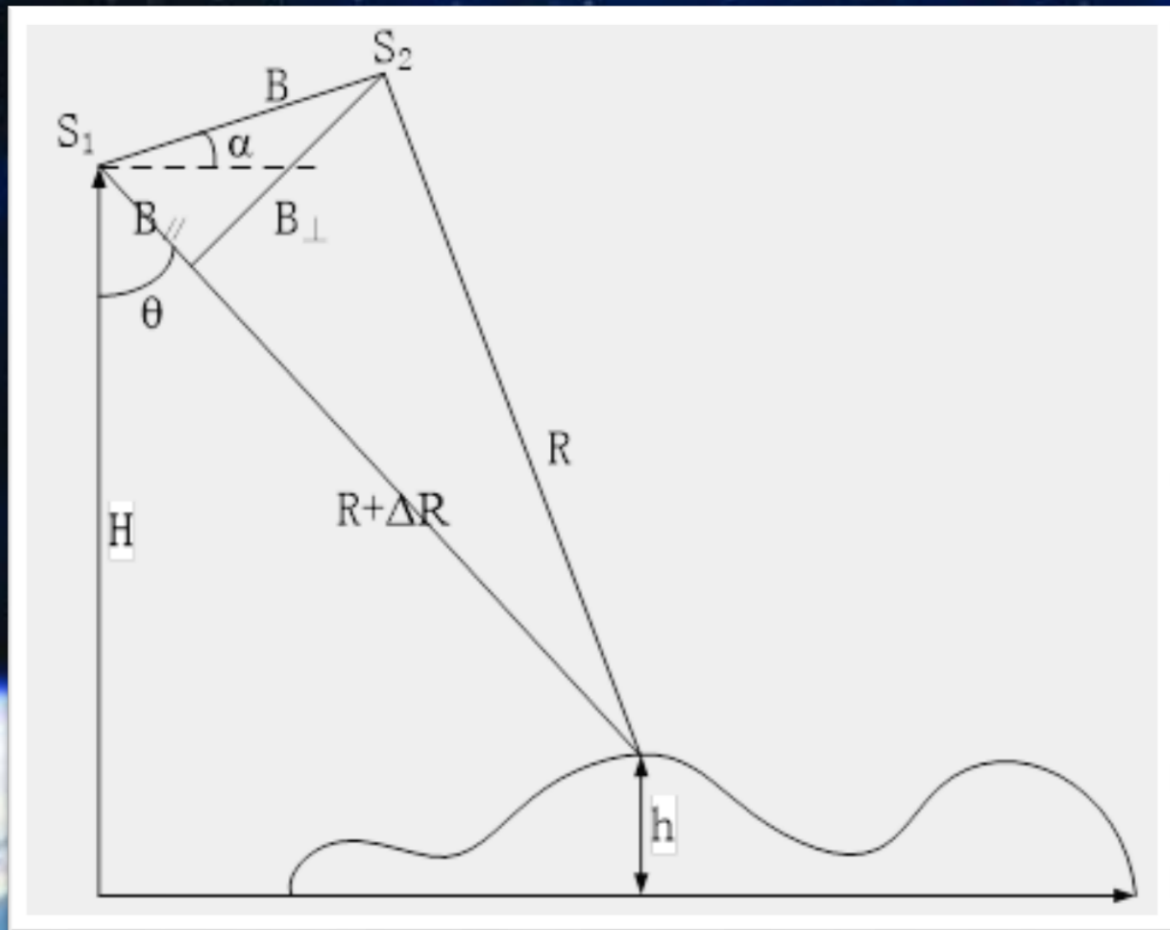
A satellite with large solar panels is shown in orbit above the Earth's surface. A green beam of radiation or signal is directed from the satellite towards the ground. The Earth's horizon and the blue atmosphere are visible in the background.

