

# 基于 Hermite 的 SAR 卫星轨道插值干涉测量应用研究

马飞<sup>1</sup>, 隋立春<sup>2</sup>, 姚顽强<sup>3</sup>

(1. 长治学院 计算机系, 山西 长治 046011; 2. 长安大学 地质与测绘工程学院, 西安 710054;  
3. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054)

**摘要:** 合成孔径雷达 (SAR, synthetic aperture radar) 卫星轨道参数是干涉测量技术中影像配准、基线估算、平地相位去除等环节的重要参数, 但部分 SAR 卫星轨道参数采样间隔较大, 导致干涉测量过程中产生残余相位, 发生较大的系统误差; 利用编程工具, 对卫星原始轨道状态矢量进行了埃尔米特插值法拟合, 等距插值计算后, 发现可以缩小轨道参数采样间隔, 提高干涉测量精度; 以覆盖巴姆地区的 Envisat 卫星为例, 分别获取了基于粗轨、埃尔米特插值轨道参数和代尔夫特精密轨道参数得到的干涉测量图, 定性判断出埃尔米特插值法可有效提高 SAR 卫星轨道精度; 再以覆盖陕西地区的 AOLS 卫星为例, 插值轨道矢量采样间隔分别为 10 秒、5 秒、2 秒, 发现间隔为 5 秒时相干性最优; 结果表明: 采用埃尔米特插值法可有效增加 SAR 卫星轨道状态矢量数量, 消除系统误差, 提高干涉测量精度。

**关键词:** 埃尔米特插值; 轨道插值; SAR 卫星; 卫星状态矢量

## Research and Application of in SAR Satellite Orbit Interferometry Based on the Hermite Interpolation

MA Fei<sup>1</sup>, SUI Lichun<sup>2</sup>, YAO Wanqiang<sup>3</sup>

(1. Department of Computer, Changzhi University, Changzhi 046011, China;  
2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;  
3. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, 710054, China)

**Abstract:** Satellite orbit parameters of synthetic aperture radar (SAR) are important parameters for image registration, baseline estimation and phase removal from flat ground in interferometry technology. However, the large sampling interval of some SAR satellite orbit parameters leads to residual phase and large systematic errors in the interferometry technology. In this paper, the programming tool is used to fit the original orbit state vector of the satellite by the Hermite interpolation method, and the isometric interpolation calculation is used to reduce the sampling interval and improve the accuracy of interferometric measurement. Taking the Envisat satellites covering the Bam area as an example, the interferometric maps based on rough orbit, the Hermite interpolation orbit parameters and the Delft precision orbit parameters are obtained separately, and it was qualitatively concluded that the Hermite interpolation method could effectively improve the orbit accuracy of the SAR satellites. Taking the AOLS satellite covering Shanxi province as an example, the sampling interval of interpolation orbital vector is 10 s, 5 s and 2 s respectively, and it is found that the coherence is optimal when the sampling interval is 5 s. The results show that the Hermite interpolation method can effectively increase the number of the SAR satellite orbit state vectors, eliminate the systematic errors and improve the accuracy of interferometry.

**Keywords:** hermite interpolation function; orbit interpolation; SAR satellite; satellite state vector

## 0 引言

在合成孔径雷达 (SAR) 卫星技术的应用中, 卫星轨

道参数是合成孔径雷达干涉测量 (InSAR, interferometric synthetic aperture radar) 数据处理过程中重要参数之一, 可直接影响主辅 SAR 图像配准、DEM 测高、基线估算等

收稿日期: 2022-05-10; 修回日期: 2022-06-06。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61773002); 山西省基础研究计划(自由探索类)项目(20210302123381)。

作者简介: 马飞(1988-), 男, 山西长治人, 博士研究生, 讲师, 主要从事合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)应用于矿区形变监测方向的研究。

隋立春(1963-), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 教授, 主要从事遥感信息提取与应用、LiDAR 数据处理理论及应用、InSAR 技术应用等方向的研究。

姚顽强(1966-), 男, 山西繁峙人, 博士研究生, 教授, 主要从事“3S”(GPS、GIS、RS)集成理论研究与应用、InSAR 数据处理等方向的研究。

引用格式: 马飞, 隋立春, 姚顽强. 基于 Hermite 的 SAR 卫星轨道插值干涉测量应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 34-39.

