

ENVISAT和ALOS卫星SAR影像提取地表沉降的对比试验

田学军, 刘鑫, 姜艳菊

北京航天世景信息技术有限公司, 北京

收稿日期: 2023年3月17日; 录用日期: 2023年4月18日; 发布日期: 2023年4月26日

摘要

本文介绍双轨法差分干涉测量中的数学模型及计算公式, 并以ENVISAT和ALOS两种卫星得到的影像数据分析得到某一地区的地表沉降值, 分析二者影像的不同点以及各自数据的特点。进行差分干涉处理, 并进一步提取出地表沉降量, 并且展开分析。对比解译和分析ENVISAT ASAR数据和ALOS PALSAR数据提取的差分干涉图和形变值, 并最终得出二者卫星在提取地表形变中可行性的结论。

关键词

InSAR, ENVISAT, ALOS, 差分干涉测量, 地表沉降

Comparative Experiment of Land Subsidence Extraction from ENVISAT and ALOS Satellite SAR Images

Xuejun Tian, Xin Liu, Yanju Jiang

Beijing Aerospace Shijing Information Technology Co., Ltd., Beijing

Received: Mar. 17th, 2023; accepted: Apr. 18th, 2023; published: Apr. 26th, 2023

Abstract

This paper introduces the mathematical model and calculation formula in the two-track differential interferometry, and analyzes the land subsidence value of a certain area by using the image data obtained from ENVISAT and ALOS satellites, and analyzes the differences between the two images and the characteristics of their respective data. Carry out differential interference processing,

and further extract and analyze the surface settlement. Comparative interpretation and analysis of differential interferograms and deformation values extracted from ENVISAT ASAR data and ALOS PALSAR data, and ultimately a conclusion that the two satellites are feasible in extracting surface deformation is reached.

Keywords

InSAR, ENVISAT, ALOS, Differential Interferometry, Surface Subsidence

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地面沉降是一种可由多种因素引起的地面标高缓慢降低的环境地质现象, 严重时会成为一种地质灾害。可能为人类社会带来一系列严重危害, 如适宜人类生存发展的安全地面高度的丧失, 房屋、道路、地铁及桥梁等建筑物的损坏, 潮灾、涝灾灾情的加重等。地面沉降不仅给社会发展带来重大的经济损失, 也严重威胁着人类的生命和财产安全。地表沉降, 主要是由于地下水和其他地下资源(比如石油, 天然气, 煤炭)的过分开采引起的。出现地面沉降的地区一般范围大, 沉降过程缓慢, 所以早期一般不易察觉, 也不易引起人们的重视。它多发生在大中城市, 对人们的生产、生活、交通等影响极大, 造成的损失和危害也大, 成为一种严重的环境地质问题, 影响和制约着当地国民经济的可持续发展。InSAR (合成孔径雷达干涉测量)是近几年迅速发展起来的高新技术, 它是使用雷达信号的相位信息提取地球表面三维信息。主要应用于测量地面点的高程及其动态变化的测量[1]。InSAR 技术能全天候、全天时地获取大面积地面精确三维信息, 空间分辨率高, 基本不受气候条件的影响。干涉成像雷达遥感与 GPS 的区别在于它具有比 GPS 更高的形变观测精度、采样密度高(100 m 之内)、空间延续性好和无需建立地面接收站。INSAR 与其它测量形变位移仪器的区别在于那些测量仪器成本高, 布点少, 且难以大范围追踪地壳形变。相关文献做了大量研究并取得了丰硕的成果[2]。

本论文以 ERS-1/2 卫星获取某地区的雷达影像, 藉由 GAMMA 干涉处理程序以合成孔径雷达干涉技术生成垂直位移图。用不同时期产生的精度地形计算地表沉降。并探讨干涉生成过程中, 不同模式影像对于精度地形计算地表沉降之影响。

