引文格式:袁煜伟,李志伟,母岷政.中国第一代全球大气再分析数据在InSAR大气改正中的应用研究:以南加州地区为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(5):959-972.DOI:10.13203/j.whugis20230154

Citation: YUAN Yuwei, LI Zhiwei, MU Minzheng. Application of China's First Generation Global Atmospheric Reanalysis Data in InSAR Atmospheric Correction: A Case Study of Southern California[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(5):959-972.DOI:10.13203/j.whugis20230154

中国第一代全球大气再分析数据在InSAR大气改正中的应用研究:以南加州地区为例

袁煜伟[1] 李志伟[1] 母岷政[1]

1 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙,410083

摘 要:大气延迟是合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)地表形变监测的主要误差源之一。提出采用中国第一代全球大气和陆面再分析产品(China's first generation global atmospheric and land reanalysis product,CRA)数据改正InSAR对流层延迟,并采用小基线集InSAR(small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR)技术对南加州的地表变形监测进行了详细分析与评估。首先提出了利用该产品计算对流层延迟的方法,通过顾及大气参数垂直分层及水平变化的物理特性,分别对该产品原始气象参数进行垂直向和水平向的插值,沿卫星视线方向积分计算大气延迟,通过与原始干涉图差分,得到大气改正结果;然后将结果从干涉图相位标准差、空间相关性和相位-高程相关系数3个方面进行误差分析;最后利用Sentinel-1数据进行南加州形变测量实验,将该方法与经典SBAS-InSAR结果进行对比,使用全球定位系统数据进行验证。结果表明:(1)校正后的干涉图平均标准差减小了34.7%,65%的干涉图平均标准差减小了20%以上;(2)干涉图空间结构函数的期望平方差显著性下降表明该产品能有效抑制长波大气;(3)相关性的拟合系数变化表明该产品能够有效降低高程影响带来的大气垂直分层分量;(4)说明利用分辨率较低的全球大气模型数据进行大气改正时考虑对流层空间变化的有效性。所得结果说明了CRA产品在InSAR大气校正上的可行性。

关键词:CRA;SBAS-InSAR;大气改正;变形监测;统计指标

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-04-26

DOI:10.13203/j.whugis20230154 **文章编号**:1671-8860(2025)05-0959-14

Application of China's First Generation Global Atmospheric Reanalysis Data in InSAR Atmospheric Correction: A Case Study of Southern California

YUAN Yuwei[1] *LI Zhiwei*[1] *MU Minzheng*[1]

1 School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: **Objectives**: Atmospheric delay is one of the main error sources in interferometric synthetic aperture radar (InSAR) surface deformation monitoring. Using the global meteorological model to correct the tropospheric delay has been successfully applied in recent years. **Methods**: An InSAR atmospheric correction method is presented, which introduces China's first generation global atmospheric and land reanalysis product (CRA). Taking into account the physical characteristics of tropospheric meteorological parameters, the method was tested and evaluated quantitatively in Los Angeles, Southern California. The results show the feasibility of CRA products in InSAR atmospheric correction. First, the meteorological parameters such as temperature, water vapor and air pressure are obtained by CRA, taking into account the spatial variation characteristics of atmospheric parameters, according to the vertical stratification characteristics of meteorological data, the piecewise function is used to interpolate in the vertical direction. By considering the spatial variability of the atmosphere, the interpolation is carried out in the horizontal plane. According to the re-

基金项目:国家杰出青年学者科学基金(41925016);国家自然科学基金(42330112)。

第一作者:袁煜伟,硕士,研究方向为InSAR大气改正。xiaoyuan2020@csu.edu.cn

通信作者:李志伟,博士,教授。zwli@csu.edu.cn

sults, the atmospheric delay is calculated along the satellite line of sight. The atmospheric correction result is obtained by difference with the original interferogram. Second, verify and analyze the results. First, the error analysis is carried out from three aspects: interferogram standard deviation, spatial correlation and phase-elevation correlation coefficient. It is compared with the results of GACOS (generic atmospheric correction online service for InSAR) and PyAPS (Python-based atmospheric phase screen mitigation library) methods. Finally, 78 interferograms obtained from 40 scenes Sentinel-1 data of Southern California based on short baseline principle are used to carry out sequential deformation measurement experiments, the proposed method is compared with classical small baseline subset InSAR (SBAS-InSAR) results, and verified by global positioning system (GPS) data. **Results**: The results show that: (1) The average standard deviation of the corrected interferogram is reduced by 34.7% and the average standard deviation of 65% of interferograms has been reduced by more than 20%, especially for the interferograms that are seriously affected by the atmosphere. It is better than GACOS and PYAPS with an average improvement of 30%. (2) The significant decrease of the expected square variance of the spatial structure function of the interferogram shows that the product can effectively suppress the long-wave atmosphere. (3) The change of the fitting coefficient of correlation shows that the product can effectively reduce the atmospheric vertical stratification component caused by the influence of elevation. Depending on the degree of atmospheric influence, CRA can improve the vertical stratification component of the atmosphere, ranging from 20% to 60% or more. (4) It is effective to take the spatial variation of convection into account when establishing a high-resolution InSAR tropospheric delay map using low-resolution global atmospheric model data. **Conclusions**: This paper confirms that CRA can correct and improve the overall accuracy of deformation monitoring. Through quantitative evaluation, researchers can fully understand the correction effect and performance of this product, which is helpful in promoting the application and development of this product. However, due to the differences of external data, follow-up research can combine global navigation satellite system(GNSS) data with CRA solution to further improve the accuracy of InSAR atmospheric correction.

Key words: CRA; SBAS-InSAR; atmospheric correction; deformation monitoring; statistical index

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术具有全天时和全天候的成像能力、广泛的空间覆盖能力、精细空间探测能力的优势[1],已被广泛应用于地球科学领域,如由地震、火山、滑坡、冰川运动和地下水资源开采等引起的地表变形监测[2-8]。但在实际传播过程中受到非均质性的大气吸收、散射、折射等作用,电磁波的传播路径和传播速度被影响,大气对流层中的温度、压强和水汽的时空变化导致了InSAR对流层延迟[9-10]。

InSAR对流层延迟改正大致可以分为两类:一类是基于大气延迟时空特性的合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)数据改正法[11],另一类是基于外部数据集以校正干涉图中的对流层大气延迟方法。前者利用相应的函数模型[12-14]以及随机模型[15-16],或者利用其特性进行相应的时空滤波等[17-18],面对如地震这类突发情况需使用差分InSAR时无法满足;此外,大气通常表现出季节特性,例如夏季连续多景SAR影像受到严重大气影响时也无法使用。后者主要来自地面观测数据[19-21]、星载成像光谱仪[22-23]以及全球大气模型[24-27]。但是地面观测数据站点的密度通常较为稀疏,空间分辨率过低,星载成像光谱仪只能提供白天数据,又容易受到云污染的影响,因而高精度、高时间分辨率且全球覆盖的数值气象模型成为了首选。

在使用产品方面,中国在2021年发布了第一代全球大气和陆面再分析产品(China's first generation global atmosphere and land reanalysis product, CRA)及业务系统,填补了中国在全球大气再分析领域的空白,打破了长期以来对国外再分析产品的依赖,但是该模型在InSAR大气改正方面的研究尚未见报道[28-30]。同时,由于观测空间分辨率不一致,需对气象参数进行空间上的插值处理,目前已有研究采用纯数学插值方法,没有顾及到气象参数在垂直方向上的分层物理特性以及水平向大气的变化。

针对上述不足,本文使用了CRA产品通过顾及大气参数垂直分层及水平变化的物理特性,分别对该产品原始气象参数进行垂直向和水平向

的插值,沿卫星视线(line of sight, LOS)方向积分计算大气延迟,将结果从干涉图相位标准差、空间相关性和相位-高程相关系数3个方面进行误差分析;并以南加州地区小基线集InSAR(small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR)技术为例和全球定位系统(global positioning system, GPS)的结果进行比较。通过探讨CRA在InSAR大气改正方面的应用并评估其效果,为利用全球大气模型进行InSAR大气改正提供了更多选择,说明了CRA产品在对流层延迟改正中的有效性,对促进该产品的应用和发展具有重要的意义,可为今后使用该模型在InSAR对流层延迟改正时提供参考。

1　基于CRA的InSAR大气改正方法

1.1　CRA数据处理

对流层延迟正是电磁波穿过对流层时由速度变化引起的,主要由干延迟和湿延迟组成,其与沿传播路径空气折射率N的积分呈线性关系,而空气折射率的变化可由对流层中温度、压力和湿度的变化表示[9],因此可以通过沿地面点和成像卫星之间的视线LOS方向的大气对流层参数计算相应的对流层延迟。

