

文章编号: 2095-2163(2021)11-0010-05

中图分类号: P231

文献标志码: A

基于 InSAR 的矿区地表 DEM 构建方法及应用研究

朱明芳

(同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 中国是煤炭资源大国,随着地下煤矿资源的开采,矿区地表产生开采沉陷,地表高程也随之发生着变化,给矿区带来了巨大的地质环境灾害影响。InSAR 作为一种可以大面积、快速、高精度、全天时、全天候地获取地表 DEM 的技术,有着极大的应用前景。本文对 InSAR 技术的核心步骤相位解缠进行研究,并以两幅 2017 年 11 月份覆盖朱集东矿区的哨兵 1 数据进行 DEM 提取实验,得到该地区的数字高程模型后,将提取的 DEM 与下载得到的 DEM 进行比对,误差为 0.79m,精度达到一般地形建模应用要求,证明该研究成果对矿区地表 DEM 数据获取有着重要参考价值。

关键词: 矿区地表; InSAR; DEM; 相位解缠

Study on construction method and application of surface DEM in mining area based on InSAR

ZHU Mingfang

(College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

[Abstract] China is a big country of coal resources. With the mining of underground coal resources, mining subsidence occurs on the surface of the mining area, and the surface elevation changes accordingly, which brings huge geological environmental disasters to the mining area. InSAR, as a technology that can acquire surface DEM in large area, fast, all-day and all-weather, has great application prospect. In this paper, phase unwrapping, the core step of InSAR technology, is studied. Two sentinel-1 data covering the East Zhuji mining area in November 2017 were used to extract DEM, and a digital elevation model of the area was obtained. Finally, the extracted DEM is compared with the downloaded DEM, and the median error is less than 0.79m, and the accuracy meets the requirements of general terrain modeling applications. The research results have important reference value for DEM data acquisition in mining area.

[Key words] mining area surface; InSAR; DEM; phase unwrapping

0 引言

中国煤炭资源储量丰富,但因煤炭开采而引起的矿区地表形变,破坏了矿区的土地资源和环境^[1]。为最大程度保证土地资源的利用、控制环境破坏影响和确保采矿区域的健康绿色发展,需要建立完善的矿区地表高程变化监控系统。

获取 DEM 的常用方式有摄影测量、野外实地测量、地形图数据采集和三维激光扫描等。野外实地测量虽然精度最高,但存在效率低、成本高、涉及区域小、分辨率低,无法在复杂地形和大面积区域获取 DEM 等问题。地形图数据获取的 DEM 成本低、操作简便,但现势性差、精度低。摄影测量能获取高精度、大比例尺的 DEM,但成本很高,周期较长,且易受到航空管制的影响。三维激光扫描目前还不够成熟,大面积获取 DEM 的能力非常有限。

InSAR 结合了 SAR 与干涉测量,基本原理是通过确定卫星的系统、姿态、轨道参数和雷达的回波相

位之间的几何关系,来精确测量地面某一点三维坐标和高程变化^[2]。与传统的 DEM 获取方式相比,InSAR 获取 DEM 具有全天时、全天候、大面积、快速、精度高的特点^[3]。综上所述,InSAR 技术对于矿区地表 DEM 的构建有着重要意义。

1 方法

1.1 InSAR 获取 DEM 流程

InSAR 生成 DEM 的流程如图 1 所示。首先导入原始数据进行数据转换,将其转换为 SLC(单视复数影像)数据对,通过基线估算评价 SLC 数据质量,干涉图生成计算相位差,去平地效应去除水平位置的影响,滤波处理去除噪声与干扰,相位解缠求解相位,最后依据求解出的相位解算出高程,并通过地理编码转换到常见坐标系中得到数字高程模型。

1.2 相位解缠

相位解缠对于精度有着决定性影响,本文将对常用的相位解缠方法进行研究。

作者简介: 朱明芳(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:点云处理、InSAR 生成 DEM、形变分析。

收稿日期: 2021-09-05

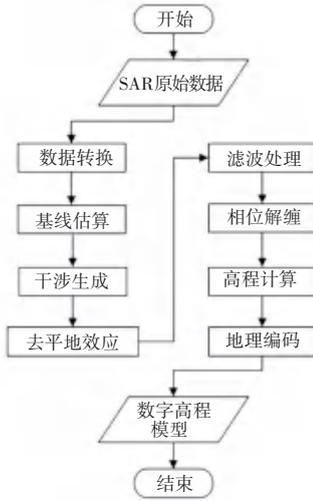


图 1 InSAR 生成 DEM 流程图

Fig. 1 Flow chart of generating DEM from InSAR

1.2.1 区域生长法

区域生长法^[4]借助相位质量图,将相干系数作为标准确定相位解缠顺序。将相干性好的区域作为“种子”,从“种子”出发,依据相干系数依次解缠。解算相位值是通过将已解缠相位值作为参考,进行预测。所有区域完成解缠后,对预测值进行检测,通过检测得到最终结果。具体步骤如下:

(1) 依据相位质量图,将干涉图分为不同区域。在每个区域内找到质量最好的像元,将其作为“种子”,依据质量优劣依次进行解缠。

(2) 用已解缠值作为参考,预测出未解缠相位的值^[5]。如该方向上已有两个解缠出来的值,则有式(1):

$$\Psi_k^p = \Psi[k] + (\Psi[k] - \Psi[k^1]) \quad (1)$$

其中, k 与 k^1 分别表示此方向上的两个已解缠像元。

若只有一个已解缠的点,那么待解缠的点在该方向上的预测值如式(2)所示:

$$\Psi_k^p = \Psi[k] \quad (2)$$

式(3)可表示所有方向的预测值,其中 Ψ^p 表示总的预测值。

$$\Psi^p = \left(\sum_{k=1}^{N_m} w_k \Psi_k^p \right) / \left(\sum_{k=1}^{N_m} w_k \right) \quad (3)$$

式中, Ψ_k^p 表示第 k 个方向上的预测值, w_k 则表示该方向的权重。

对于式(1)的情况, w_k 取 1; 对于式(2)的情况, w_k 取 0.5。

(3) 计算缠绕数,如式(4)所示:

$$m = \text{rint} \left\{ \frac{\Psi^p - \Psi_0}{\frac{\Delta \Psi}{2\pi}} \right\} \quad (4)$$

其中, $\text{rint}(x)$ 表示最近的一个整数值; Ψ 代表缠绕的相位值; Ψ_2 表示解缠的结果,如式(5)所示:

$$\Psi_2 = \Psi + 2\pi m \quad (5)$$

(4) 得出结果后,需进行验证。此时引入变量 d_p ,如式(6)所示:

$$d_p = \left(\sum_{k=1}^{N_m} w_k |\Psi_k^p - \Psi^p| \right) / \left(\sum_{k=1}^{N_m} w_k \right) \quad (6)$$

进行解缠前,需设定一个阈值 t_p 。当 $d_p < t_p$ 时,则认为结果合理。若干涉图质量较差,可适当调高阈值 t_p 。使相位解缠的区域扩大。

综上,区域生长法通过划分区域进行解缠^[6],效率高、误差小,解缠结果是多方向预测值的综合,依赖于相位质量图。故此方法的使用前提,是高精度的质量图。

1.2.2 最小费用流算法

理解最小费用流(MCF)算法前,需要理解网络流算法。最早由 Costantini^[7]等提出,其基本思路是,将相位的解缠转换为枝切和路径的最小化。既可用于规则格网也可用于不规则三角网。

假设有一个 $J * K$ 的规则格网,每个格网有对应的解缠相位 Ψ 和未解缠相位 Φ ,则两者之间存在如式(7)所表示的关系:

$$\Psi(i, j) = \Phi(i, j) + 2\pi n \quad (7)$$

式(7)中, $\Phi \in [-\pi, \pi]$ 且 n 是整数,相邻像元之间的差分为:

$$\begin{cases} \Delta\Phi_1(i, j) = \Phi(i+1, j) - \Phi(i, j) + 2\pi n_1 \\ \Delta\Phi_2(i, j) = \Phi(i, j+1) - \Phi(i, j) + 2\pi n_2 \end{cases} \quad (8)$$

因 n 是根据先验知识直接获取,再加上积分路径不同,故而 $\Delta\Phi_a(i, j) \in [-\pi, \pi]$ ($a=1, 2$) 差分数值不一致。需重新定义其残差:

$$\begin{cases} k_1(i, j) = \frac{1}{2\pi} \Delta\Phi_1(i, j) \\ k_2(i, j) = \frac{1}{2\pi} \Delta\Phi_2(i, j) \end{cases} \quad (9)$$

$k_1(i, j)$ 与 $k_2(i, j)$ 的值都非常小,可以用式(10)来估算残差 $k_1(i, j)$ 与 $k_2(i, j)$ 。

$$\min\{k_1, k_2\} \left\{ \sum_{i,j} c_1(i, j) |k_1(i, j)| + \sum_{i,j} c_2(i, j) |k_2(i, j)| \right\} \quad (10)$$