精度。在干涉测量数据处理过程中, 最初主影像和辅影像粗配准过程中会引入卫星轨道参数作为影像初始偏移量, 去除平地相位过程中会利用卫星轨道参数模拟计算平地相位, 生成 DEM 过程中会利用卫星轨道参数估算基线长度, 因此卫星轨道参数是干涉合成孔径雷达的基础, 它直接决定着合成孔径雷达干涉测量系统的特性优劣<sup>[1]</sup>。

大部分 SAR 卫星运营商都能提供卫星轨道精密参数, 例如欧空局发射的 ERS 卫星、ENVISAT 卫星由荷兰代夫特对地空间研究中心 (DEOS, delft institute earth-oriented space research) 提供的精密轨道数据精度优于  $6 \text{ cm}$ <sup>[2]</sup>; 哨兵卫星 POD 精密定轨星历数据定位精度优于  $5 \text{ 厘米}$ <sup>[3]</sup>; TerraSAR X 卫星搭载全球定位系统 (GPS) 接收机和激光精密定轨反射器, 轨道确定精度达到厘米级<sup>[4]</sup>。因此关于 SAR 卫星轨道插值的文献研究较少, 很多学者专注于研究 InSAR 数学模型、轨道精度对 InSAR 测量结果的影响等, 分析 InSAR 干涉测量的数学模型, 包括轨道精度、距离向频谱、干涉临界基线距、模糊高度、差分相位对形变的敏感度等问题, 但未就如何改进轨道精度提出解决方案。针对卫星轨道插值问题更多的文献专注于研究全球定位系统 (GPS, global positioning system)、北斗导航卫星定位系统 (BDS, beiDou navigation satellite system) 和伽利略 (Galileo) 卫星定位系统的轨道插值问题, 插值方法包括埃尔米特插值、切比雪夫插值、三次样条插值、拉格朗日插值算法等。

针对未提供精密轨道文件的 SAR 卫星数据, 严重制约着该卫星影像数据处理精度。例如加拿大的 RADARSAT 卫星, 日本的 JERS 卫星、ALOS 卫星和 ALOS-2 卫星等等, 其中 ALOS 卫星搭载的 PALSAR 传感器扫描地面影像的持续时间大概为  $13 \text{ 秒}$ , 在影像的参数文件中提供了卫星从生成第一个像素到最后一个像素期间的所有卫星状态矢量, 包括卫星三维位置、三维移动速率等数据, 其状态矢量采样间隔为  $60 \text{ 秒}$ ; 因此, 主辅 SAR 影像在进行干涉测量时只有一个卫星状态矢量参与了计算。这样在利用轨道参数进行去除椭球参考相位、像素点匹配、去除平地相位时都会遇到困难, 干涉相位图中会有残余条纹, 造成最终获取的 DEM 或差分干涉图中混有系统误差。因此本文拟采用编程工具对卫星轨道数据进行模拟, 利用埃尔米特插值法对其轨道参数进行等距插值, 从而估计其轨道参数, 缩小卫星轨道状态矢量采样间隔, 提高轨道精度。

## 1 埃尔米特插值和 SAR 干涉测量基本原理

### 1.1 插值算法的简介

插值算法是一种关于函数逼近的简单又实用的数学方法, 主要用于某函数在有限个点处取值状况, 估计其在其他点处的值。插值算法是数值分析中一种基本算法。根据被插值的函数自变量个数, 插值法可分为一维插值、二维插值、和 multidimensional 插值。根据选用的分段直线、多项式或样条函数插值函数, 插值又可分为线性、多项式和样条插值<sup>[5]</sup>。

目前较为常用的插值算法有 Lagrange 插值、牛顿插值、埃尔米特插值、三次样条插值、高维插值等。Lagrange 插值、牛顿插值主要对函数进行直接插值, 对函数的一阶或多阶导数没有限制, 没有考虑插值点的导数值, 即没有考虑卫星轨道的瞬时速度矢量, 不适用于 SAR 卫星轨道插值; 埃尔米特插值及三次样条插值不仅对原函数进行限制, 根据限制条件的不同, 可以对插值函数的倒数进行限制, 如埃尔米特插值可以对函数的一阶导数进行限制, 而三次样条插值法可以根据不同的条件, 可以对一阶或二阶导数进行限制, 从而可以保证插值函数的连续性, 这两种插值方法既可以拟合 SAR 卫星轨道的位置矢量, 也可以计算卫星在某一位置的瞬时速度矢量, 因此适用于 SAR 卫星轨道插值。根据本次对卫星轨道参数插值的条件, 即在已知点位置和速度矢量在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的分量条件下, 在时间上进行插值, 故选择的插值方法有埃尔米特插值和三次样条插值法。武汉大学吴宏安教授<sup>[6]</sup>等人对 InSAR 数学模型研究发现, 利用原始轨道参数文件进行埃尔米特插值, 可以有效地加密轨道文件参数, 利用新的加密后的轨道参数文件进行像素点配准、基线估算、椭球参考相位估算等, 可以提高干涉测量精度, 去除平地残余相位。本文利用埃尔米特插值法估算 SAR 卫星轨道参数, 并进行相关的实验研究。