2. 二轨法差分误差特性分析

单视复影像 slc1 与 slc3 分别于形变前后获取, 以 slc1 为主图像与 slc3 进行干涉。图 1 为图像的成像几何关系, $\bar{S}_3 = [x_3, y_3, z_3]^T$ 、 $\bar{S}_1 = [x_1, y_1, z_1]^T$ 分别为成像中心时刻卫星在地心笛卡儿坐标系下的位置, B_{13} 为基线矢量, α_1 为雷达下视角, β_1 为雷达斜视角, β_3 与 φ_3 分别为基线 \bar{B}_{13} 的方位角与高度角, O 点为地心, T 为目标点, \bar{h} 为形变矢量[3]。

为了计算方便, 通过配准和共轭相乘后得到的干涉相位可以表示为

$$\phi_{13} \approx \phi_{topo} + \phi_{defo} \quad (1)$$

其中,

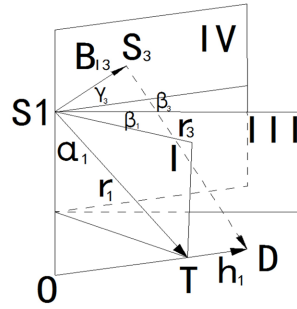


Figure 1. The geometric relationship between slc1 and slc2 imaging

图 1. Slc1 与 slc2 成像几何关系

$$\begin{aligned}\phi_{topo} &= -\frac{4\pi}{\lambda} B_{13pr} = -\frac{4\pi}{\lambda} \langle \bar{B}_{13}, \bar{r}_1^u \rangle \\ &= -\frac{4\pi}{\lambda} B_{13} [\sin \alpha_1 \cos \varphi_3 \cos(\beta_1 + \beta_3) - \sin \varphi_3 \cos \alpha_1]\end{aligned}\quad (2)$$

$$\phi_{defo} = -\frac{4\pi}{\lambda} h_r = -\frac{4\pi}{\lambda} \langle \bar{r}_1^u, \bar{h} \rangle \quad (3)$$

利用观测区已知的 DEM (数字高程)数据确定出地形相位 ϕ_{topo} ，并将其从干涉相位中去除掉，利用剩余的形变相位反演地表形变[4]。

当我们得到观测区的 DEM 数据后，就可以通过 R-D 定位方法得到 T 的位置，此时利用下式就可以得到地形相位。

$$\phi_{topo} = -\frac{4\pi}{\lambda} \left(r_1 - \langle \bar{T} - \bar{S}_3, \bar{T} - \bar{S}_3 \rangle^{\frac{1}{2}} \right) \quad (4)$$

其中 r_1 由回波延迟读出， \bar{S}_3 由卫星测量设备得到。

地形相位去除后，就可以从形变相位中反演出实现向形变 h_r ：

$$h_r = \frac{\lambda}{4\pi} (\phi_{13} - \phi_{topo}) \quad (5)$$

将地形相位公式(4)中的矢量 $\bar{T} - \bar{S}_3$ 记为 r_{TS} ，则 r_{TS} 代表目标点 T 到 s_3 的距离，其数值可由(6)式计算

$$r_{TS} = \sqrt{\langle \bar{r}_1 - \bar{B}_{13}, \bar{r}_1 - \bar{B}_{13} \rangle} \quad (6)$$

地形相位表示成标量形式为 $\phi_{topo} = -\frac{4\pi}{\lambda} (r_1 - r_{TS})$ 。假设已知基线的三维分量 $\phi_{topo} = -\frac{4\pi}{\lambda} (r_1 - r_{TS})$ ， \bar{r}_1 有回波延迟得出，则 \bar{r}_1 表示为：

$$\bar{r}_1 = r_1 (\sin \alpha_1 \cos \beta_1, \sin \alpha_1 \sin \beta_1, \cos \alpha_1) \quad (7)$$

此时，可以将(6)写成如下形式：

$$\begin{aligned}r_{TS} &= \sqrt{(B_{13x} - r_1 \sin \alpha_1 \cos \beta_1)^2 + (B_{13y} - r_1 \sin \alpha_1 \sin \beta_1)^2 + (B_{13z} - r_1 \cos \alpha_1)^2} \\ &= \sqrt{B_{13}^2 + r_1^2 - 2r_1 B_{13pr}}\end{aligned}\quad (8)$$