依据网络流原理^[8],式(10)可转变为最小费用流进行计算。输入值为每个残差值与各条流向的费用;输出则是各流向的流量,同时保证费用之和为最小。在得到残差 $k_1(i, j)$ 与 $k_2(i, j)$ 后,就可以得到相位梯度,再依据相位的周期性就可以得到最后

的解缠相位。

$$\Phi(i, j) = \Phi(0, 0) + \sum_{p=0}^{i-1} [\Psi(p+1, 0) - \Psi(p, 0)] + \sum_{q=0}^{j-1} [\Psi(i, q+1) - \Psi(i, q)] \quad (11)$$

综上,这种算法计算方便,应用广且效率高;但在低相干区域精度低^[9],故对其进行改进,提出了下面的 Delaunay MCF 算法。

1.2.3 Delaunay MCF 算法

Delaunay MCF 算法^[10]核心是依据选取出干涉质量好的区域,构成一个高质量像元的集合。由于位置无法准确获得,无法形成规则网络,需要通过干涉质量分布,确定 Delaunay 三角网后,利用上节提到的网络流算法并进行积分获得解缠相位。

图2是一个 Delaunay 三角网^[11]。其中黑点表示高质量像元,并用实线连接构成一个三角网,而白点表示残差点,每个三角形内均有一个残差点+1、-1或0。所有残差点需要被连接且总路径最短。

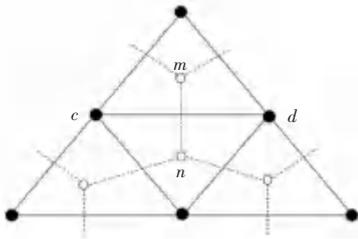


图2 Delaunay 三角网

Fig. 2 Delaunay triangulation

每个白色点只对应一个三角形,连接白色点的虚线组成了网络,其仅与一条实线边相交。这时,就可利用网络流算法并结合白色点残差值,得到该虚线的流量后,通过枝切法求解。如图3所示,当流量 $X_{ij} = 1$ 时,则 c 与 d 之间存在一个枝切。若沿着 dc 方向积分,则相位值需要减去 $2X_{ij}\pi$;若沿相反方向积分,则需加上 $2X_{ij}\pi$ 。

Delaunay MCF 算法利用三角网,将质量好的像元集中,最大限度地去除了噪声的影响。即使图像质量很差,也可用 Delaunay 三角网来提取质量相对较好的区域。而在三角网内,可以用适应性强且效率高的 MCF 来处理。具体步骤如下:

(1) 设置阈值 t_w 作为评价标准,将比 t_w 高的相位提取出来,组成一个集合 T ;

(2) 建立 Delaunay 三角网并构造对偶图,在原三角网中计算残差并将其映射到对偶网络中,计算最小费用流的集合;

(3) 对流按照大小和方向进行积分得到解缠相位,再按照质量优劣依次积分,得到所有结果。

综上, Delaunay MCF 算法^[12]依据干涉质量不同划分为不同的区域。在解缠时充分使用质量高的区域,同时减少质量差区域的使用,得到高精度的结果。本方法在低相干区域也能得到很高的精度,但三角网的生成所需时间较长,效率相对较低。

2 实验研究

2.1 实验数据

(1) 哨兵1数据:包含淮南市朱集东矿区的哨兵1数据,参数见表1。

表1 Sentinel-1A 数据部分参数

Tab. 1 Sentinel-1A data part parameters

影像	轨道号	成像时间	极化方式	轨道类型	时间间隔/天
主影像	019114	2017-11-04	vv	升轨	24
辅影像	021067	2017-11-28	vv	升轨	

(2) DEM 数据:使用的是 SRTM 数据,由 NASA 和 NIMA 共同完成测量。具体影像如图3所示。

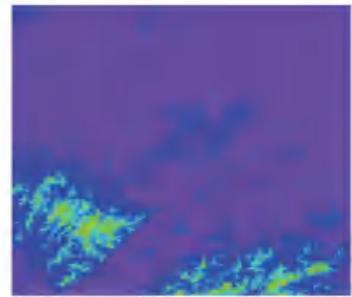


图3 SRTM 影像

Fig. 3 SRTM image

(3) 朱集东矿的矢量数据:实地采集得到,用来裁剪出朱集东矿区域。

2.2 实验过程与结果评价

本次实验是以包含朱集东矿区域的哨兵1的两幅11月影像、SRTM 数据以及矢量区域作为实验数据。其中以4日的影像为主影像,28日为辅影像。处理过程及结果如下:

(1) 对于滤波处理采用 Goldstein 滤波,可得到相干图与滤波后结果图。具体结果如图4~6所示。

(2) 由于相位呈周期变化,只能得到不足整周的那一部分相位,需进行相位解缠得到相位的整周数。依据图6设定相应阈值,使用本文的3种算法分别进行相位解缠,并得到如图7~9的解缠图。