### 1.2 埃尔米特轨道参数的插值算法

卫星描述轨道模型的星历数据包括卫星的位置矢量 ( $X, Y, Z$ ) 和瞬时的速度矢量 ( $V_x, V_y, V_z$ ), 用下式来表示:

$$\begin{bmatrix} S^1 \\ \vdots \\ S^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X^1 & Y^1 & Z^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X^N & Y^N & Z^N \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V^1 \\ \vdots \\ V^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x^1 & V_y^1 & V_z^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_x^N & V_y^N & V_z^N \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: ( $X, Y, Z$ ) 分别为固定笛卡尔参考坐标系的三个坐标轴, 固定笛卡尔参考坐标系是以地心为原点,  $X$ 、 $Y$  轴垂直位于赤道平面,  $X$  轴由地心指向格林威治子午线,  $Z$  轴垂直于赤道平面且符合右手定律, 与地球椭球极轴重合指向北极。

卫星轨道参数文件中的状态矢量可以进行多项式拟合, 将 ( $X, Y, Z$ ) 和 ( $V_x, V_y, V_z$ ) 作为时间  $T$  的函数, 构建矩阵如下式:

$$S = \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^{M-1} \begin{bmatrix} a_i \cdot t^i \\ b_i \cdot t^i \\ c_i \cdot t^i \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $a, b, c$  分别为  $X, Y, Z$  维的多项式系数。

当求一个插值多项式  $H(x)$ , 使其满足条件为:

$$H(x_i) = y_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$H(x_i)' = y'_i, i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

根据函数的插值条件, 共有  $m+n+2$  个。所构造函数  $H(x)$  次数一般小于或等于  $m+n+1$  次, 可由牛顿插值的思想来构造  $H(x)$  为:

$$H(x) = N_n(x) + P_m(x)\{(x-x_0)(x-x_1)\cdots(x-x_n)\} \quad (6)$$

其中:  $N_n(X)$  为牛顿基本的差值多项式,  $P_m(X)$  为函数对应的  $m$  次多项式。根据式 (6) 和已知数据可以得到:

$$H(x_i) = N_n(x_i) = y_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

在确定  $P_m(X)$ , 需先对  $H(x)$  求导:

$$H'(x) = N'_n(x) + P'_m(x)\omega'_{n+1}(x_i) \quad (8)$$

其中:  $\omega_{n+1}(x) = (x-x_0)(x-x_1)\cdots(x-x_n)$ , 令  $x=x_i, i=0, 1, 2, 3, \dots, m$ , 且把  $H'(x_i) = y'_i, i=1, 2, 3, \dots, m$  代入式上式可得:

$$H'(x) = N'_n(x) + P'_m(x)\omega'_{n+1}(x_i) = y'_i \quad (9)$$

进一步可得  $P_m(X)$ :

$$P_m(x) = \frac{y'_i - N'_n(x_i)}{\omega'_{n+1}(x_i)}, i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

对于求  $P_m(X)$  转化成为已知  $P_m(x)$  的函数表, 如表 1 所示。

表 1  $P_m(x)$  的数据表

$x$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$\dots$	$x_m$
$P_m(x)$	$P_m(x_0)$	$P_m(x_1)$	$P_m(x_2)$	$\dots$	$P_m(x_m)$

当  $P_m(X)$  不超过  $m$  的插值多项式。  $P_m(x)$  满足式:

$$P_m(x) = P_m(x_0) + P_m[x_0, x_1](x-x_1) + \dots + P_m[x_0, \dots, x_m](x-x_0)\cdots(x-x_{m-1}) = \sum_{i=0}^m P_m[x_0, \dots, x_m](x-x_0)\cdots(x-x_{i-1}) \quad (11)$$

其中:  $P_m[x_0, \dots, x_m]$  表示为第  $m$  阶差商, 形式为:

$$f[x_0, x_1, \dots, x_n] = \frac{f[x_0, x_1, \dots, x_{n-1}] - f[x_1, x_2, \dots, x_n]}{x_0 - x_n} \quad (12)$$

再将  $N_n(X)$ 、 $P_m(x)$  带入式 (6), 可得到插值函数  $H(x)$ 。

本论文采用埃尔米特等距插值法, 即要求在给定节点处函数值和一阶导数均相等<sup>[7]</sup>。满足下式:

$$y_i = f(x_i) \quad (13)$$

$$y'_i = f'(x_i), i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (14)$$

以上为埃尔米特插值算法基本原理, 本文基于软件编程实现对 SAR 卫星轨道参数插值计算。

### 1.3 SAR 干涉测量技术简介

InSAR 技术测量是通过对地表目标点的两个视向的观测实现的, 其工作方式包括距离向干涉测量 (Across-track Interferometry)、方位向干涉测量 (Along-track Interferometry) 和重轨干涉测量 (repeat-pass Interferometry)。