其中角度 α_1 与 T 点的地心距 H 有关，设 R 为 S_1 到地心 O 的距离，则有：

$$\cos \alpha_1 = \frac{R^2 + r_1^2 - H^2}{2Rr_1} \quad (9)$$

下面计算干涉相位 ϕ_{13} 、高程 H 、基线三维值 $(B_{13x}, B_{13y}, B_{13z})^T$ 误差对视线向形变的误差传播系数，首先，将视线向形变反演公式(5)对 ϕ_{13} 求偏导得

$$\frac{\partial h_r}{\partial \phi_{13}} = \frac{\lambda}{4\pi} \quad (10)$$

同理，求 h_r 对其他各变量的偏导为

$$\frac{\partial h_r}{\partial B_{13x}} = \frac{r_1 \sin \alpha_1 \cos \beta_1 - B_{13x}}{r_{TS}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial h_r}{\partial B_{13y}} = \frac{r_1 \sin \alpha_1 \sin \beta_1 - B_{13y}}{r_{TS}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial h_r}{\partial B_{13z}} = \frac{r_1 \cos \alpha_1 - B_{13z}}{r_{TS}} \quad (13)$$

公式(10)、(11)、(12)、(13)为二轨法差分干涉处理中的几个主要的误差传播系数计算公式。

由上面的误差传播系数可以看出，在“二轨法”差分干涉处理中，干涉相位的误差传播系数仅仅与波长有关，当波长较短时干涉相位误差对视线向形变的影响会明显减小。所以，在相同精度要求下，利用 ENVISAT ASAR 卫星图像进行“二轨法”差分干涉处理比利用 PALSAR 卫星图像进行“二轨法”差分干涉处理对干涉相位误差的容忍程度要高得多，因为 ENVISAT ASAR 所搭载的合成孔径雷达工作在 C 波段，PALSAR 所搭载的合成孔径雷达工作在 L 波段[5]。

3. ALOS 卫星的数据处理

日本地球观测卫星计划主要包括 2 个系列：大气和海洋观测系列以及陆地观测系列。先进对地观测卫星 ALOS 是 JERS-1 与 ADEOS 的后继星，采用了先进的陆地观测技术，能够获取全球高分辨率陆地观测数据，主要应用目标为测绘、区域环境观测、灾害监测、资源调查等领域。ALOS 卫星载有三个传感器：全色遥感立体测绘仪(PRISM)，主要用于数字高程测绘；先进可见光与近红外辐射计-2 (AVNIR-2)，用于精确陆地观测；相控阵型 L 波段合成孔径雷达(PALSAR)，用于全天时全天候陆地观测。ALOS 卫星采用了高速大容量数据处理技术与卫星精确定位和姿态控制技术，其分辨率可达 2.5 米。作为一颗科研卫星，ALOS 和同类卫星相比具有影像质量高，价格低廉等特点。

