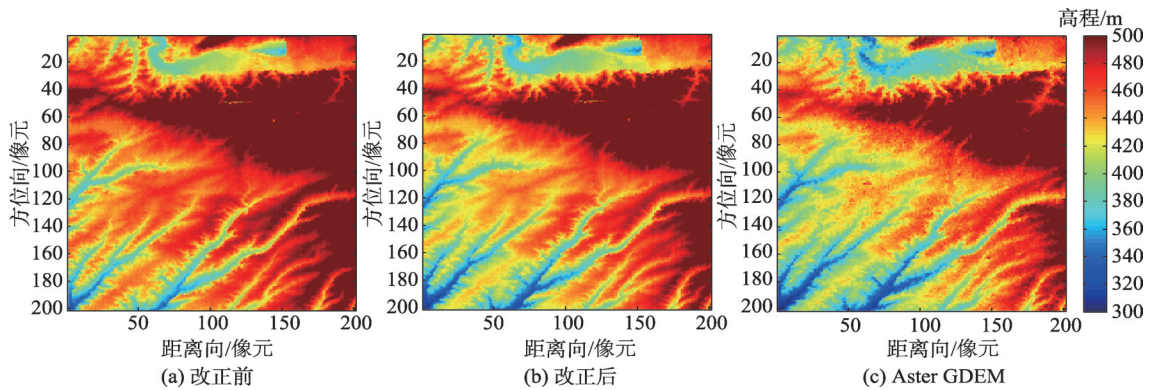


图5 改正后InSAR DEM局部结果对比

Fig. 5 Comparison of local results for InSAR DEM after correction

4.2 讨论

(1)该方法不依赖诸如气象数据、MERIS、MODIS之类的外部数据,可以对单基线InSAR数据进行对流层延迟误差进行改正,在缺少SAR数据和外

部大气数据的研究区域其实用性强。但是该方法只是减弱了对流层延迟中垂直分层部分的影响,并不能完全消除大气的影响,而且小波基的选择对区分对流层延迟误差相位、地形误差相位及噪声相位

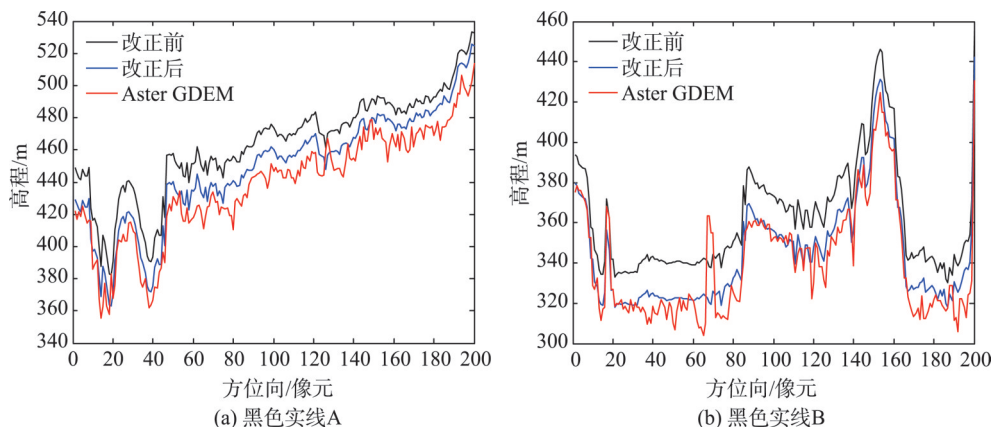


图6 改正前后InSAR DEM高程剖面对比

Fig. 6 Elevation profile comparison of InSAR DEM before and after correction

至关重要,本文选择小波函数的准则较为简单,原则为选取的小波函数能够将地形误差相位、噪声相位从干涉图中粗略分离,后续工作中具体关于InSAR数据中大气在小波域的频率特性、最优小波基母函数的选择等问题还需要进一步完善,以使其对地形残差相位、对流层延迟误差等更为敏感,对二者进行更为细致的分离。

(2)本文方法主要缺陷为其只能处理解缠绕后的干涉相位。如果低相干导致解缠失败,该方法无法使用。此外,该方法没有考虑形变信号的干扰。形变信号在不同极化干涉图中具有相同或相似的相位。如果形变相位相同,其会被误判为对流层延迟误差相位被去除,不会对DEM反演产生影响。但是,当形变相位相似时,部分形变信号不会被去除,将会扭曲真实地形信息。

参考文献(References):