距离向干涉测量通过在飞行平台装载两个天线, 一个天线用于发射并接收雷达波, 另外一个仅用于接收雷达波。

通过这种干涉测量方式, 只要确定平台位置, 就较容易地获得高质量的干涉测量数据及较高精度的 DEM。当前这种干涉测量方式常用于航空平台上, 即为前面所提到了机载 InSAR。在采用这种测量方式, 要求飞行平台较为稳定, 而且需要飞机姿态的影响。

方位向干涉测量, 该方式将两个天线安装在平台的前端和后端, 主要适用于机载, 已应用在运动目标的探测、海上波浪谱线等方面的测量工作。

本次用于研究的影像为基于卫星的重轨干涉测量获取的影像。重轨干涉测量, 其作业方式仅需要一个天线, 利用卫星在短时间回到大致相同的轨道上, 获取同一范围内的主辅影像数据。该测量适合于几百公里上的卫星作业方式。一般而言, 星载 SAR 要获得较好的影像数据, 需满足以下 3 个条件: 首先是在两次观测期间, 地面没有发生形变或仅发生微小的形变; 其次平台与地表目标间具有较稳定的观测几何关系, 这需要搭载平台的稳定和平台的准确定位参数, 在获取相同的影像, 当卫星有精密的轨道参数时, 处理后的影像精度更高; 最后为 SAR 处理器能够对做运动的补偿信号保留住内在的相位信息。

数据预处理, 该阶段主要从主辅影像轨道参数文件等生成轨道参数文件和单视复影像。当研究区域为全影像的一部分时, 可以对原始影像进行裁剪, 将得到裁剪区域用于后面的处理研究。

数据配准, 该过程可分为去噪、控制点自动搜索、重采样与配准质量评价等, 主要目的是将辅影像与主影像进行匹配, 使得两景影像坐标系统一致。在处理影像过程中, 需采用多级配准方案来提高影像的配准精度。一般分为粗配准、精配准及子像元配准。

干涉图生成, 需进行相位干涉, 即对两景影像的匹配点的数值做共轭相乘, 得到地面任意点的干涉后影像图的数值。通常计算得到的相位差由于干涉图的灰度表示, 并以条纹形状表现。

重采样与配准质量评价。重采样指对原始影像数据的实部和虚部做内插, 插值方法有双线性和双三次样条方法。为了获得高精度的相位值, 对重采样提出较高的要求。配准结果的评价是配准结果的综合评价, 对于干涉图的生成有重要影响。质量评价的量化标准为相干系数, 其取值范围  $[-1, 1]$ , 为配置质量评价量化标准。当相干系数越接近 0, 代表着两景数据相关程度越小; 当相干系数的绝对值越接近 1 时, 表示两景数据的相关程度越大。

去平地效应, 当地面某两点高程不同, 其相位差可能有两部分造成的, 其一为平地两点的相位差; 其二为两点间存在的高差而造成相位差。通过去平地效应, 使得得到干涉图的相位差只由地形引起, 从而得到更为准确的地形数据。

相位解缠, 即从干涉图得到的相位差, 取值范围为  $(-\pi, \pi]$ , 代表了各个相位差的主值, 为了得到真实相位差需在这个主值的基础上减去  $2\pi$  或加上  $2\pi$  的整数倍。相位解

缠的算法可分为两大类, 一类为基于路径积分相位解缠方法(主要为枝切法); 另一类为基于最小范数的解缠算法。

地理编码, 由于干涉图得到高程值后, 只是得到各点在 SAR 坐标系下的高程值。为了得到对应坐标系下的数字高程模型, 需将 SAR 坐标系下的每一点高程值进行坐标转换, 得到最终的地面 DEM。

## 2 实验分析与研究

### 2.1 巴姆地区 Envisat 卫星实验结果验证

巴姆地区位于伊朗的东南部, 中心位置为北纬  $29.01^{\circ}$ , 东经  $58.26^{\circ}$ 。本文利用覆盖该地区的 Envisat 卫星 ASAR 传感器影像和 DEOS 提供的精密轨道文件对埃尔米特轨道插值实验进行分析验证。根据雷达干涉测量原理<sup>[15]</sup>, 对两幅 Envisat 卫星主辅影像进行干涉处理, 先进行主辅影像配准, 计算主辅影像上所有的像素点在参考托球面上的投影点, 对所有配准的像素点进行相位干涉, 获取各像素的相位值, 该相位值中包含地形起伏引起的相位、地表形变引起的相位变化、椭球参考面相位、噪声相位等等。本次数据处理过程中像素点配准和椭球参考面相位都受到轨道文件精度的影响, 因此干涉相位图的参考面相位的条纹规律性和相干性值是轨道参数文件质量定性和定量评判的重要标准。