3.1. 数据处理

以 ALOS 卫星获取的某一地区 2019 年 01 月 10 日到 2019 年 02 月 25 日的数据为例。

1) 生成干涉图

生成干涉图如图 2 所示。



Figure 2. Comparison of generated interferograms
图 2. 生成的干涉图对比

2) 去除地形影响

去除地形影响后如图 3 所示。

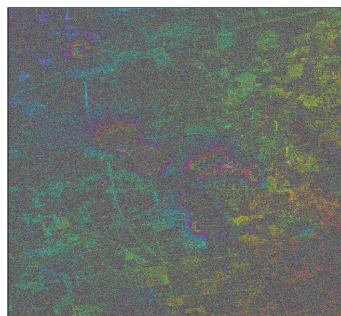


Figure 3. Comparison after removing the influence of terrain

图 3. 去除地形影响后的对比

3) 滤波

滤波处理之后效果如图 4 所示。

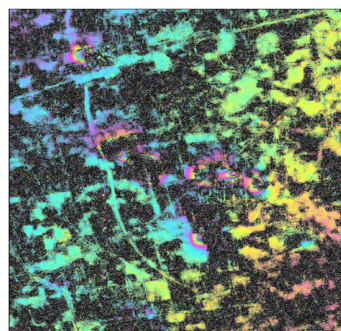


Figure 4. Comparison after filtering

图 4. 滤波处理后的对比

4) 相位解缠

相位解缠之后效果如图 5 所示。

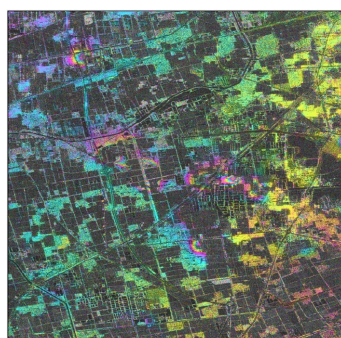


Figure 5. Comparison after phase unwrapping

图 5. 相位解缠后的对比

5) 二轨差分

二轨差分处理之后效果如图 6 所示。

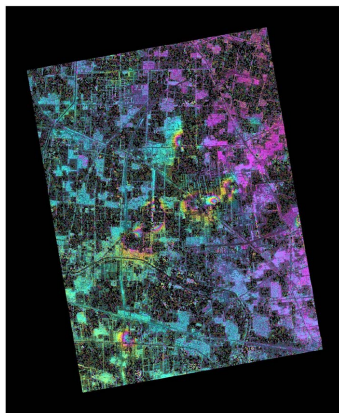


Figure 6. Comparison after two-track differential processing

图 6. 二轨差分处理后的对比

3.2. 提取剖面线的形变信息

由于时间短和 SAR 技术的测量精度不很高，本实验就提取此地区的某几条重要的线，利用提取这几条线的垂直形变信息，每个象元点的灰度值均表示形变量。依次累加的形变信息图中提取了一条线的形变信息，得到每次测量的形变量累加值，并依次按时间显示。红色的曲线表示从 2019 年 1 月 10 日至 2019 年 2 月 25 日被提取的线的每个象元点形变量；黄色的曲线表示从 2019 年 2 月 25 日至 2020 年 1 月 13 日被提取的线的每个象元点形变量；绿色的曲线表示从 2020 年 1 月 13 日至 2020 年 2 月 28 日被提取的线的每个象元点形变量；纵轴的单位为 m。下沉量统计如表 1 所示，下沉示意图如图 7 所示。

Table 1. Settlement statistics of profile line

表 1. 剖面线下沉量统计

影像图幅 坐标值	90110-90225	90220-0113	00113-00228
661-830	-10	-160	-68
640-826	-175	-300	-89
622-822	-255	-490	-87
592-826	-185	-230	-69
57,823	-15	-94	-53

从上面所得的数据以及图表可知剖面线在 2019 年 1 月 10 日到 2019 年 2 月 25 日下沉较小，最大为 250 mm，平均月下沉量为 50 mm/月。在 2019 年 2 月 25 日到 2020 年 1 月 13 日这段时间下沉较大，最大为 500 mm，平均月下沉量为 30 mm/月。在 2020 年 1 月 13 日到 2020 年 2 月 28 日下沉最大为 90 mm，平均月下沉量为 35 mm/月。因为坐标点 640-826，622-822，582-826 经过采煤区域，所以下沉量比较大，符合实际情况。