图 4 相干图
Fig. 4 Coherence diagram

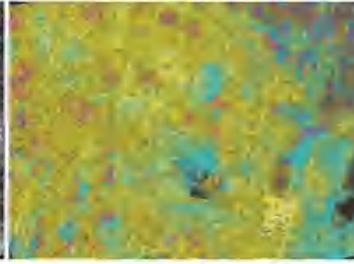


图 5 滤波后图
Fig. 5 After filtering

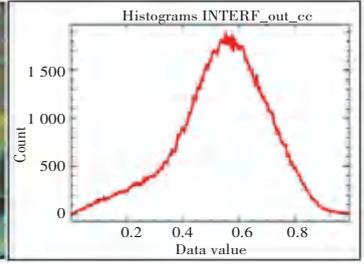


图 6 相干系数直方图
Fig. 6 Coherence histogram

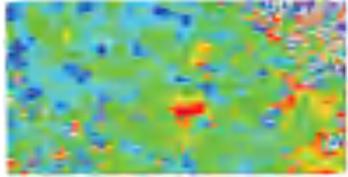


图 7 最小费用流算法
Fig. 7 MCF algorithm

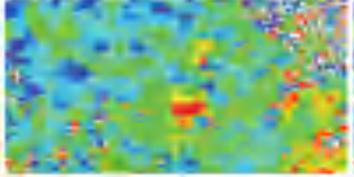


图 8 区域生长法
Fig. 8 Region growth method

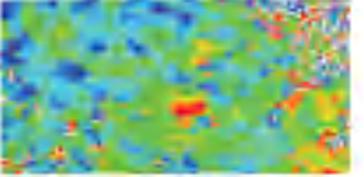


图 9 Delaunay MCF
Fig. 9 Delaunay MCF

从上述 3 幅相位解缠结果图,可以了解到在矿区 3 种相位解缠的效果大致相同,都存在一定未解缠的区域。

对 3 种解缠算法进行定量分析,得到如表 2 所示的解缠算法对比结果。由表 2 可知 3 种方法解缠总点数相同,即解缠能力相同。就精度而言,区域生长法效果最好, Delaunay MCF 较差,而最小费用流算法最差。

表 2 解缠算法对比

Tab. 2 Comparison of unwrapping algorithms

解缠算法	解缠总点数	最小值	最大值	平均值	标准差
区域生长法	128 812	-10.068 5	4.714 6	-2.314 4	0.895 5
最小费用流算法	128 812	-20.813 6	-1.078 9	-8.618 5	0.976 6
Delaunay MCF	128 812	-3.851 406	10.997 8	3.982 2	0.909 9

(3)生成结果后,对其进行精度验证。由于下载的数据分辨率为 90 m,而生成的结果分辨率是 15 m,故对其进行重采样,得到如图 10 所示的图像。再利用 ArcGIS 导出 15 个随机分布的同名像点,如

表 3 随机点高程值

Tab. 3 Elevation values of random points

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
参考值/m	23	22	24	24	22	24	23	23	24	22	21	24	23	24	23
生成值/m	22.7	22.1	23.4	25.4	23.3	22.8	22.0	23.4	24.3	22.2	20.2	23.0	23.1	24.9	22.6
误差值/m	-0.3	0.1	-0.6	1.4	1.3	-1.2	-1	0.4	0.3	0.2	-0.8	-1	0.1	0.9	-0.4

由表 3 可知,误差的范围为 0~1.4 m,精度较高。经计算,得到中误差为 0.79 m,达到一般地形建模应用要求。

3 结束语

本文先对 InSAR 的数据流程做了简单介绍,之

后对相位解缠这一步骤常见的 3 种算法进行详细阐述,并从原理上对其进行评价。之后以淮南朱集东矿区的哨兵 1 数据、SRTM 数据和矢量数据进行实例验证,得出 3 种方法解缠能力相同,但区域生长法所求精度效果最好, Delaunay MCF 较差,而最小费



图 10 重采样结果图
Fig. 10 Resampling results

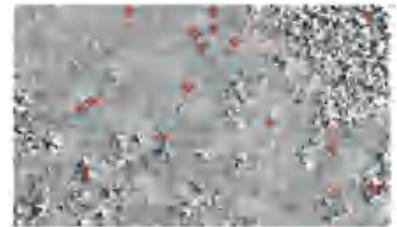


图 11 选点图
Fig. 11 Point selection diagram

而最小费用流算法最差。 (下转第 20 页)