如图 1 所示, 图 (a) 为基于原始轨道文件进行干涉测量得到的干涉图, 图 (b) 为基于埃尔米特插值轨道文件进行干涉测量得到的干涉图, 图 (c) 为基于 DEOS 提供的精密轨道文件干涉测量得到的干涉图。

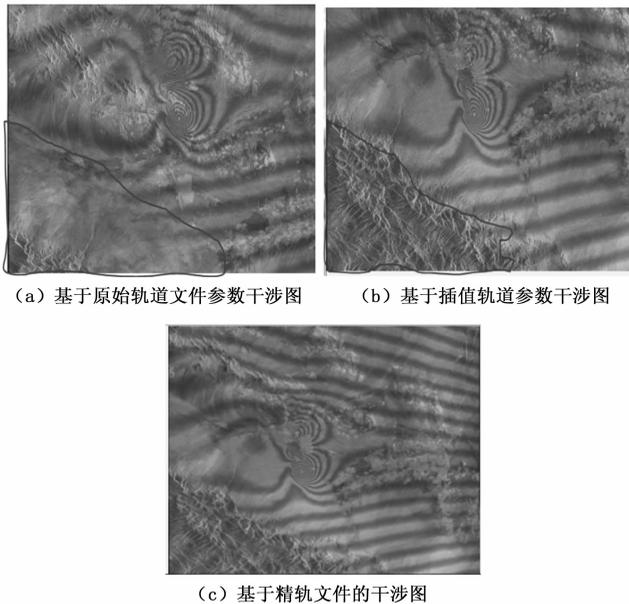


图 1 基于不同轨道参数得到的干涉图

对比图 (a), (b) 两幅干涉图可知, 两幅图中均出现了清晰且规律性很强的干涉条纹, 其中心位置出现的蝴蝶状条纹是地震形变引起的相位变化, 属于形变条纹; 其他规律性条纹主要是参考面相位条纹; 在图中左下角的蓝线

区域的干涉条纹对比具有较大的差距, 该区域地形起伏较大, 属于地形相位条纹和参考面相位条纹叠加的结果。图 (b) 中经轨道插值后得到的干涉图干涉条纹更清晰, 在地形复杂的地区仍具有较高的相干性, 在形变区的干涉条纹具有较强的连贯性。分析图 (b), (c) 可知, 由插值得到的干涉图和利用卫星精密轨道得到的干涉图有较强的一致性, 尤其是在左下角地形起伏较大的区域, 干涉条纹基本无差异, 说明利用 DEOS 精密轨道文件和埃尔米特插值轨道文件进行干涉测量处理后相位无差异, 埃尔米特插值轨道文件的精度与 DEOS 精密轨道文件精度相当。

通过对以上结果分析, 可以定性判断基于埃尔米特卫星轨道参数的插值算法, 可以提高 SAR 影像的干涉测量效果, 有效地提高轨道文件精度。

由于欧空局会提供 Envisat 卫星的 DEOS 精密轨道文件, 所以使用埃尔米特插值对原始文件插值计算精密轨道文件的研究价值并不在于为 Envisat 卫星轨道插值, 而在于为无精密轨道文件的 SAR 卫星插值轨道数据, 例如日本 ALOS 卫星。因此本文再次使用埃尔米特插值算法对 ALOS 卫星轨道进行插值实验。

### 2.2 陕西地区 ALOS 卫星轨道插值结果

本文选取的 ALOS/PALSAR 数据为覆盖陕西咸阳县和长武县的彬长矿区的影像。该矿储煤丰富, 质量优良, 矿区的西北、北部以甘肃省为界, 东西距离为 46 km, 南北长约为 36 km, 矿区地表覆盖面积近  $1\ 000\ \text{km}^2$ 。该矿区位于黄土高原的塬梁沟壑地带, 地表覆有黄土层。气候干燥, 降水量少, 年平均气温在  $10^{\circ}$ , 高差多达 200 m。该地区的属于泾河流域, 其中流经该矿区的最大支流为黑河。彬长矿区的地表植被相对较少, 位于开采沉陷区域内的村落较少, 有利于获取高质量的 SAR 影像。ALOS/PALSAR 数据的原始参数文件中包含有 11 个轨道状态矢量, 但由于其轨道矢量时间间隔为 60 秒, 每景影像像素扫描时间为 13 秒, 因此干涉测量过程中有可能无轨道状态矢量参与。本文采用埃尔米特插值法进行等距插值, 设置时间间隔为 10 秒、5 秒、2 秒分别计算插值后的轨道状态矢量, 在插值过程中以时间  $T$  为自变量, 卫星的位置矢量作为函数值, 速度矢量作为时间的一阶导数值。