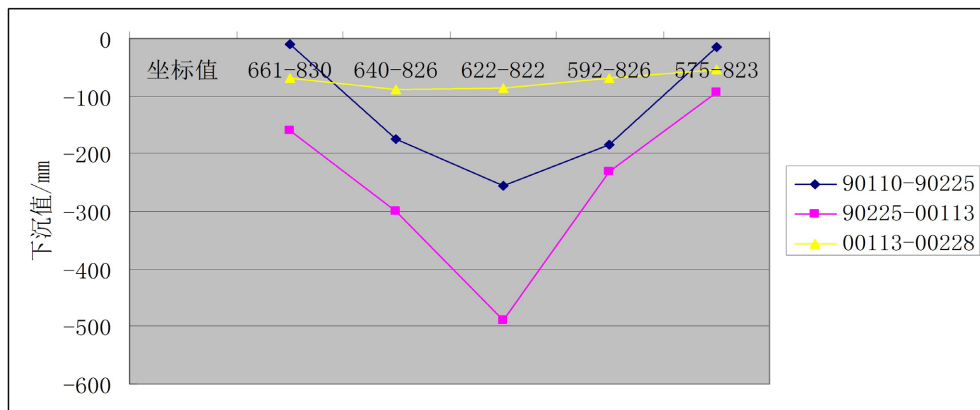


Figure 7. Schematic diagram of settlement of profile line
图 7. 剖面线的下沉量示意图

4. ENVISAT 数据处理

Envisat 是由欧空局发射的一颗先进的极轨对地观测卫星，载有 10 种传感器，其中有先进的合成孔径雷达 ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar)。ASAR 工作在 C 波段，具有主动相控天线系统，5 种成像模式，7 种成像条带及交替极化成像功能。ENVISAR 数据可以很好的区分不同地物，而且正确反映了地物的后向散射特征，可以有效的应用于地物探测，地物识别，土地覆盖分类和农作物生长监测等领域。