微波遥感 干涉SAR专题应用教程

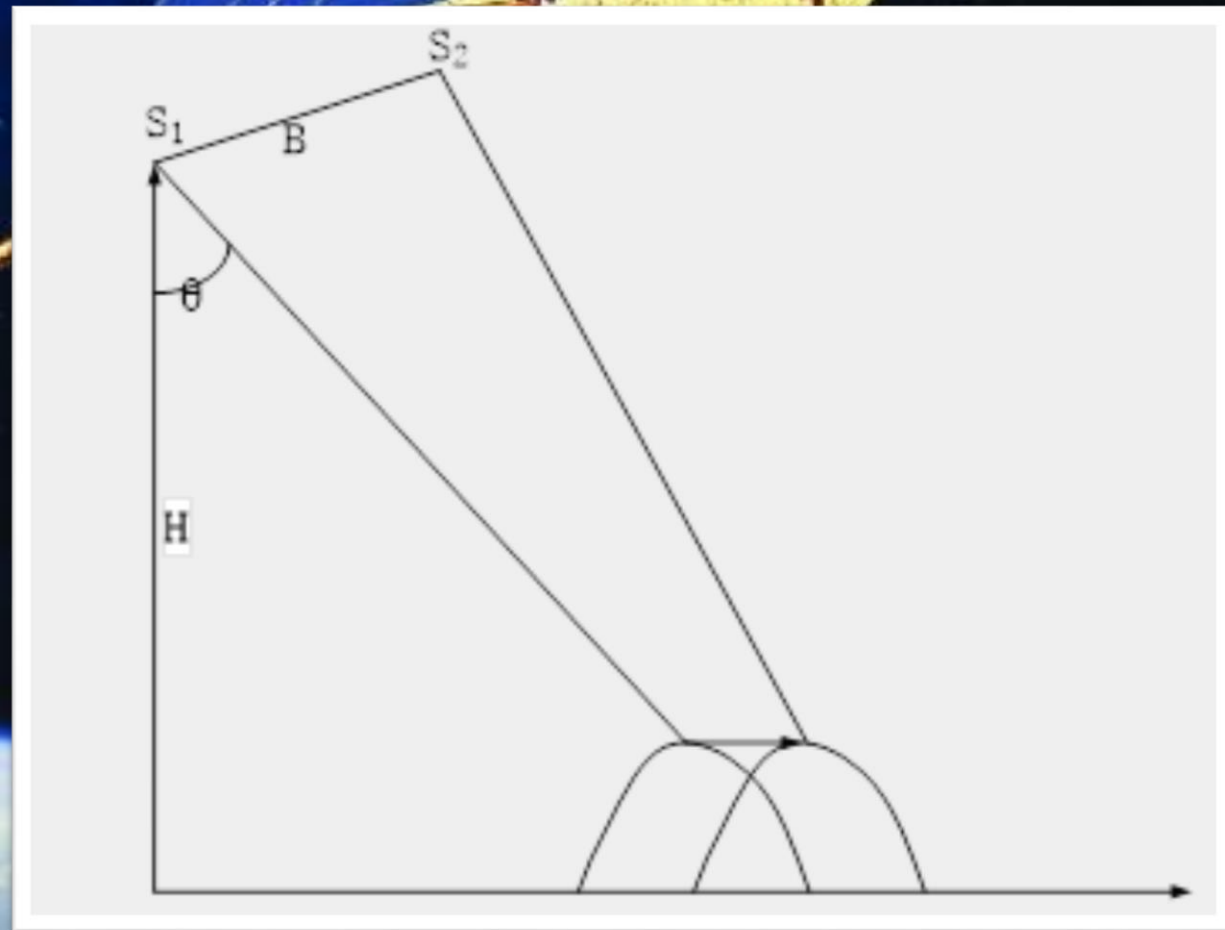
庾露 2022

InSAR

- 合成孔径雷达干涉测量（Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR）是合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar, SAR）领域的重要分支。
- 通过同一平台上安装两副天线同时观测（单轨双天线模式），或者平台上安装一副天线，依靠两次飞行观测（重复轨道模式），获取同一观测区域的重复观测数据，根据相位差和轨道参数等信息进而获得高精度、高分辨率的地面高程或形变信息