具体实验数据影像参数如表 2 所示, 利用编程工具对实验数据计算加密后的轨道参数, 再将新的轨道参数文件替换原始文件进行干涉测量数据处理。

表 2 轨道插值运算实验数据

类型	日期	轨道号	帧号	时间基线	垂直基线
主影像	2009-08-24	465	690	0	0
辅影像	2009-10-09	465	690	46 天	63 m

在 ALOS/PALSAR 数据的原始参数文件中, 包含有影像起始时间 (start\_time)、结束时间 (end\_time)、中点位置时间 (center\_time), 11 个采样时间间隔为 60 秒的轨

道矢量  $(X, Y, Z, V_x, V_y, V_z, T)$ , 本文以这 11 个轨道状态矢量为已知点构建埃尔米特基函数, 以第一个轨道状态矢量采样时间为起始时间, 以最后一个轨道状态矢量采样时间为结束, 分别进行 10 秒、5 秒、2 秒等间距插值, 利用轨道矢量插值后干涉测量结果如图 2 所示。

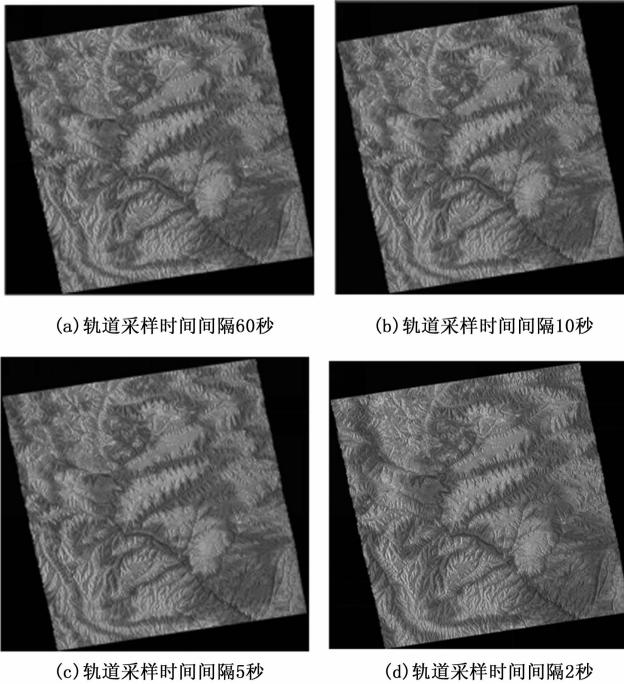


图 2 不同轨道参数采样间隔的地理编码影像干涉相位测量图

通过观察图 2 中的 (a), (b), (c), (d) 四幅图发现图中的干涉条纹基本无差异, 通过分析 InSAR 数学模型<sup>[7-8]</sup>可知, 日本 ALOS 卫星的 PALSAR 传感器使用 L 波段对地扫描, L 波段波长相对 C 波段较长, 干涉测量后的干涉条纹对地形和形变的敏感度变低, 地形高程变化 178 米才会引起一个周期的相位条纹变化。因此在 (a), (b), (c), (d) 四幅图中的干涉条纹变化周期较图 1 中的 ENVISAT 卫星的 C 波段变化周期较少, 四幅图中的干涉条纹肉眼基本观察不到差异。需要引入定量分析方法分析不同轨道采样间隔下干涉测量的效果又和不同。

为了进一步比较四种轨道参数采样间隔对影像相干系数的影响, 埃尔米特插值法得到的卫星轨道参数采样间隔为 60 秒、10 秒、5 秒、2 秒的相干图, 选用编程工具软件分别对该相干图做灰度均值运算, 求得每幅相干图的平均系数, 如表 3 所示。

表 3 不同采样间隔下影像相干图的平均相干系数表

采样间隔/s	相干性均值(0~1)	影像相干图的范围
60	0.374 9	4 638 * 2 476
10	0.375 7	4 638 * 2 476
5	0.376 5	4 638 * 2 476
2	0.375 5	4 638 * 2 476