4.1. 数据处理

以 ENVISAT 获取的某一地区 2020 年 1 月 24 日到 2020 年 10 月 24 日的数据为例生成干涉图。

1) 生成干涉图

生成的干涉图效果如图 8 所示。

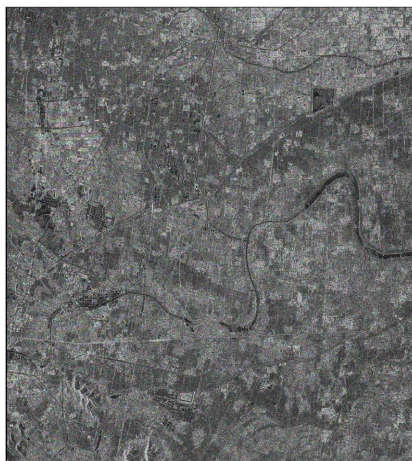


Figure 8. Comparison of generated interferograms
图 8. 生成的干涉图的对比

2) 去除地形影响

去除地形影响之后的效果如图 9 所示。

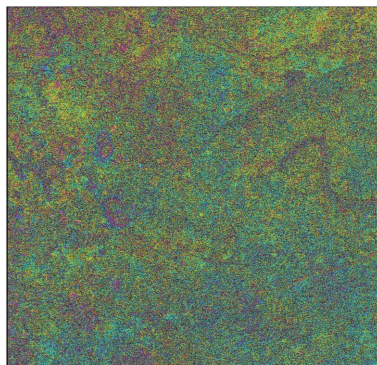


Figure 9. Comparison after removing the influence of terrain

图 9. 去除地形影响后的对比

3) 滤波

滤波处理之后效果如图 10 所示。

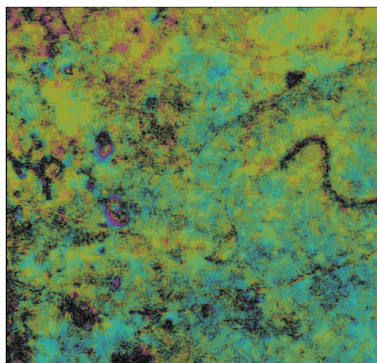


Figure 10. Comparison after filtering

图 10. 滤波处理后的对比

4) 相位解缠

相位解缠之后效果如图 11 所示。

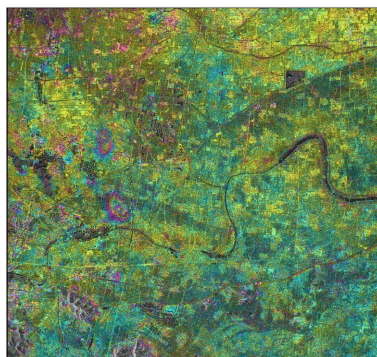


Figure 11. Comparison after phase unwrapping

图 11. 相位解缠后的对比

4.2. 结果分析

由于时间短和 SAR 技术的测量精度不很高, 本实验就提取此地区的某几条重要的线, 如图 12 所示, 利用提取这几条线的垂直形变信息, 每个象元点的灰度值均表示形变量。依次累加的形变信息图中提取了一条线的形变信息, 得到每次测量的形变量累加值, 并依次按时间显示。红色的曲线表示从 2019 年 12 月 20 日至 2020 年 1 月 24 日被提取的线的每个象元点形变量; 黄色的曲线表示从 2020 年 1 月 24 日至 2020 年 4 月 4 日被提取的线的每个象元点形变量; 蓝色的曲线表示从 2020 年 4 月 4 日至 2020 年 5 月 9 日被提取的线的每个象元点形变量; 灰色的曲线表示从 2020 年 5 月 9 日至 2020 年 7 月 18 日被提取的线的每个象元点形变量; 棕色的曲线表示从 2020 年 7 月 18 日至 2020 年 8 月 22 日被提取的线的每个象元点形变量, 纵轴的单位为 mm。剖面线下沉统计量如图 12 所示, 剖面线的形变量如表 2, 图 13 所示。

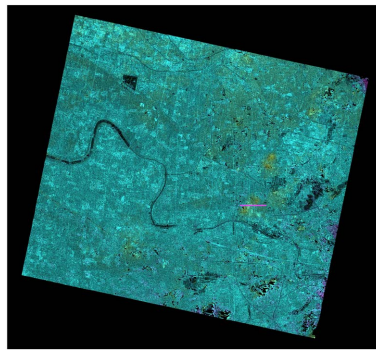


Figure 12. Extracted section line
图 12. 提取的剖面线

Table 2. Settlement statistics of section line
表 2. 剖面线的下沉量统计

影像图幅 坐标值	91220-00124	00124-00404	00404-00509	00509-00718	00718-00822
970-862	-16	-21	-12	-16	-2
988-862	-30	-17	-19	-9	-19
102,864	-5	-13	-8	-19	9
1044-862	0	-6	2	-10	-7

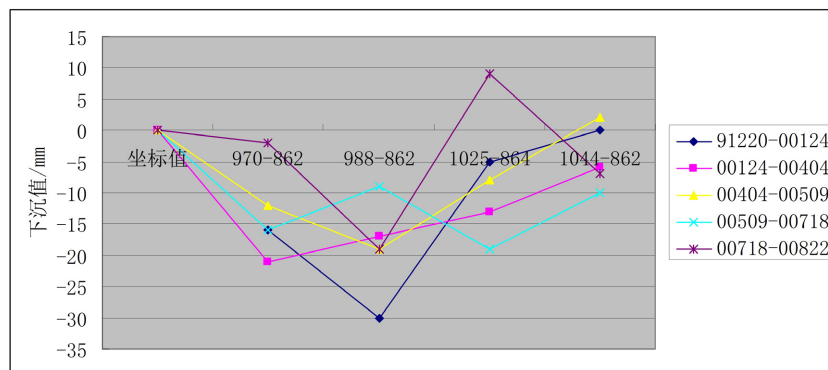


Figure 13. Schematic diagram of shape variables of section line
图 13. 剖面线的形变量示意图

从上面所得的数据以及图表可知剖面线 b 从 2019 年 12 月 20 日至 2020 年 1 月 24 日的最大下沉量为 30 mm，平均月下沉量为 30 mm/月；从 2020 年 1 月 24 日至 2020 年 4 月 4 日最大下沉量为 20 mm，平均月下沉量为 10 mm/月；从 2020 年 4 月 4 日至 2020 年 5 月 9 日最大下沉量为 20 mm，平均月下沉量为 20 mm/月；从 2020 年 5 月 9 日至 2020 年 7 月 18 日最大下沉量为 20 mm，平均月下沉量为 10 mm/月；从 2020 年 7 月 18 日至 2020 年 8 月 22 日最大下沉量为 20 mm，平均月下沉量为 20 mm/月。