考虑到由于CRA输出时间和SAR采集成像时间存在差异,使用最接近SAR成像时间的两个该模型输出数据进行时间线性插值。

为使用格网化的数值气象产品积分计算延迟,需要将CRA输出的气象参数将等压层转换为等高度层。在垂直方向上,结合1976年标准大气模型利用分段拟合函数进行气象参数的插值[31]。选取的高度层由不同海拔高度进行采样确定,采样步长从-200 m增加到40 km:海拔在-200 m到5 km之间的采样步长为200 m,海拔在5~10 km之间为500 m,海拔10~20 km为1 km,海拔20~40 km为5 km,共计51层。

对温度进行插值,参考1976年标准大气模型,其表示了中等太阳活动期间,由地面到1 000 km的理想化、静态的中纬度平均大气结构,此标准大气的32 km高度以下与50 km高度以下部分分别与国际民用航空组织标准大气(1964)及国际标准化组织的标准大气(1973)相同。在11 km以下,大气温度随高度降低;[11,20] km为等温大气;(20,47] km温度逐渐上升;(47,51] km处有极大值270.65 K,随后又逐渐下降。由此,本文构建了温度随高度变化的分段插值方法:

$$T_{m(t)}=\begin{cases}T_{m(i)}+\gamma_1\times(\delta h_{(t)}-\delta h_{(i)}), & h<11\ \text{km}\\ a_i+b_i(\delta h_{(t)}-\delta h_{(i)})+c_i(\delta h_{(t)}-\delta h_{(i)})^2+d_i(\delta h_{(t)}-\delta h_{(i)})^3, & 11\ \text{km}\leqslant h\leqslant 20\ \text{km}\\ T_{m(i)}+\gamma_2\times(\delta h_{(t)}-\delta h_{(i)}), & h>20\ \text{km}\end{cases} \tag{1}$$

式中,$T_{m(i)}$为格网点高度处的T_m温度;$T_{m(t)}$为目标高度的T_m;γ_1和γ_2分别为分段递减率;$\delta h_{(i)}$为格网高度;$\delta h_{(t)}$为目标高度,a_i、b_i、c_i、d_i代表4个拟合系数。

对气压进行插值,由于大气处于流体静力平衡时气压随高度变化的规律可由大气静力学方程表示,且其对于连续介质而言,在麦克斯韦速度分布律能成立的几百千米以内大气层中皆适用,因此构建了气压随高度变化的分段插值方法:

$$p_2=\begin{cases}p_1\times\left[1-\dfrac{\gamma(z_2-z_1)}{T_v}\right]^{\frac{g}{R_d\gamma}}, & z<11\ \text{km}\\ p_1\mathrm{e}^{-\frac{g}{R_dT_v}(z_2-z_1)}, & 11\ \text{km}\leqslant z\leqslant 20\ \text{km}\end{cases} \tag{2}$$

式中,z_1和z_2分别表示两点高程;R_d为常数项;T_v为层间虚温;g为重力加速度;γ为气温直减率。

由于水汽在对流层内不同高度的下降速率有所不同,约有90%的水汽集中在500 hPa(中纬度地区约5 km)以下,其中50%的水汽集中在850 hPa(约1.5 km)以下。有学者论证过对流层顶以下使用三次多项式,在对流层顶拟合水汽天顶延迟时优于指数函数模型[32],因而使用三次多项式及高斯函数构建水汽插值模型:

$$\mathrm{e}=\begin{cases}p_1+p_2H+p_3H^2+p_4H^3, & H\leqslant 5\ \text{km}\\ m_1+m_2H+m_3H^2+m_4H^3, & 5\ \text{km}<H\leqslant 11\ \text{km}\\ n_1\exp\left(-\left(\dfrac{H-n_2}{n_3}\right)^2\right), & H>11\ \text{km}\end{cases} \tag{3}$$

式中,p、m和n分别为拟合系数。

气象参数垂直插值后,为计算沿LOS向的积分,将每层格网点位置的气象参数水平插值至LOS向的位置,相较于传统的线性插值而言,考虑对流层参数的空间变异性,通过利用Xu等[13]的简单局部平均算法来插值不同高度层的对流层参数(温度、气压和水汽分压):

$$Z^*_{SKlm}(\varphi,L,h_k)=\sum_{i=1}^{n}u_i^{SK}[z(\varphi_i,L_i,h_k)-m^*_{SK}(\varphi_i,L_i,h_k)]+m^*_{SK}(\varphi,L,h_k) \tag{4}$$

式中，$Z^{*}_{SKlm}(\varphi,L,h_k)$为待预测的参数值，$\varphi$、$L$、$h_k$分别为第$k$层的纬度、经度和海拔；$u_i^{SK}$表示权值矩阵；$z(\varphi_i,L_i,h_k)$表示数值气象模型输出的参数值；$m^{*}_{SK}(\varphi_i,L_i,h_k)$为第$i$个样本位置的对流层参数局部平均值；$m^{*}_{SK}(\varphi,L,h_k)$为待预测位置的局部平均值。$u_i^{SK}$权重的确定通过理论预测的方差最小，以及权重之和等于1两个条件进行约束。

每个高度的局部均值根据更直接与海拔相关的回归函数[33]进行建模。通过使用海拔相关的回归函数以表示对流层参数空间梯度上的局部变化[34]：

$$Z^{*}_{(h)}=m^{*}_{SK}(\varphi,L,h_k)=C\mathrm{e}^{-ah}+h\alpha C\mathrm{e}^{-ah}+Z_{\min} \quad (5)$$

式中，C、α和$Z_{\min}$分别为第k层可以通过回归分析进行估计输出的待估参数。

通过上述垂直向插值以及水平向插值后，即可得出所有51个高度层的LOS向气象参数，进一步根据积分公式可以计算LOS向大气对流层延迟。如图1所示。

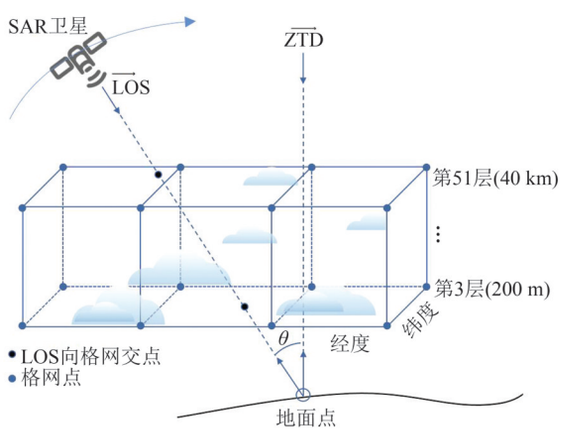


图1 CRA输出的高度水平网格点和沿地面点和成像卫星之间的LOS方向示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of CRA Output of the High Horizontal Grid Points and the Direction of LOS Between the Ground Points and the Imaging Satellite

1.2 InSAR大气改正及效果评估

计算大气对流层延迟后，通过双线性插值获取相对SAR数据相对分辨率的相位延迟，通过在SAR坐标系中进行地理编码，最终获取对应干涉图的对流层大气延迟图。对于在时间t_1和t_2($t_2>t_1$)处的SAR图像构成干涉对，干涉图在像素(x,y)处的大气校正相位可以表示为：

$$\Delta\Phi_{\mathrm{CRA},t_1,t_2}(x,y)=\Phi_{\mathrm{CRA},t_2}(x,y)-\Phi_{\mathrm{CRA},t_1}(x,y) \quad (6)$$

基于CRA大气校正的干涉图是通过原始的干涉图与相应的大气校正图之间差分获取的。基于CRA的SBAS-InSAR的基本原理是将由上述改正的单个干涉图作为观测值，并使用SBAS技术流程进行处理[35]。

估计InSAR大气对流层延迟的准确性来源于多个方面，如实验区域的对流层特性、实验的时空尺度以及使用外部数据的时空分辨率和准确性。基于大气的物理特性，用于评估对流层校正质量的统计方法通常使用相位标准差、空间相关性和相位-高程相关系数3个度量值[12,15,36-37]，在此同样使用这3个指标来评估分析使用CRA改正大气的效果。

1)评估校正总体性能的相位标准差。干涉图相位标准差通过反映干涉图的噪声水平被广泛用于评估InSAR大气校正的质量，假设没有地表移动情况下，大气延迟应该是主导信号，标准偏差的降低表明校正后噪声水平降低[37]。