InSAR高程测量几何原理



“二轨法” DInSAR测量形变的几何原理

InSAR的基本概念

1. SLC

- Single Look Complex (单视复数影像), 相对于多视, 指未进行平均处理的复数影像, 每个像素都是复数, 包含实部和虚部, 即 $a+bi$

2. 强度 (Intensity, I)

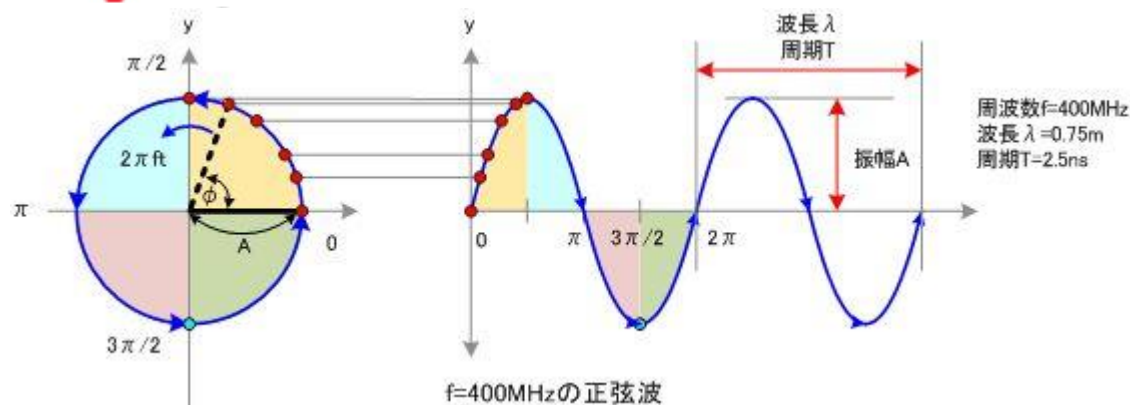
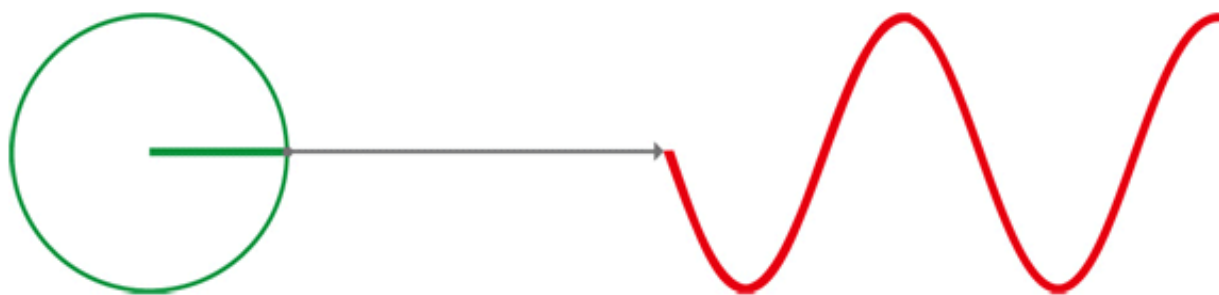
- 由SLC转换而来, $I = \sqrt{a^2 + b^2}$, 反映地物反射雷达信号的后向散射强度

3. 相位 (Phase, φ)