5. ALOS 与 ENVISAT 数据提取地表沉降的对比分析

选取 ALOS 卫星影像上的从 2020 年 1 月 13 日到 2020 年 2 月 28 日拍摄 00113-00228 卫星影像和 ENVISAT 卫星影像上获得的从 2020 年 1 月 24 日到 2020 年 4 月 4 日所拍摄的 00124-00404 影像进行对比研究，因为二者在时间度上有所重合，所以可以用来进行对比研究。

5.1. ALOS 影像与 ENVISAT 影像对采煤区的对比分析

对采煤区的对比分析。对比分析统计如表 3 所示。

Table 3. Comparative analysis of coal mining area

表 3. 对采煤区的对比分析

坐标点号	卫星	ALOS 卫星影像	ENVISAT 卫星影像
1		-16	9
2		-28	-3
3		-66	-24
4		-55	-34
5		-30	-10
6		-38	-21
7		-39	-17
8		-37	-13
9		-19	-6
10		-13	-1
11		-68	-46
12		-57	-30
13		-11	0
14		-28	-22
15		-65	-53
16		-50	-21
17		-16	-12
18		-60	-5
19		-35	-14
20		-7	-6

可以看出 ENVISAT 卫星的灵敏度要比 ALOS 卫星高，因为 ALOS 卫星波长长，对小的地形地物监测不如 ENVISAT 卫星灵敏。ENVISAT 卫星对小的地形地物的监测要精确。

5.2. 对采空区的地表下沉对比分析

在采空区中，选取两幅影像上采空区的一系列的坐标点进行对比分析，统计变化量如表 4 所示，变化量对比图如图 14 所示。

Table 4. Comparative analysis of goaf
表 4. 对采空区的对比分析

坐标点	卫星	ALOS 卫星影像	ENVISAT 卫星影像
1		-19	-2
2		-4	2
3		4	-1
4		-1	-5
5		-3	-1
6		-15	-2
7		-23	-7
8		-26	-16
9		-9	-2

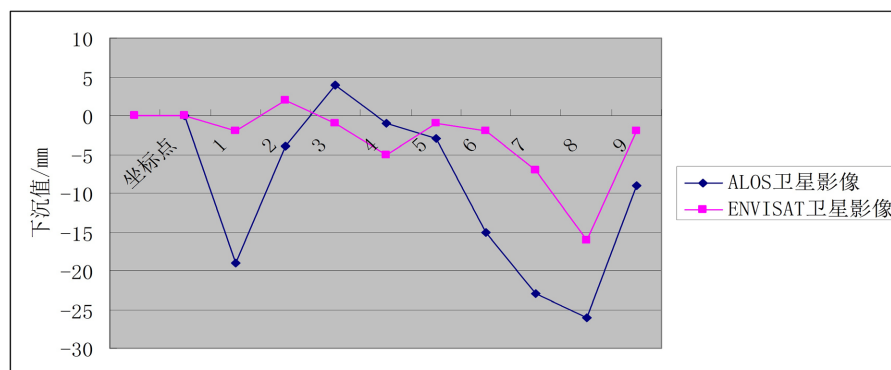


Figure 14. Schematic diagram of shape variables of goaf
图 14. 采空区的形变量示意图

5.3. 结合数据的分析以及误差来源分析

从示意图可以看出 ALOS 卫星影像数据和 ENVISAT 卫星影像数据得出的结果基本相同，符合实际情况。但是 ENVISAT 数据基本是差了 35 天，ALOS 相差 46 天；ALOS 波长长，小变形不灵敏，ENVISAT 的 C 波段，波长短，小变形灵敏；ALOS 分辨率高，为 10 米，后者 25 米，是这个分辨单元的强散射体的回波，两者的散射单元会存在区别。ENVISAT ASAR 数据和 ALOS PALSAR 数据提取的视线向最大形变值分别 180 mm 左右和 250 mm 左右。PALSAR 的 L 波段干涉测量在高植被覆盖和地形起伏较大地区具有一定应用潜力，与 ENVISAT ASAR 的 C 波段干涉对相比，L 波段数据良好的相干性更有利于相位的获取和识别。