2)评估长波大气影响减小的空间结构函数。标准差多用于评估干涉图的噪声水平，但不能反映信号的空间结构。长波大气信号与距离有关，是InSAR观测中最常见的误差源之一。为了分析空间相关性，利用空间结构函数(spatial structure function，SSF)进行分析，其为协方差平稳的随机函数$\Delta f(x)$的期望平方差[11]，它将数据的变化表示为数据点对之间距离的函数，可以明确区分不同尺度上校正的效果，并且不受间隙或不规则间隔数据点的限制。此空间结构函数也称为变异函数，定义如下：

$$S(r)=E\left[(\Delta f(x)-\Delta f(x+r))^2\right] \quad (7)$$

式中，x为参考点位置；r表示相隔距离，地统计学中最常用的SSF是半变异函数，即：

$$\gamma(r)=\frac{1}{2}S(r)=\sigma^2-C(r) \quad (8)$$

半变异函数通常在一段距离(称为变程)后接近最大值，这意味着距离大于变程的值之间没有相关性。在这个距离上的半方差值称为基台值。基台值的平方根与图像的总均方根相当。如果数据包含大规模空间信号(如来自轨道误差或大规模大气影响的信号)，即数据中存在显著的趋势，半变异函数将在与干涉图相当的尺度或更大的尺度上继续增大，并且基台值有可能不存在。

3)测量大气延迟分层分量减小的相位-高程相关系数。大气效应的分层分量是由位于不同高度的目标之间的垂直折射率差异造成的。高程达到500 m的高度差时，相位差就可能达到10 mm以上。Jolivet等[25]于2014年估计了干涉相位和高程之间的相关系数，作为湍流和垂直分层延迟之间比率的替代。使用相关系数可以描述干涉

图中的相位高程的关联性,若相关系数的绝对值越小,表明干涉图中与地形相关的信号比例越低。如果相关性的绝对值在大气校正后减小,则表示大气垂直分层分量的影响得到改正减弱。

2　南加州地区的InSAR大气延迟改正实验结果与讨论

2.1　实验区域及数据

本文选取美国南加州地区作为数据实验区域,该地区靠近北太平洋,位于地中海型气候带,具有典型的大气效应,同时该区域覆盖有大量的GPS观测站点,利于后期结果的验证。SAR数据来源于欧洲航天局在2014年发射的搭载了C波段的SAR卫星传感器的Sentinel-1A星座,其对地观测重访周期为12 d。本文从ASF(Alaska satellite facility)收集了覆盖南加州研究区的T71降轨的干涉宽幅模式的单视复数影像40景。图像的时间跨度为2017-06-08—2018-09-19。同时,收集了SAR成像时刻对应的精密轨道数据。数字高程模型(digital elevation model,DEM)数据是由美国航空航天局(national aeronautics and space administration, NASA)提供的30 m分辨率的航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography misson,SRTM)数据。

此外,从国家气象科学数据中心(https://data.cma.cn)下载了对应时刻的中国全球大气再分析产品,通过上述方法计算大气延迟图像。选取2018-01-22为主影像,按照短基线原则,选取78个干涉对,通过GAMMA软件,利用SRTM 30 m分辨率的数据作为外部DEM,进行SBAS-InSAR数据处理。

本文GPS数据下载自南加州综合GPS网络(the southern California integrated GPS network,SCIGN,http://www.SCIGN.org)。SCIGN已建立了250多个GPS连续观测站,以监测南加州的实时三维地表变形。本实验选择了研究区域内均匀分布的38个GPS连续观测站,GPS站点在实验区域的分布如图2所示。为方便比较,将GPS测量的三维变形投影至InSAR数据LOS方向。

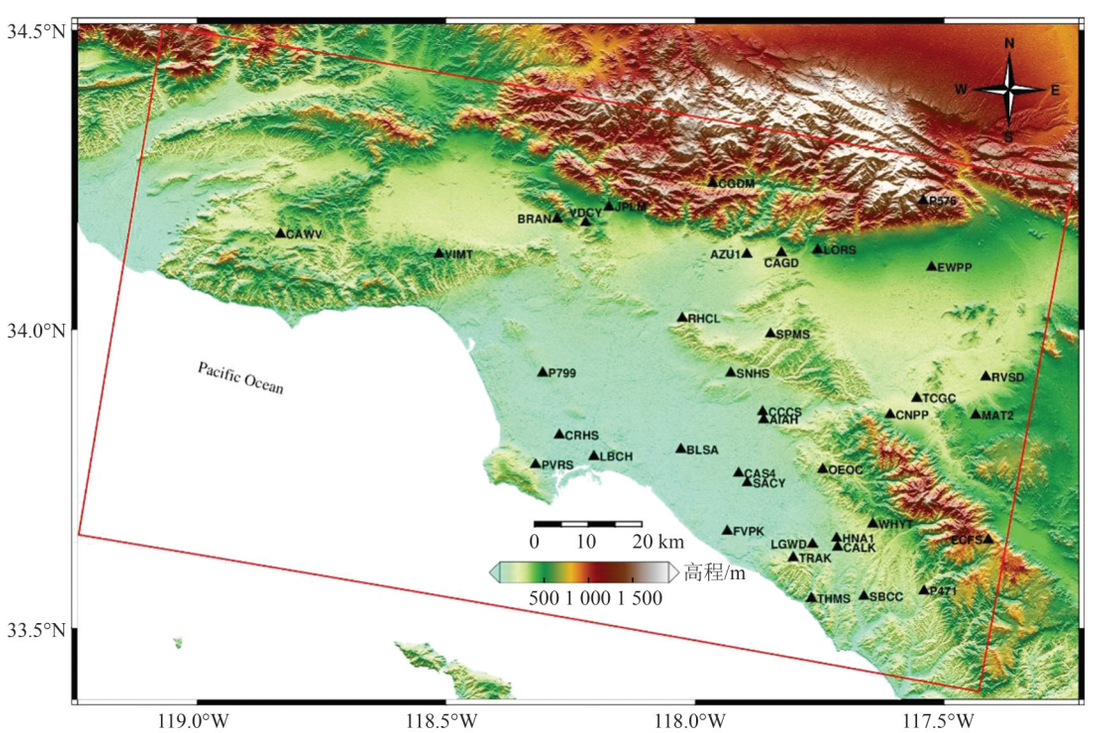


图2　实验区域及南加州GPS站点分布图

Fig. 2　Experimental Area and GPS Site Distribution Map of the Southern California

2.2　大气改正误差统计分析

2.2.1　干涉图相位标准差分析

图3显示了CRA校正前后全部78幅干涉图的标准偏差以及标准偏差的减少量。通过统计图可以观察到其存在明显的季节性特征,干涉图较高标准偏差对应时刻分别为2017年7月底至9月底、2018年7月初至2018年8月底,其次在2017年12月左右的冬季也出现了波动。原因可能由地理气候环境导致,洛杉矶位于地中海型气候带,临近大洋的地中海气候区域,由于沿岸有

寒流经过,受到海陆风的影响,夏季凉爽少日照而多雾;冬季时,西风从海洋上带来潮湿气流,锋面气旋活动频繁,气候多雨。在夏季和冬季获取的SAR影像大气影响更为严重。经过统计,差分干涉图的标准偏差和经CRA校正后的标准偏差平均值分别为3.31 rad和2.15 rad。

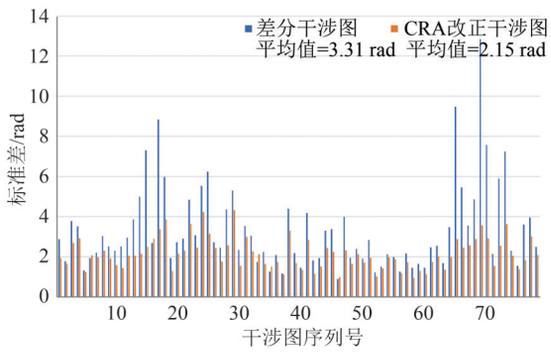


图3 78幅干涉图标准差统计

Fig. 3 Statistics of Standard Deviation of 78 Interferograms

图4为改正前后的标准偏差减少量直方图,CRA校正后,94%的干涉图标准偏差均得到有效减少,使用CRA校正后的干涉图平均标准差减小了34.7%,表明CRA能够抑制干涉图中的大气影响。同时参考标准偏差变化与干涉图的标准偏差之比作为评价因子,如图5所示,结果表明,CRA校正使干涉图标准偏差减少20%~40%居多,占比43.59%,其次是0%~20%和大于40%,分别占比28.21%和21.80%。65.4%的干涉图标准偏差减小了20%以上。