- 由SLC转换而来, $\varphi = \arctan \frac{b}{a}$, 记录电磁波传播的状态, 也是正弦波做圆周振荡的角度, 是干涉测量的关键

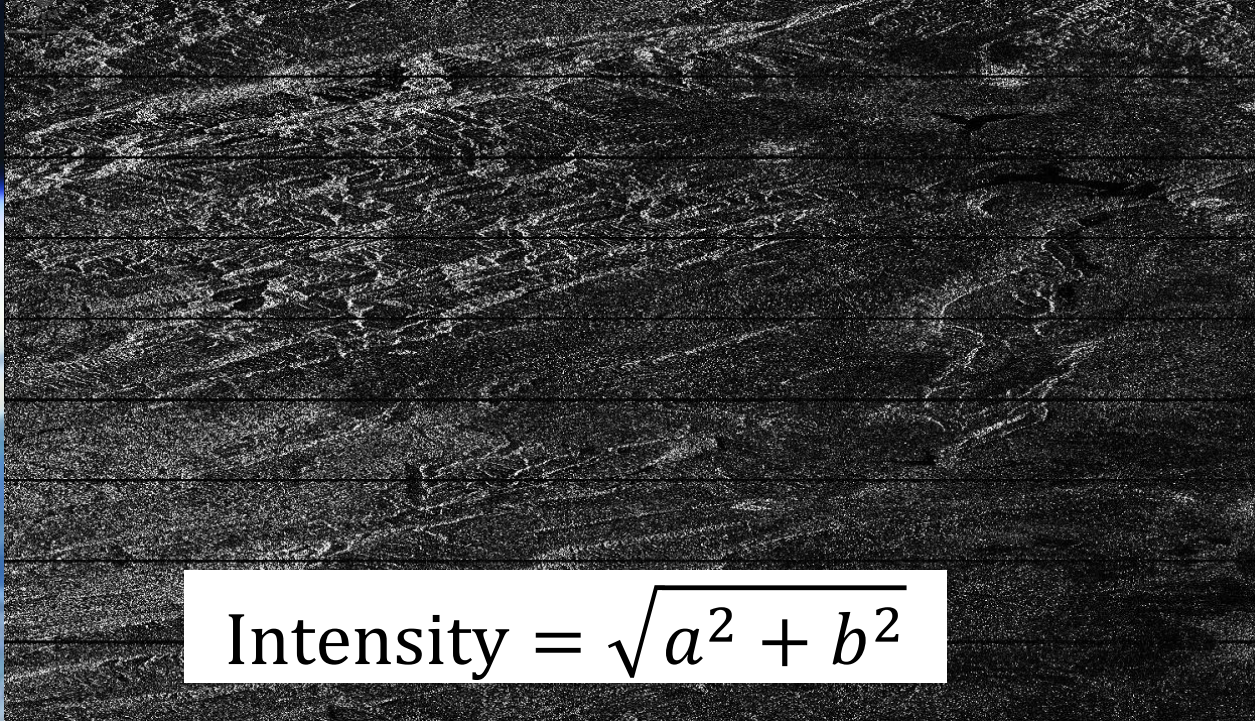
4. 相对相位和绝对相位

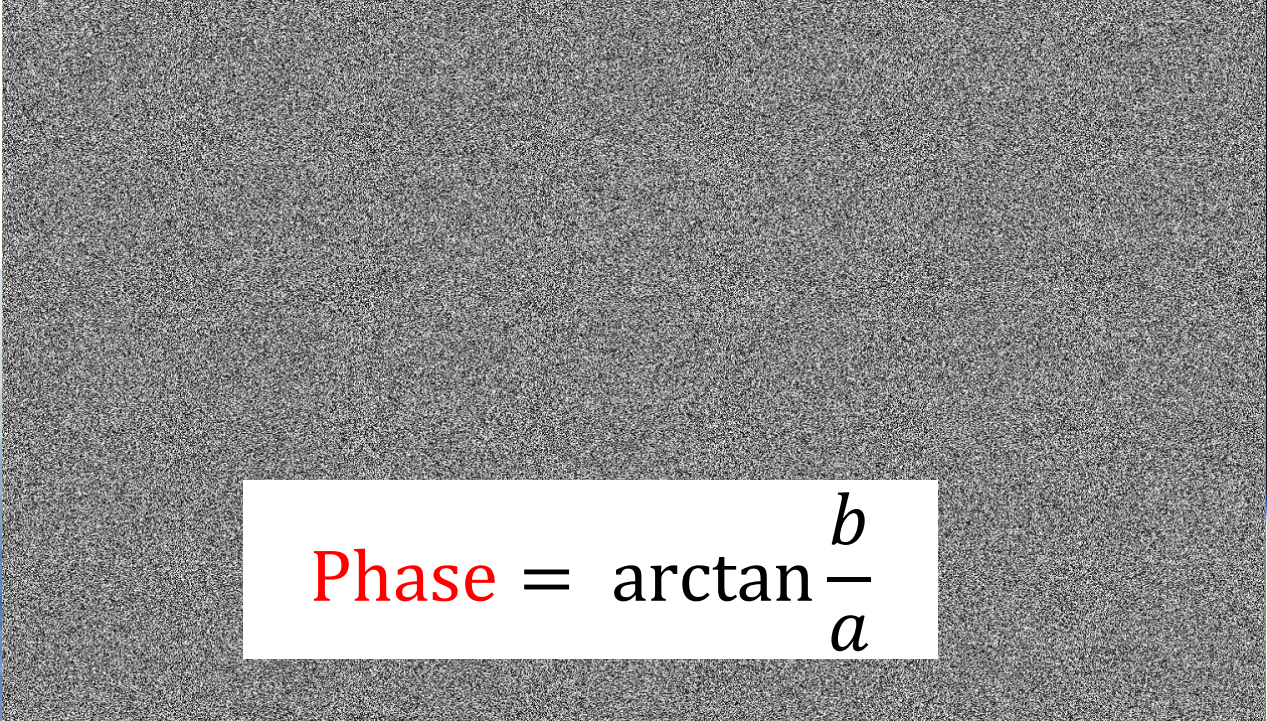
- 相对相位 $\varphi \in [-\pi, +\pi]$
- 绝对相位 $\Phi = n \cdot 2\pi$
- InSAR的本质问题就是求出两次成像的斜距的差，距离 $R = \text{波长} \lambda \times \text{绝对相位} \Phi$