误差分析以及来源：因为 ALOS 卫星采用 L 波段，波长长，对小变形不灵敏，ENVISAT 采用 C 波段，波长短，小变形灵敏。再者由于我研究的时间较短，没能进行进一步的研究，两幅图像未进行配准，选取的坐标点不是完全的重合，导致选点有误差，两幅对比影像上面的选点不是能完全相同，会有一定的误差。这都造成了 ALOS 卫星与 ENVISAT 卫星数据上的差异。

去除平地效应和地形效应后的干涉图，还要对轨道残差的影响进行剔除，本人在实验中未进行此项操作。不同时间实施的 SAR 对地观测所对应的大气水份含量和电离层状态可能是不同的，该附加的相位给最终的量测结果增加了不确定性。解决方案包括选择波长较长的 SAR 系统获取的数据，或者利用多次重复观测的干涉影像对结果取平均。

不同时间实施的 SAR 对地观测所对应的大气水份含量和电离层状态可能是不同的，该附加的相位给最终的量测结果增加了不确定性。解决方案包括选择波长较长的 SAR 系统获取的数据，或者利用多次重复观测的干涉影像对结果取平均。INSAR 干涉处理过分依赖原始数据质量，对相干性差的区域，不能获得令人满意的干涉图，应进一步探求提高干涉质量的方法。

6. 结论

通过对 InSAR 技术的原理分析知道，InSAR 技术可以实现具有全天候监测的能力，可覆盖大范围地区，且数据获取的速度较快；不仅可以提供用大多数方法难以监测到的地区的数据，而且还可以进行可与传统测量技术相比拟的高质量的地表变形测量；可提供时间跨度较大的 SAR 影像数据；花费比其他方法少的费用即可获取观测数据，这使得长期对地面沉降进行监测成为可能。ENVISATASAR 数据的多极化、多入射角、多成像模式和高的间分辨率特点将会提供更加丰富的雷达遥感信息，将会在海洋科学、海洋石油工业、国土资源勘察、船只与尾迹探测、水运与海运管理和土地覆盖分类等领域得到有效和广泛的应用。ALOS 卫星在农业、土地利用遥感制图、环境监测、灾害监测、林业和海洋方面的应用，ALOS 卫星可以提供丰富的信息，可广泛用于科研、生产和生活领域。ALOS 卫星还可以实现快速、准确、动态的数据监测。及时获取信息为有关部门的决策提供技术支撑。ENVISAT 数据基本是差了 35 天，ALOS 相差 46 天；ALOS 波长长，小变形不灵敏，ENVISAT 的 C 波段，波长短，小变形灵敏；alos 分辨率高，10 米，后者 25 米，是这个分辨单元的强散射体的回波，两者的散射单元会存在区别。在利用双轨差分监测地震形变场时，ENVISAT ASAR 数据干涉对的垂直基线最好小于 250 m，否则会因为垂直基线过长而导致失相关，从而不能用于地震形变场的监测。

参考文献

- [1] 欧阳梓铭, 左小清, 赵彦熹. 基于 SBAS-InSAR 技术的双江县地面沉降研究[J]. 城市勘测, 2023, 195(1): 87-92.
- [2] 李士林, 黎浩. 基于 InSAR 的城市群地表沉降监测与基础设施安全预警研究[J]. 路基工程, 2023, 226(1): 25-30.
- [3] 王润泽, 费敏, 梁世川, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术监测西安市地表形变特征[J]. 测绘通报, 2023, 550(1): 173-178.
- [4] 杨泽发, 马泽林, 乔思宇. 基于 InSAR 技术的开采沉陷影响边界划定方法[J]. 金属矿山, 2023, 559(1): 119-125.
- [5] 梁思语, 胡海峰. 基于 SBAS-InSAR 技术的采空区残余变形规律分析[J]. 中国矿业, 2022, 31(12): 70-78.