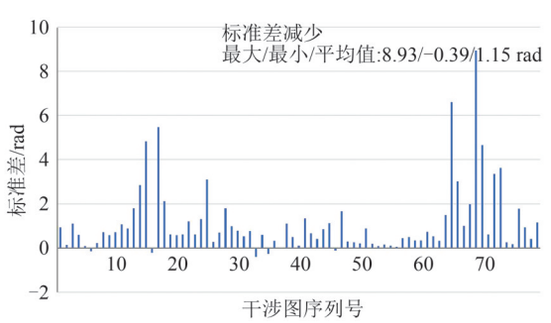


图4 CRA改正后的标准偏差减少量直方图

Fig. 4 Reduced Histogram of Standard Deviation After CRA Correction

2.2.2 干涉图空间相关性分析

在此选取了相隔12 d的3幅受沿海夏季影响、存在着典型的大气效应的干涉对进行评估,分别是2017-07-14—2017-07-26、2017-07-26—2017-08-07、2017-08-31—2017-09-12。

图6~图8是3幅差分干涉图和校正干涉图的空间结构函数的结果显示。可以明显看出,随着距离的提升,期望平方差在不断提升,但是对比差分干涉图和CRA改进后的干涉图,当距离在40 km之后,二者的期望平方差随着距离的增加不断提升,达到峰值后趋于平稳或是下降。原始干涉图的期望平方差峰值普遍在120 rad^{2}左右,而经过CRA改进后的干涉图期望平方差的峰值在20 rad^{2}左右,并且达到峰值的距离也由70 km左右缩短在50 km左右。

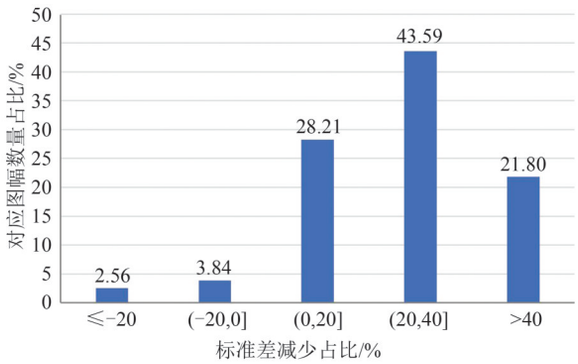


图5 标准偏差减少占比数量直方图

Fig. 5 Standard Deviation Reduced Proportion Histogram

本实验结果产生的原因可能有以下几点:(1)由于CRA的空间分辨率在34 km左右,所以在参考点40 km左右期望平方差开始出现显著性差别。(2)选择的参考点(118.028°W,33.927°N)位于图幅的中央位置左右,参考点距离图幅其他点最远距离约为90 km。(3)由于研究区域内还包含了部分海域,海域面积内的图幅点不参与计算,因此计算数目点减少,不稳定数目相比也减少,出现期望平方差降低、达到峰值后下降的情况。

2.2.3 相位-高程相关系数分析

对选取的干涉图进行整幅计算相关系数,从图9可以看出,随着高程的变化,相位部分得到5~10 rad的显著校正,整体相位的趋势更加平稳。从拟合的相关系数线来看,相关系数的绝对值得到显著降低,特别对于干涉图2017-08-31—2017-09-12而言,相关拟合系数从-0.54改进为0.04,2017-06-20—2017-07-02及2018-02-03—2018-02-15的干涉图降幅也分别达到了66%和20%。

2.3 全球数值气象模型结果对比

在此给出了使用其他两种全球数值气象模型方法的对比结果,分别是使用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的通用型InSAR大气改正在线服务系统(generic atmospheric correction online service for InSAR, GACOS)和使用ERA-Interim的PyAPS(Python-based atmospheric phase screen mitigation library)。

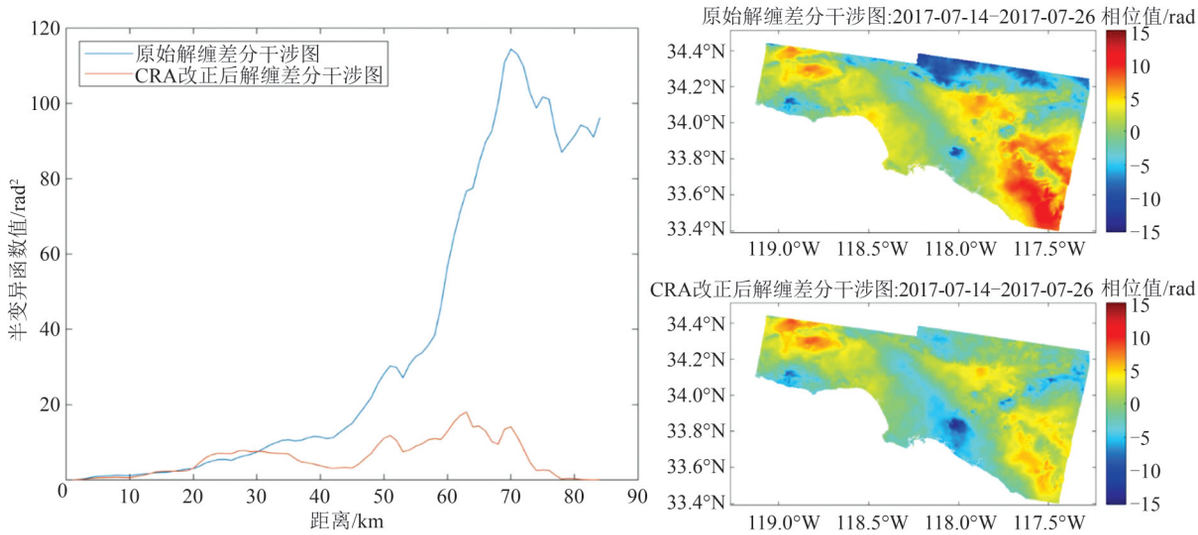


图 6　校正前后的空间结构函数统计图(2017-07-14—2017-07-26)

Fig. 6　Statistical Diagrams of Spatial Structure Functions Before and After Correction (2017-07-14—2017-07-26)

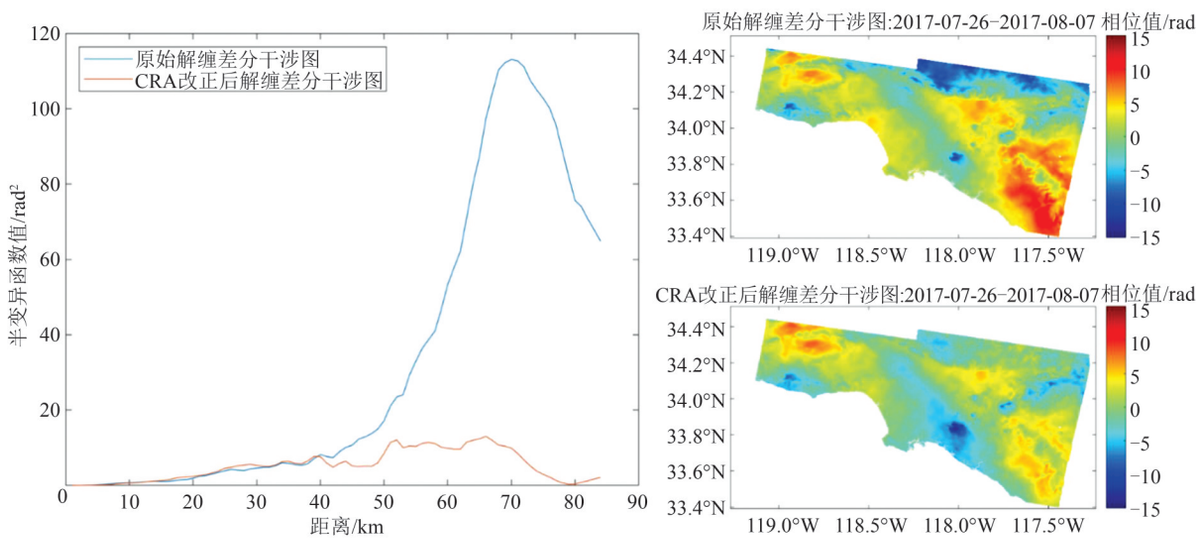


图 7　校正前后的空间结构函数统计图(2017-07-26—2017-08-07)

Fig. 7　Statistical Diagrams of Spatial Structure Functions Before and After Correction (2017-07-26—2017-08-07)