5. 单幅影像的强度可直观展示地物轮廓特征，但相位是没有明确含义的

- 因为，单幅影像的相位是相对相位，因为 $\arctan(x)$ 始终在 $-\pi \sim +\pi$ 之间


$$\text{Intensity} = \sqrt{a^2 + b^2}$$


$$\text{Phase} = \arctan \frac{b}{a}$$

6. 但干涉后的相位，在一定区域内可反映两次成像斜距的相对变化量

因此：干涉→斜距之差→相对相位之差

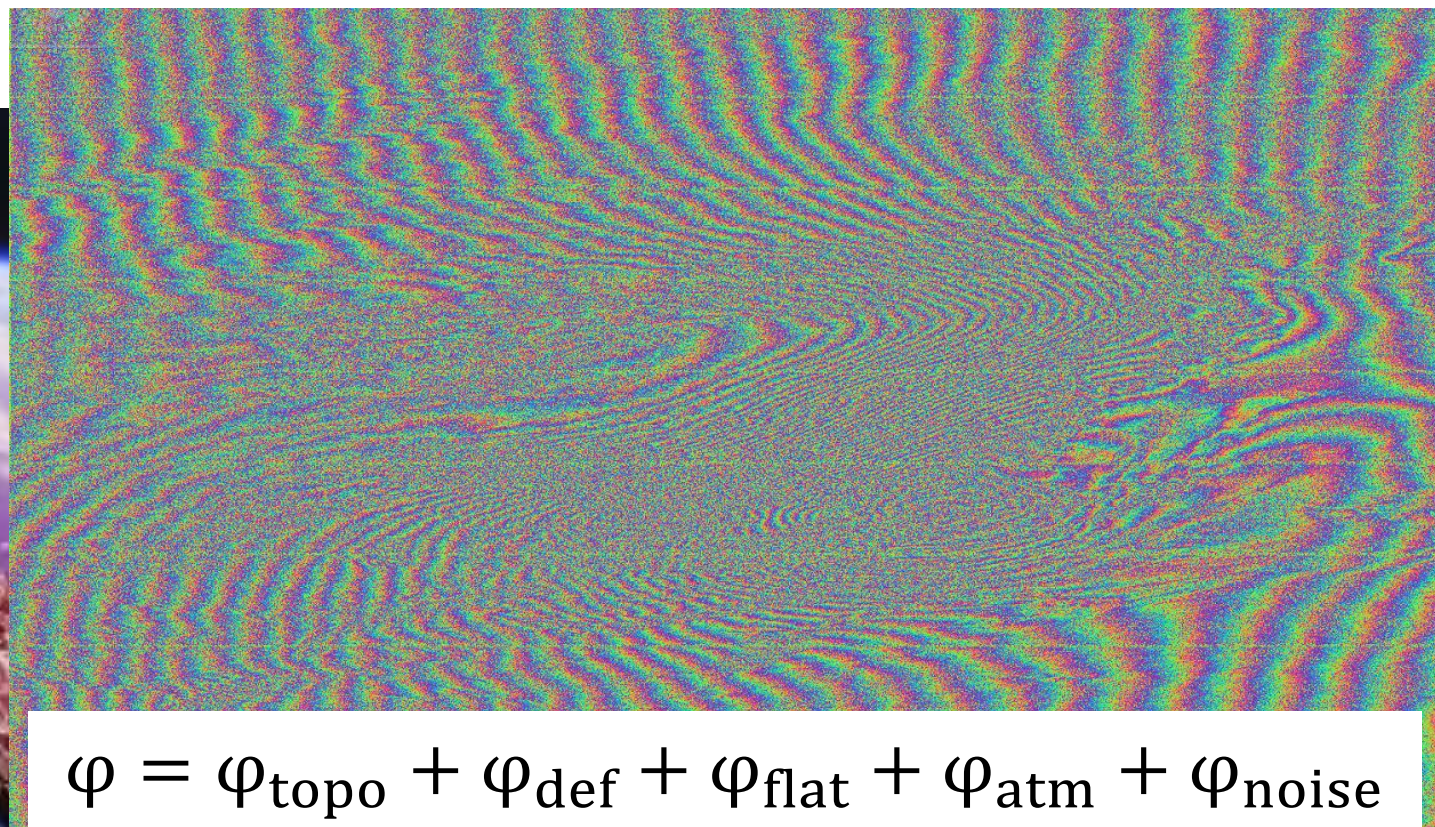
$$\varphi_{\Delta} \rightarrow \varphi_1 - \varphi_2 = \arctan \frac{b_1}{a_1} - \arctan \frac{b_2}{a_2}$$