- [1] Fu H Q, Zhu J J, Wang C C, et al. Atmospheric effect correction for InSAR with wavelet decomposition-based correlation analysis between multipolarization interferograms [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2018,56(10):5614-5625.
- [2] 郭唯娜,柯长青,范宇宾.基于SAR干涉数据的东帕米尔高原冰川变化[J].地球信息科学学报,2019,21(11):1790-1801. [Guo W N, Ke C Q, Fan Y B. Glacier changes on the East Pamirs Plateau: Based on SAR interference data [J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(11): 1790-1801.]
- [3] 杨书成,黄国满,程春泉.基于DEM的SAR影像几何定位参数校正方法[J].地球信息科学学报,2019,21(4):580-587. [Yang S C, Huang G M, Cheng C Q. Correction

method of SAR image geometric positioning parameters based on DEM[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(4):580-587.]

- [4] Liu Z W, Fu H Q, Zhu J J, et al. Using Dual-Polarization Interferograms to Correct Atmospheric Effects for InSAR Topographic Mapping[J]. Remote Sensing, 2018,10(8): 1310-1325.
- [5] Zebker H A, Rosen P A, Hensley S. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1997,102(B4):7547-7563.
- [6] 丁刘建,陶秋香,李涛,等.高分三号SAR影像广域范围联合几何检校技术[J].测绘学报,2020,49(5):598-610. [Ding L J, Tao Q X, Li T, et al. A joint geometric calibration technique for GF-3 SAR image in wide area[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020,49(5):598-610.]
- [7] Liao M S, Jiang H J, Wang Y, et al. Improved topographic mapping through high-resolution SAR interferometry with atmospheric effect removal[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013,80(142):72-79.
- [8] Bekaert D P S, Hooper A, Wright T J. A spatially variable power law tropospheric correction technique for InSAR data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015,120(2):1345-1356.
- [9] Lin Y N, Simons M, Hetland E A, et al. A multiscale approach to estimating topographically correlated propagation delays in radar interferograms[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2013,11(9):1-17.
- [10] Shirzaei M, Bürgmann R. Topography correlated atmospheric delay correction in radar interferometry using wavelet transforms[J]. Geophysical Research Letters, 2012,39(1):1305.

- [11] 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 J J, Li Z W, Hu J. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717-1733.]
- [12] Li Z W, Ding X L, Liu G X. Modeling atmospheric effects on InSAR with meteorological and continuous GPS observations: Algorithms and some test results[J]. Journal of Atmospheric and Solar- Terrestrial Physics, 2004, 66(11): 907-917.
- [13] Li Z H, Muller J P, Cross P, Fielding E J. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(B03): 1-10.
- [14] Li Z W, Xu W B, Feng G C, et al. Correcting atmospheric effects on InSAR with MERIS water vapour data and elevation-dependent interpolation model[J]. Geophysical Journal International, 2012, 189(2): 898-910.
- [15] Mateus P, Tomé R, Nico G, et al. Three-dimensional variational assimilation of InSAR PWV using the WRFDA model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(12): 7323-7330.
- [16] Jolivet R, Agram P S, Lin N Y, et al. Improving InSAR geodesy using global atmospheric models[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2014, 119(3): 2324-2341.
- [17] Shirzaei M. A wavelet-based multitemporal D-InSAR algorithm for monitoring ground surface motion[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(3): 456-460.
- [18] Cao Y, Li Z, Wei J, et al. Stochastic modeling for time series InSAR: with emphasis on atmospheric effects[J]. Journal of Geodesy, 2018, 92(2): 185-204.
- [19] He Y H, Zhu J J, Fu H Q, et al. SAR Interferogram filtering of shear let domain based on interferometric phase statistics[J]. Applied Sciences, 2017, 7(2): 141-158.
- [20] 何永红,朱建军,靳鹏伟. 一种使用剪切波变换的干涉图滤波算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(7): 1008-1014. [He Y H, Zhu J J, Jin P W. An Interferogram filtering algorithm using shear let transform[J]. Geomatics And Information Science of Wuhan University, 2018, 43(7): 1008-1014.]
- [21] Xu B, Li Z W, Wang Q J, et al. A Refined strategy for removing composite errors of SAR interferogram[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2014, 11(1): 143-147.
- [22] Shirzaei M, Walter T R. Estimating the effect of satellite orbital error using wavelet-based robust regression applied to InSAR deformation data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(11): 4600-4605.
- [23] 陶珂,朱建军. 多指标融合的小波去噪最佳分解尺度选择方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(5): 749-755. [Tao K, Zhu J J. A hybrid indicator for determining the best decomposition scale of wavelet denoising[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(5): 749-755.]