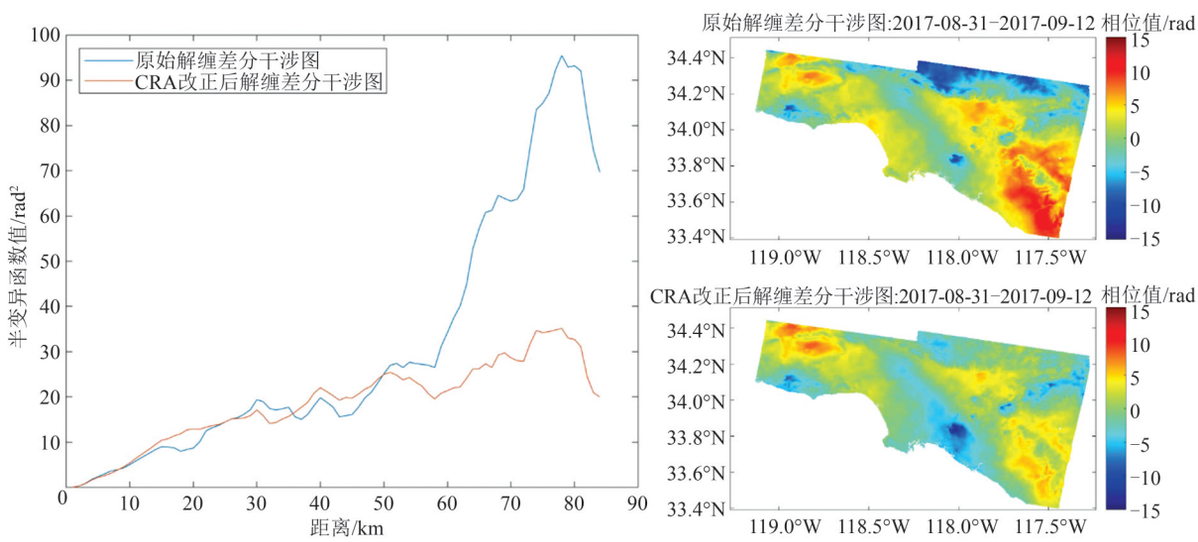


图 8　校正前后的空间结构函数统计图(2017-08-31—2017-09-12)

Fig. 8　Statistical Diagrams of Spatial Structure Functions Before and After Correction (2017-08-31—2017-09-12)

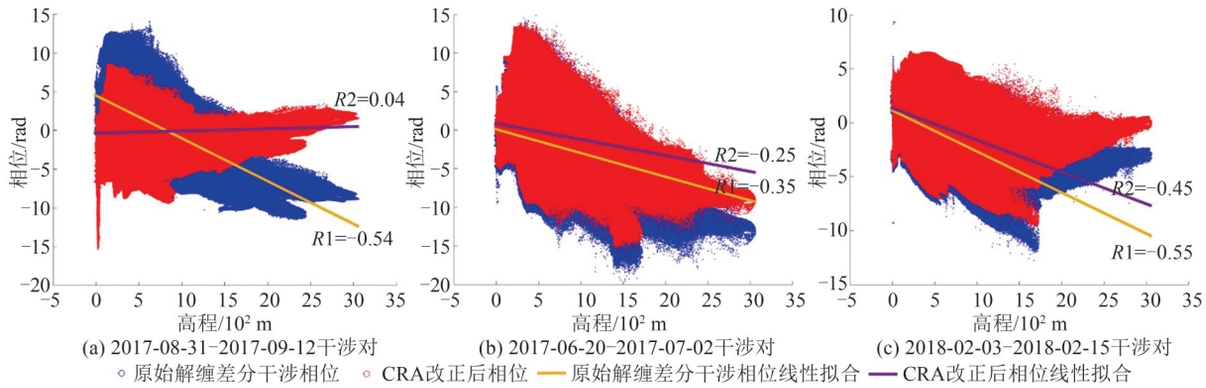


图9 相位-高程相关系数分析图

Fig. 9 Phase-Elevation Correlation Coefficient Analysis Diagram

GACOS是李振洪教授团队开发。Yu等[21]在2016年提出了一种迭代的对流层分解内插模型(iterative tropospheric decomposition interpolation model,ITD),该模型将对流层延迟分量分解为高度相关的垂直大气和湍流大气两部分,进而根据区域内一组GPS参考站的逐点值对密集的天顶总延迟场进行内插,并于2017年根据此GPS的插值方法,通过纳入数值气象数据而开发了通用的InSAR大气校正模型[38]。其组合利用GPS和HRES ECMWF组合进行大气延迟计算。为了结合ECMWF的高空间分辨率和GPS估计对流层延迟的高质量的优势,GACOS扩展了ITD方法向一体化模式转变。通过使用指数函数对地形相关的垂直分层延迟进行建模,然后通过对剩余的延迟进行基于反距离加权的内插来构造大气延迟的湍流部分[39]。

PyAPS是Jolivet团队于2012年开发的,它基于Python实现对流层分层校正软件包,可以和ECMWF的ERA-Interim、美国国家环境预报中心的北美地区再分析数据,以及NASA的现代研究与应用回顾分析的输出一并使用[40]。PyAPS通过读取DEM并确定实验区域,获取时间上和SAR图像成图时间最近的来自气象再分析数据的温度、水汽分压和位势高度的数据,并将它们除以重力加速度内插到更精细的垂直尺度,通过线性插值法及空气折射率N的积分方程计算每个网格点的LOS向延迟,针对不同采集时间对水汽图进行差分,最终得出预测的干涉图对应的分层对流层延迟图。对比结果如图10~图12所示。总体来说,所有基于全球数值气象模型的校正都减少了数据中对流层大气延迟,特别在图示区域的左上方及右下方的山区部分,高程相关的大气得到明显抑制。对上述实验结果通过标准偏差(standard deviation,STD)进行定量描述对比,结果如表1所示,整体STD均得到有效降低。单个方法对比而言,GACOS方法能取得一定效果,但同时可能存在如2017-07-26—2017-08-07干涉图中上方存在过度改正情况;PyAPS方法对主要大气影响具有一定效果,但同时可能如2017-08-31至2017-09-12干涉图引入了西北至东南方向的误差情况。基于CRA的方法平均能改进35%左右,较平均改进30%的GACOS和PyAPS方法更佳。

2.4 形变速率结果比较

图13显示了2017-06-18—2018-09-19期间加利福尼亚州南部的InSAR平均视线形变速度图(单位:cm/a),基本底图像是灰度SAR图像。基于短基线原则(垂直基线小于150 m、时间基线小于等于36 d)获得的78幅干涉图,分别用经典的SBAS-InSAR和基于CRA的SBAS-InSAR计算了2017年6月至2018年9月的LOS向平均形变速率图。两种方法的平均形变速率结果较为相似,整体人类活动区域的地表呈现出下沉的趋势,最大下沉速率在4 cm/a左右,特别在Santa Ana和Los Angeles以及West Covina盆地处下沉较为明显,年平均下沉速率在1~2 cm/a左右,以及在Ontraio处出现符合该城市形状的下沉。特别值得注意的是,在Santa Ana附近以及Cerritos附近可以观察到沉降速率较为明显的改进,以及在(117.5°W,33.8°N)山体部分改进效果较为明显,除少部分山体仍然受大气影响外,其余的形变速率相对减缓。