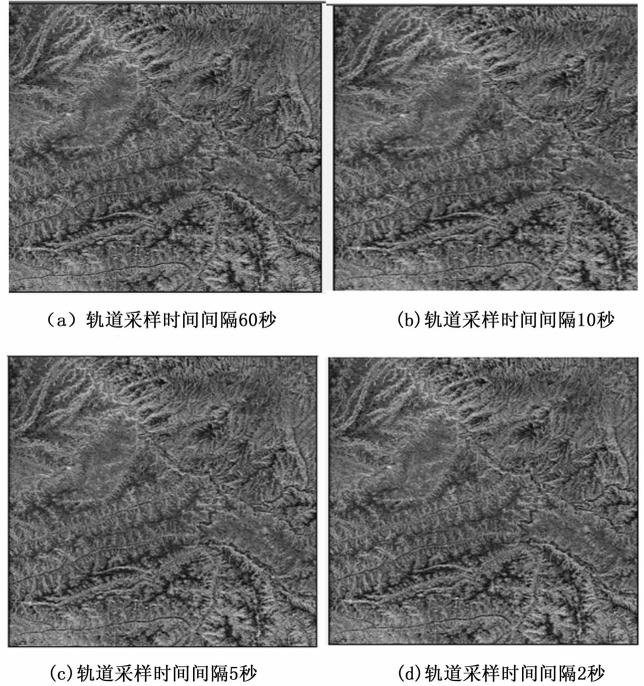


图 3 不同卫星轨道参数采样间隔的影像的相干图

通过表 3 可知当卫星轨道参数采样间隔缩小时, 两幅 SAR 影像干涉得到平均相关系数比原始采样间隔 60 秒的影像相干图的平均相干系数均高, 其代表对原始卫星轨道参数进行插值的方法对提高 SAR 影像的相干性具有可行性, 并取得一定成效。再进一步分析, 随着轨道参数采样间隔的不断减少, 提高影像的相干性并非呈正相关, 本次实验中, 当采样间隔为 5 秒时, 得到相干图的平均相干系数最高, 而其采样间隔为 2 秒时, 其相干图的平均相关系数略低。这说明随着轨道参数间隔的减小, 其相干性呈先提高后降低的趋势, 以此估计得到矿区地表点也呈该沉降趋势。本次研究中, 原始轨道参数间隔为 60 秒, 经插值算法采样间隔为 10 秒、5 秒、2 秒, 初步判断当采样间隔为 5 秒时, 得到相干性最好的差分干涉影像图。

### 3 结束语

1) 本文基于埃尔米特插值多项式拟合 SAR 卫星轨道, 对 SAR 卫星轨道模型中的位置矢量和瞬时的速度矢量进行插值计算, 可以有效地加密卫星轨道星历数据, 提高卫星轨道参数文件精度, 减少干涉测量过程中的系统误差。

2) 通过对 Envisat 卫星原始轨道文件进行埃尔米特插值计算, 得到加密后的卫星轨道星历数据。利用原始轨道文件、加密轨道文件、DEOS 精密轨道文件分别进行干涉测量, 定性研究发现, 利用加密轨道文件和精轨文件得到的干涉图中干涉条纹清晰且一致, 说明埃尔米特插值算法可以有效加密 SAR 卫星轨道星历数据, 提高干涉测量精度。

3) 通过对 ALOS 卫星原始粗轨进行埃尔米特插值计算, 轨道星历数据采样间隔分别设置为 10 秒、5 秒、2 秒,

结果表明进行轨道插值后得到的干涉图相干性比基于粗轨得到的干涉图相干性显著提升; 随着轨道参数间隔的缩小, 其相干性呈先提高后降低的趋势, 采样间隔为 5 秒时相干性最高。