通过干涉后的相位 φ_{Δ} ，有可能还原得到绝对相位差，从而求出斜距之差

主影像相位

相减subtract

辅影像相位

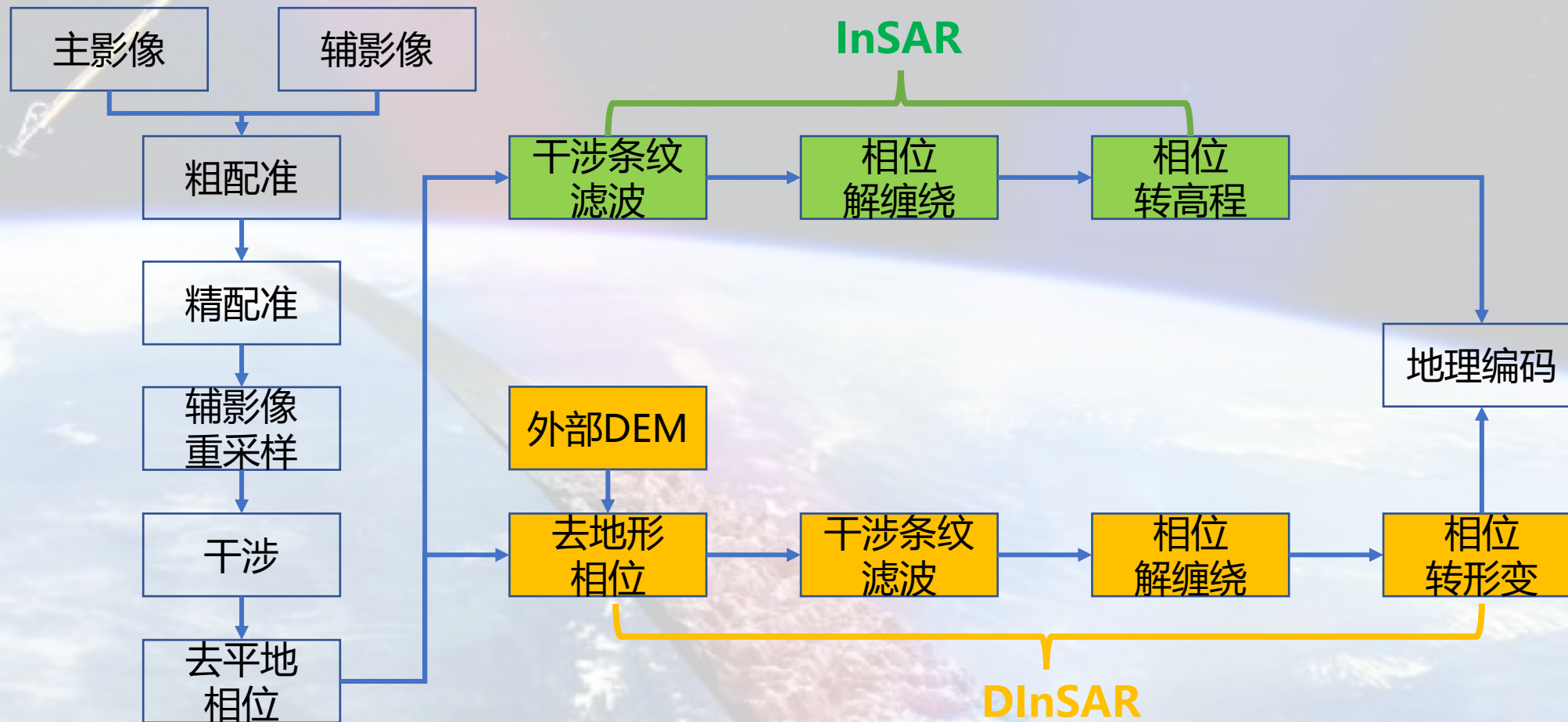


$$\varphi = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}}$$

InSAR的基本处理流程

$$\varphi = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}}$$

干涉相位 地形 形变 平地 大气 噪声



A satellite with a yellow body and blue solar panels is shown in space. It has a long, thin antenna extending from its side. The Earth's surface, with blue oceans and white clouds, is visible in the background. A bright light source creates a lens flare effect across the image.