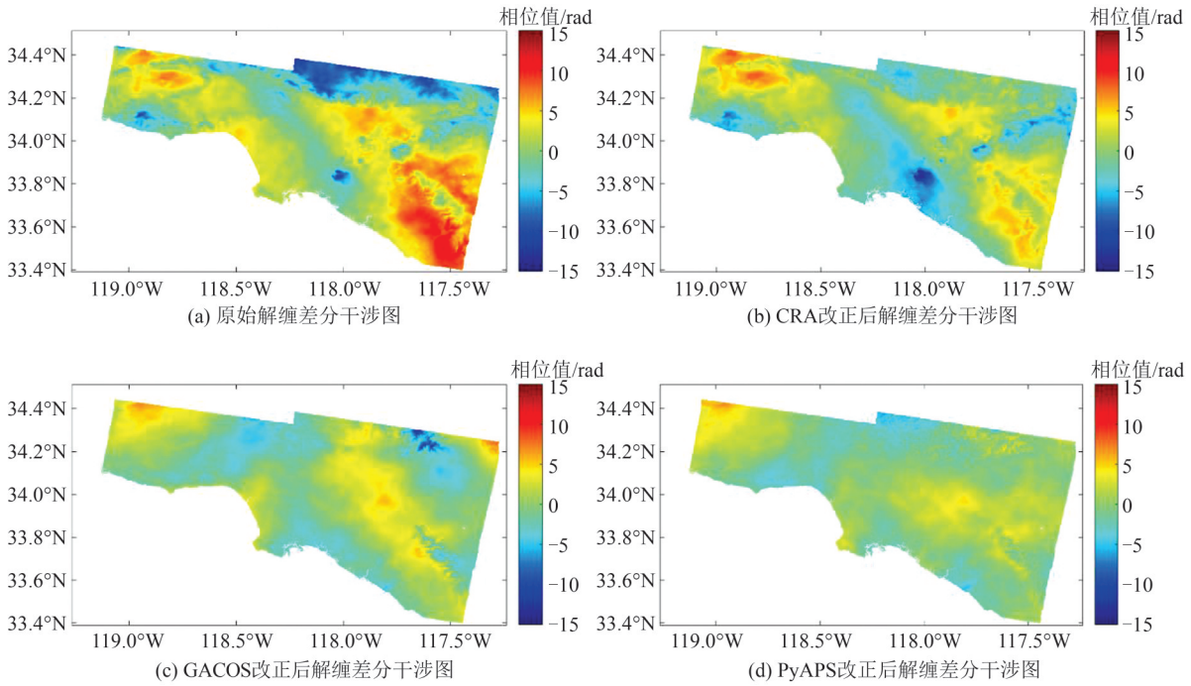


图 10　2017-07-14—2017-07-26 干涉对对比实验

Fig. 10　Comparative Experiment of 2017-07-14—2017-07-26 Interference Pair

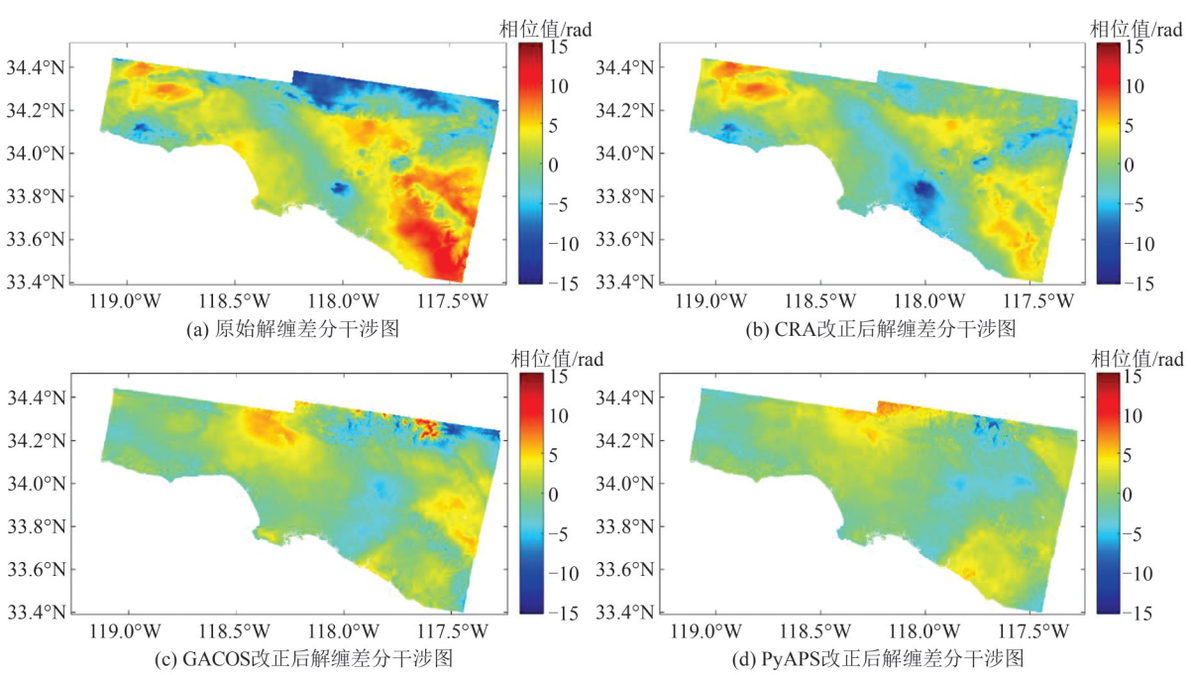
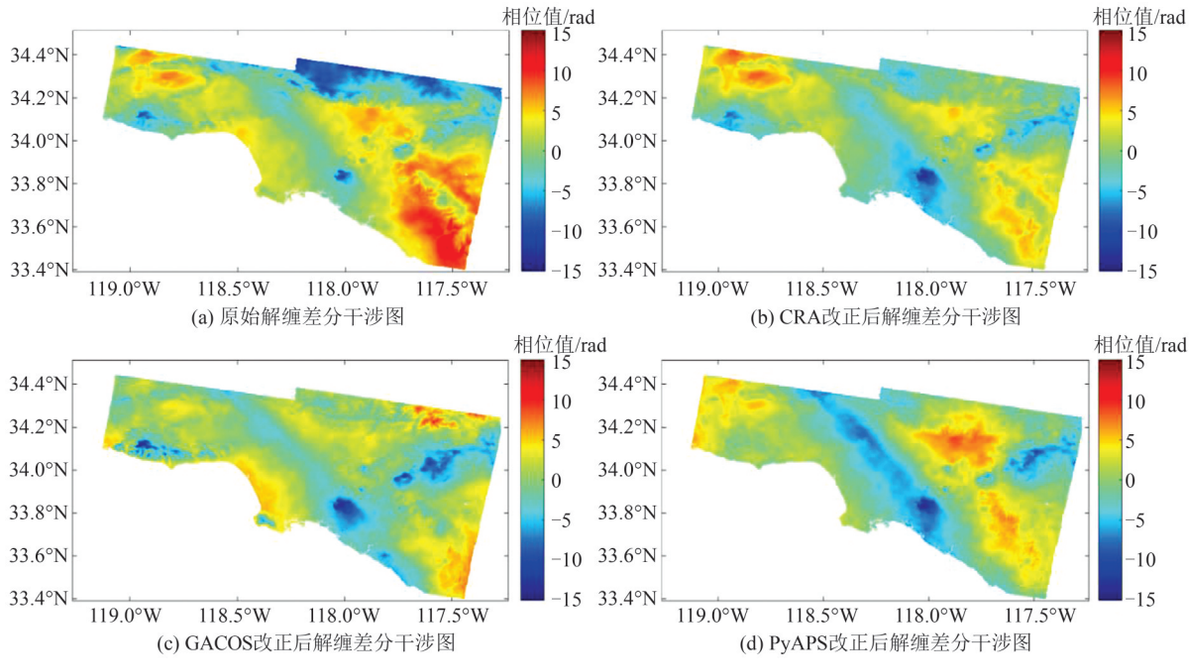


图 11　2017-07-26—2017-08-07 干涉对对比实验

Fig. 11　Comparative Experiment of 2017-07-26—2017-08-07 Interference Pair

2.5　基于GPS的大气改正效果评估

为了验证CRA大气产品在时间序列InSAR中的改正效果,比较了基于CRA的SBAS-InSAR、经典的SBAS-InSAR和在LOS向投影的GPS的时序变化,并对比对应GPS点位的平均形变速率,评价CRA大气产品的改正效果和基于CRA的SBAS-InSAR方法的精度。通过将GPS三分量的形变监测结果投影到InSAR结果的LOS方向,选取JPLM站点为GPS基准站,计算对应InSAR结果在此处的形变量级,计算差值为校正常数,由此将InSAR结果统一到GPS的框架下进行比较,时序结果如图14所示。



(a) 原始解缠差分干涉图　(b) CRA改正后解缠差分干涉图

(c) GACOS改正后解缠差分干涉图　(d) PyAPS改正后解缠差分干涉图

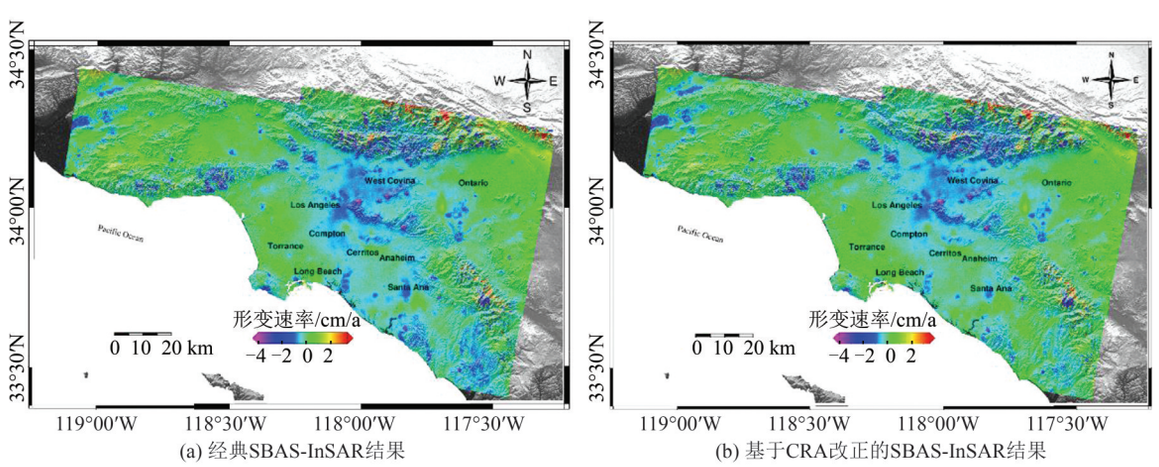
图12　2017-08-31—2017-09-12对比实验图

Fig. 12　Comparative Experiment of 2017-08-31—2017-09-12 Interference Pair

表1　全球数值气象模型改正效果(标准偏差)对比

Table 1　Comparison of Correction Effects (Standard Deviation) of Global Numerical Meteorological Models