#### 参考文献:

- [1] 舒 宁. 雷达影像干涉测量原理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [2] 陈 强, 刘国祥. 精/粗轨道数据对卫星 InSAR DEM 精度影响的对比研究 [J]. 遥感学报, 2006, 10 (4): 475-481.
- [3] 欧阳伦曦, 李新情, 惠凤鸣, 等. 哨兵卫星 Sentinel-1A 数据特性及应用潜力分析 [J]. 极地研究, 2017, 29 (2): 286-294.
- [4] 倪维平, 边 辉, 严卫东, 等. TerraSAR-X 雷达卫星的系统特性与应用分析 [J]. 雷达科学与技术, 2009, 7 (1): 29-34.
- [5] 尚 涛, 谢龙汉, 杜如虚. MATLAB 工程计算及分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [6] 吴宏安, 汤益先, 张 红, 等. 基于 ALOS/PALSAR 参数的干涉平地效应消除研究 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2010 (1): 92-96.
- [7] 吴宏安, 张永红. ALOS/PALSAR InSAR 数学模型研究 [J]. 遥感信息, 2011 (2): 106-110.
- [8] 丁 琼, 刘国祥, 蔡国林, 等. InSAR DEM 精度与地形特征的关系分析 [J]. 测绘科学, 2009 (1): 147-148.
- [9] 马 飞. InSAR 技术及其在矿区大梯度沉降监测中的应用研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2013: 12-20.
- [10] 余 渝, 周敬烈. 三次样条在卫星轨道预报插值法中的应用 [J]. 现代雷达, 2013, 35 (2): 18-21.
- [11] 王青平, 关玉梅. GPS 卫星轨道三维坐标插值算法比较 [J]. 地球物理学进展, 2014, 29 (2): 573-579.
- [12] 李振昌, 李忠勤. 滑动式切比雪夫多项式拟合法在 BDS 精密星历内插中的应用 [J]. 测绘工程, 2019, 28 (4): 49-53.
- [13] 龚 衍, 舒 宁, 刘利力. 雷达卫星精密轨道参数确定的研究 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2005, 30 (11): 979-981.
- [14] 陶秋香, 刘国林, 刘伟科. L 和 C 波段雷达干涉数据矿区地面沉降监测能力分析 [J]. 地球物理学报, 2012, 55 (11): 3681-3689.
- [15] DU Y, FU H, LIU L, et al. Orbit error removal in InSAR/MTInSAR with a patch-based polynomial model [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 102: 102438-102449.
- [16] HUANG Z. Precise Orbit Determination and Maneuver Assessment for TH-2 Satellites Using Spaceborne GPS and BDS2 Observations [J]. Remote Sensing, 2021, 13 (24): 5002-5003.
- [17] 朱宁仪, 张 弓, 朱兆达. VC++ 与 MATLAB 混合编程用于 SAR 图像处理 [J]. 计算机测量与控制, 2003 (7): 528-530.
- [18] 何永红, 靳鹏伟. 多分辨率分析的 InSAR 轨道误差去除算法 [J]. 测绘科学, 2021, 46 (7): 128-136.
- [19] 邵 凯, 张厚喆, 秦显平, 等. 分布式 InSAR 编队卫星精密绝对和相对轨道确定 [J]. 测绘学报, 2021, 50 (5): 580-588.
- [20] 黄柏圣, 许家栋. 基于特征点的合成孔径雷达复图像自动配准算法 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (2): 399-401, 409.
- [21] 张 弓, 朱宁仪, 朱兆达. 关于 SAR 图像处理滤波器的评估参数研究 [J]. 计算机测量与控制, 2003 (9): 722-724.
- [4] 吴侠义, 倪 江. 一种基于 GPIB 总线的 T/R 组件测试系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (5): 582-584.
- [5] 江晓竹, 樊 晶, 张金良, 等. 一种基于 LXI 总线的 T/R 组件 S 参数自动测试系统的设计 [J]. 雷达与对抗, 2014, 34 (2): 62-65.
- [6] 倪建丽, 王文伟. T/R 组件自动测试系统设计 [J]. 数字技术与应用, 2012 (1): 74.
- [7] 徐国平. 相控阵雷达 T/R 组件自动测试维修系统的设计 [J]. 电子设计工程, 2019, 27 (3): 31-35.
- [8] 李为玉. T/R 组件 S 参数自动测试软件的设计和应用 [J]. 现代电子技术, 2012; 35 (13): 123-125.
- [9] 冯 亮. 宽频带 T/R 组件测试系统校准技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [10] 顾易帆. X 波段有源相控阵 T/R 组件设计与测试技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [11] 连漫漫, 李大寨, 王 巍. 针对四类 T/R 组件的自动测试系统结构设计 [J]. 机械工程与自动化, 2021, 227 (4): 98-100.
- [12] 蒋晓红, 李为玉, 石 慧. T/R 组件自动测试系统的研制 [J]. 测控技术, 2008, 27 (2): 11-13.
- [13] 王中元. 基于 LabVIEW 的 T/R 组件自动测试系统的设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [14] 胡明春, 周志鹏, 严 伟. 相控阵雷达收发组件技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [15] 许 森, 涂 俊, 孟雅璐. T/R 组件自动化测试技术研究 [C] //2021 年中国航空工业技术装备工程协会年会论文集, 2021: 362-366.
- [16] 李 军, 刘君华, 董海鹰. 基于 AT90S8515 的串行通信及其应用 [J]. 自动化与仪器仪表, 2002, 101 (3): 20-23.
- [17] AGILENT TECHNOLOGY. P-Series Power Meter Programming Guide (N1911A and N1912A) [Z/OL]. USA: Keysight Technologies, 2005.
- [18] E5071C ENA Vector Network Analyzer [K]. KeysightTechnologies. <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-5478EN.pdf>.
- [19] Agilent Technologies. Agilent 噪声指数分析仪 NFA 系列用户指南 [Z]. N8972-90086, 2001.
- [20] Agilent Technologies. Noise Figure Analyzers NFA Series Programmer's Reference [Z]. 2001.