干涉对名称	差分干涉对	CRA方法及效果	GACOS方法及效果	PyAPS方法及效果
2017-07-14—2017-07-26	2.686 2	1.558 1(42.0%)	1.821 1(32.2%)	1.424 5(47.0%)
2017-07-26—2017-08-07	2.579 6	1.484 0(42.5%)	1.680 2(34.9%)	1.624 8(37.0%)
2017-08-31—2017-09-12	2.808 0	2.155 3(23.2%)	2.012 4(28.3%)	2.643 0(5.9%)



(a) 经典SBAS-InSAR结果　(b) 基于CRA改正的SBAS-InSAR结果

图13　形变速率结果对比图(2017-06-18—2018-09-19)

Fig. 13　Comparison of Deformation Rate Results(2017-06-18—2018-09-19)

从全部的时序结果来看,CRA改正过后的时序变化更加接近GPS的趋势。表2比较了基于CRA的SBAS-InSAR和传统SBAS-InSAR与GPS在LOS方向上的相对误差。总的来说,经过CRA改正后的21个点与GPS的差异减小,17个点的差异增加。SBAS-InSAR的均方误差为1.63 cm/a,基于CRA的SBAS-InSAR的均方误差为1.43 cm/a,说明CRA改正提高了变形监测的整体精度。

结合GPS站位置和时序图分析,认为存在误差有以下几点原因:(1)受速率拟合结果的影响,时序结果中部分偏离GPS,如BLSA、CALK、CRHS、LBCH等站点,时序上的整体趋势更加接

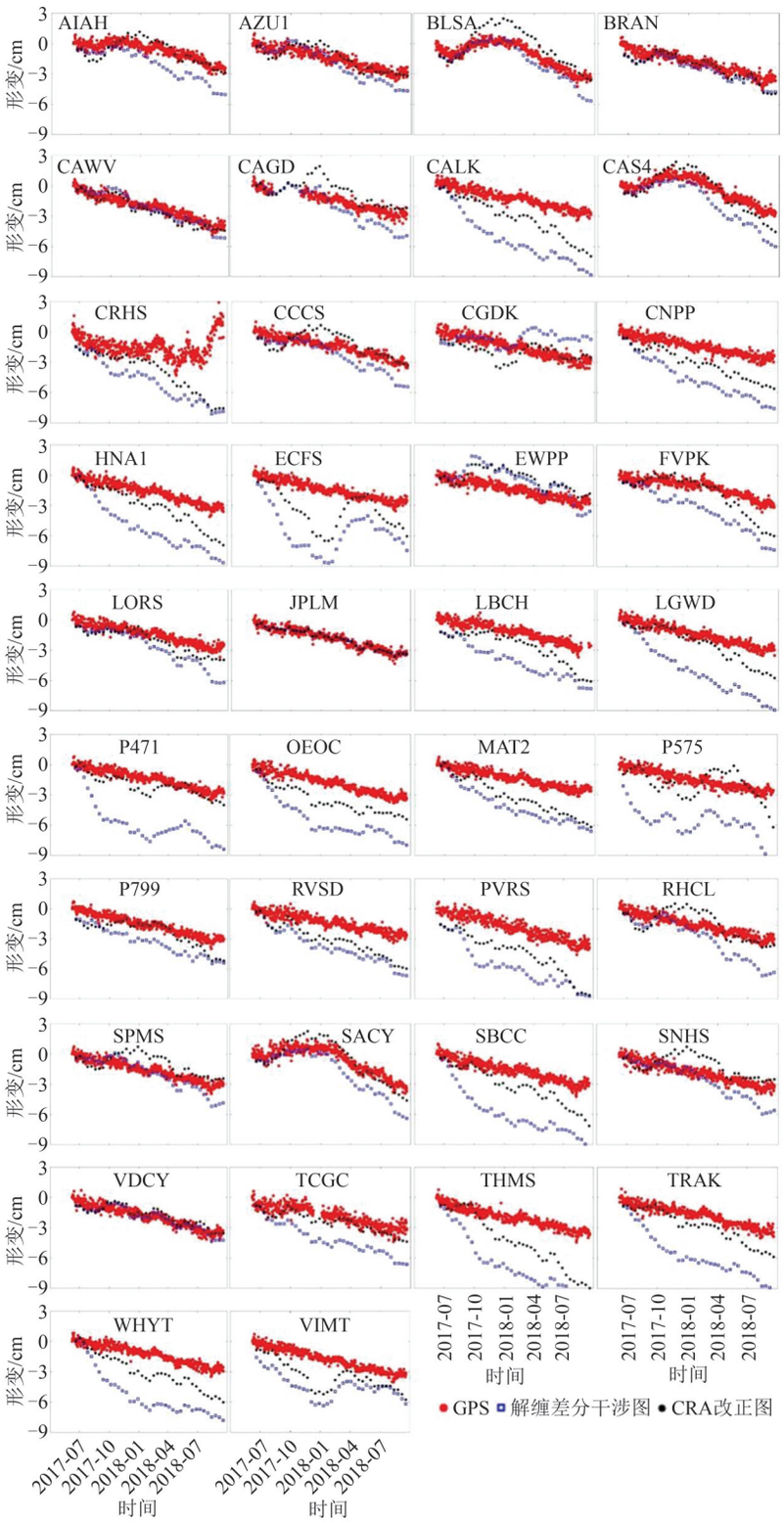


图 14　GPS站数据和传统SBAS-InSAR、基于CRA的SBAS-InSAR时序对比结果

Fig. 14　Time Series Comparison Results of GPS Station Data and the Classic SBAS-InSAR and the SBAS-InSAR Based on CRA

表 2　GPS对应站点与基于CRA的SBAS-InSAR和基于CRA的SBAS-InSAR的相对误差的总体比较

Table 2　Relative Error Overall Comparison Between GPS Corresponding Sites and the SBAS-InSAR Based on CRA and the Classic SBAS-InSAR

相对误差增加数量	误差减少数量	最大误差 /(cm·a^{-1})	均方误差 σ	
			传统SBAS-InSAR	基于CRA的SBAS-InSAR
17	21	3.986	1.63	1.43

近GPS的结果,但是总体沉降量偏离GPS导致拟合的形变速率产生了较大的误差。(2)受原始部分干涉对的影响,时序上的变化主要集中于夏季和冬季产生了和GPS较大的差异,如THMS和VIMT站结果,此时正是南加州受季风影响较严重的时候,部分干涉图受尺度较小的大气湍流的影响。(3)CRA数据和GPS数据空间分辨率的差异,CRA产品时间分辨率为6 h,空间分辨率为全球34 km,对于部分干涉图中的大气能够减弱却并不能完全消除,导致最终结果和GPS间存在差异。

3 结 语

本文提出了一种InSAR对流层延迟改正方法,该方法的主要特点是:(1)利用了CRA计算对流层延迟;(2)顾及气象参数物理特性,结合了不同高度对流层的空间随机模型,以便更好地计算CRA对流层样本;(3)直接沿卫星视线方向计算对流层延迟的积分。将其应用于南加州实验区域,对改正后干涉图评估分析,并运用GPS数据验证时序形变。结果表明:(1)基于CRA的InSAR大气改正方法可以改善大气延迟影响,说明利用分辨率较低的全球大气模型数据建立高分辨率InSAR对流层延迟图时考虑对流层随机模型的有效性;(2)校正后的干涉图平均标准差减小了34.7%,65%的干涉图平均标准差减小了20%以上;(3)干涉图空间结构函数的期望平方差显著性下降表明该产品能有效抑制长波大气;(4)相关性的拟合系数变化表明该产品能够有效降低高程影响带来的大气垂直分层分量。

本文说明了CRA产品在InSAR大气校正上的有效性。通过定量评估可以使研究人员更加充分了解此产品的校正效果和性能,有助于促进该产品的应用和发展。特别对于较大的研究区域范围(40 km及以上),受高程影响大气变化显著时,或是受水汽影响严重以及研究区域存在数十千米及以上大规模大气运动导致大气延迟影响较为显著时,应用CRA可以得到有效的改正。此外,由于外部数据的差异性,后续研究可以将GNSS数据联合CRA解算,以提高InSAR大气改正精度。

参 考 文 献

[1] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry[J]. *Nature*, 1993, 364: 138-142.

[2] ZEBKER H A, ROSEN P. On the Derivation of Coseismic Displacement Fields Using Differential Radar Interfe-rometry: The Landers Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research B*, 2002, 99(B10): 19617-19634.

[3] HU J, LI Z W, DING X L, et al. 3D Coseismic Displacement of 2010 Darfield, New Zealand Earthquake Estimated from Multi-aperture InSAR and D-InSAR Measurements [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(11): 1029-1041.

[4] 许文斌, 罗兴军, 朱建军, 等. InSAR火山形变监测与参数反演研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1632-1642.
XU Wenbin, LUO Xingjun, ZHU Jianjun, et al. Review of Volcano Deformation Monitoring and Modeling with InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1632-1642.

[5] XU B, LI Z W, FENG G C, et al. Continent-Wide 2-D Coseismic Deformation of the 2015 Mw 8.3 Illapel, Chile Earthquake Derived from Sentinel-1A Data: Correction of Azimuth Co-Registration Error [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(5): 376.

[6] 李达, 邓喀中, 高晓雄, 等. 基于SBAS-InSAR的矿区地表沉降监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(10): 1531-1537.
LI Da, DENG Kazhong, GAO Xiaoxiong, et al. Monitoring and Analysis of Surface Subsidence in Mining Area Based on SBAS-InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(10): 1531-1537.

[7] 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.

[8] YANG Z F, LI Z W, ZHU J J, et al. Deriving Time-Series Three-Dimensional Displacements of Mining Areas from a Single-Geometry InSAR Dataset [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(5): 529-544.

[9] LI Z W, CAO Y M, WEI J C, et al. Time-Series InSAR Ground Deformation Monitoring: Atmospheric Delay Modeling and Estimating[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 192: 258-284.

[10] ZEBKER H A, ROSEN P A, HENSLEY S. Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aper-

ture Radar Surface Deformation and Topographic Maps[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B4): 7547-7563.

[11] HANSSEN R F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis[M]. Dordrecht Springer Netherlands, 2001,

[12] LI Z W, DING X L, HUANG C, et al. Modeling of Atmospheric Effects on InSAR Measurements by Incorporating Terrain Elevation Information [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, 68(11): 1189-1194.

[13] XU W B, LI Z W, DING X L, et al. Interpolating Atmospheric Water Vapor Delay by Incorporating Terrain Elevation Information[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(9): 555-564.

[14] BEKAERT D P S, WALTERS R J, Wright T J, et al. Statistical Comparison of InSAR Tropospheric Correction Techniques[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 170: 40-47.

[15] CAO Y M, LI Z W, WEI J C, et al. Stochastic Modeling for Time Series InSAR: With Emphasis on Atmospheric Effects [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(2): 185-204.

[16] WEI J C, LI Z W, Hu J, et al. Anisotropy of Atmospheric Delay in InSAR and Its Effect on InSAR Atmospheric Correction [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(2): 241-265.

[17] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375-2383.

[18] FUKUSHIMA Y. Atmospheric Phase Delay Estimation from Multiple SAR Interferometry Measurements [C]//Fringe 2011 Workshop, Italy, Frascati, 2011.

[19] 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.

[20] LI Z H, FIELDING E J, CROSS P, et al. Interferometric Synthetic Aperture Radar Atmospheric Correction: GPS Topography-Dependent Turbulence Model[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B2): B02404.

[21] YU C, PENNA N T, LI Z H. Generation of Real-Time Mode High-Resolution Water Vapor Fields from GPS Observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(3): 2008-2025.

[22] LI Z H. Correction of Atmospheric Water Vapour Effects on Repeat-Pass SAR Interferometry Using GPS, MODIS and MERIS Data[D]. UK: University of London, 2005

[23] 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.

[24] JUNG J, KIM D J, PARK S E. Correction of Atmospheric Phase Screen in Time Series InSAR Using WRF Model for Monitoring Volcanic Activities[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(5): 2678-2689.

[25] 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.

[26] HU Z B, MALLORQUÍ J J. An Accurate Method to Correct Atmospheric Phase Delay for InSAR with the ERA5 Global Atmospheric Model[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(17): 1969.

[27] CAO Y M, JÓNSSON S, LI Z W. Advanced InSAR Tropospheric Corrections from Global Atmospheric Models that Incorporate Spatial Stochastic Properties of the Troposphere[J]. *Journal of Geophysical Research* (*Solid Earth*), 2021, 126(5): e2020JB020952.

[28] 王旻燕, 姚爽, 姜立鹏, 等. 我国全球大气再分析(CRA-40)卫星遥感资料的收集和预处理[J]. 气象科技进展, 2018, 8(1): 158-163.
WANG Minyan, YAO Shuang, JIANG Lipeng, et al. Collection and Pre-Processing of Satellite Remote-Sensing Data in CRA-40(CMA's Global Atmospheric ReAnalysis)[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2018, 8(1): 158-163.

[29] 师春香. 多源融合网格实况数据与我国第一代全球大气再分析产品研发与应用进展[R]. 北京:智慧地球大讲堂,2021.
SHI Chunxiang. Multi-source Fusion Grid Live Data and the Development and Application Progress of the First Generation Global Atmospheric Reanalysis Products in China [R]. Beijing: Intelligent Earth Lecture Hall,2021.

[30] YU X J, ZHANG L X, ZHOU T J, et al. The Asian Subtropical Westerly Jet Stream in CRA-40, ERA5, and CFSR Reanalysis Data: Comparative Assessment [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1): 46-63.

[31] 姚宜斌, 张良, 张琦, 等. 面向大高差RTK的对流

层延迟改正模型及实时差分服务构建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1019-1028.
YAO Yibin, ZHANG Liang, ZHANG Qi, et al. Tropospheric Delay Model and Real-Time Differencial Service for Large Height Difference RTK[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1019-1028.

[32] HU Y F, YAO Y B. An Accurate Height Reduction Model for Zenith Tropospheric Delay Correction Using ECMWF Data[M]//Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2017: 337-348.

[33] ONN F, ZEBKER H A. Correction for Interferometric Synthetic Aperture Radar Atmospheric Phase Artifacts Using Time Series of Zenith Wet Delay Observations from a GPS Network[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B9): 2005JB004012.

[34] 周文斌, 许文斌, 李志伟, 等. 考虑高程信息的MERIS水汽插值及其在ASAR干涉图大气改正中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(8): 963-966.
ZHOU Wenbin, XU Wenbin, LI Zhiwei, et al. Elevation-Dependent MERIS Water Vapor Interpolation and Its Application to Atmospheric Correction on ASAR Interferogram[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(8): 963-966.

[35] XU B, LI Z W, WANG Q J, et al. A Refined Strategy for Removing Composite Errors of SAR Interferogram[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11: 143-147.

[36] 高壮, 何秀凤, 肖儒雅, 等. 一种联合估计形变和大气误差的改进LiCSBAS方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(2): 285-294.
GAO Zhuang, HE Xiufeng, XIAO Ruya, et al. An Improved LiCSBAS Method for Joint Estimation of Deformation and Atmospheric Errors[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(2): 285-294.

[37] XIAO R Y, YU C, LI Z H, et al. Statistical Assessment Metrics for InSAR Atmospheric Correction: Applications to Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS) in Eastern China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 96: 102289.

[38] YU C, LI Z H, PENNA N T, et al. Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2018, 123(10): 9202-9222.

[39] YU C, LI Z H, PENNA N T. Interferometric Synthetic Aperture Radar Atmospheric Correction Using a GPS-Based Iterative Tropospheric Decomposition Model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 109-121.

[40] AGRAM P S, JOLIVET R, RIEL B, et al. New Radar Interferometric Time Series Analysis Toolbox Released[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2013, 94(7): 69-70.

(上接第948页)

Shenyang Municipal Bureau of Statistics. Shenyang Statistical Yearbook 2021[EB/OL]. (2021-11) [2022-08-18]. http://tjj.shenyang.gov.cn/sjfb/ndsj/.

[37] ZHU Q, LIAO C, HU H, et al. MAP-Net: Multiple Attending Path Neural Network for Building Footprint Extraction from Remote Sensed Imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(7): 6169-6181.

[38] SELVARAJU R R, COGSWELL M, DAS A, et al. Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks *via* Gradient-Based Localization[C]// 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Venice, Italy, 2017.

[39] MA N N, ZHANG X Y, ZHENG H T, et al. ShuffleNet V2: Practical Guidelines for Efficient CNN Architecture Design[C]//The 15th European Conference on Computer Vision, Munich, Germany, 2018.

[40] SANDLER M, HOWARD A, ZHU M L, et al. MobileNet V2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, UT, USA, 2018.