使用PIE-SAR对ALOS PALSAR数据 进行InSAR实验

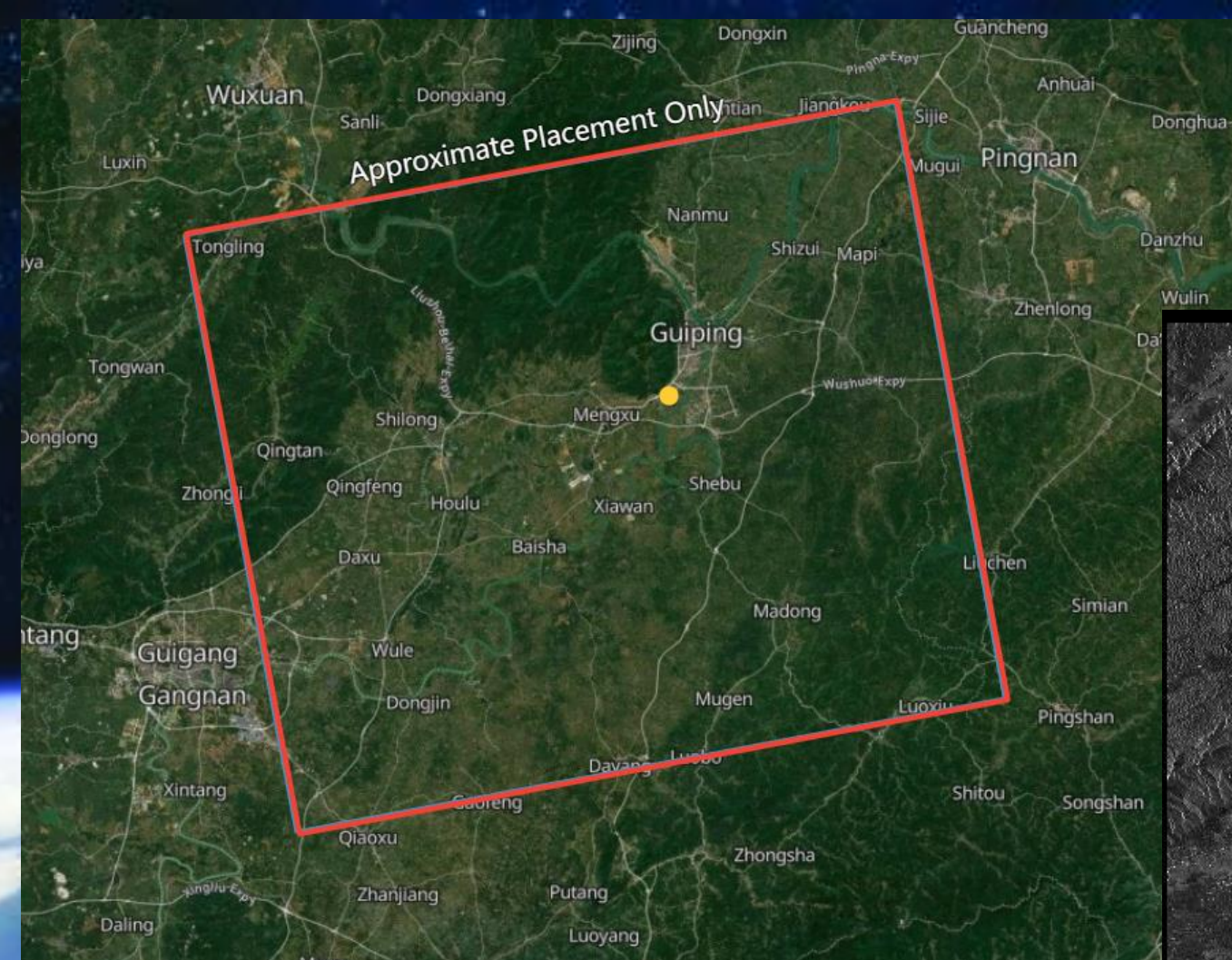
一、数据来源和实验目标

➤ 1.1 数据来源

- 实验数据为日本ALOS-1 PALSAR合成孔径雷达影像，数据级别为1.1级SLC双极化（HH+HV）产品
- 数据覆盖区域为广西桂平市及周边山地区域，数据采集时间分别为2007.9.5和2007.10.21

➤ 1.2 实验目标

- 借助PIE-SAR软件，利用重复轨道InSAR技术生成数据覆盖范围内的DSM高程数据



Approximate Placement Only



SAR强度图

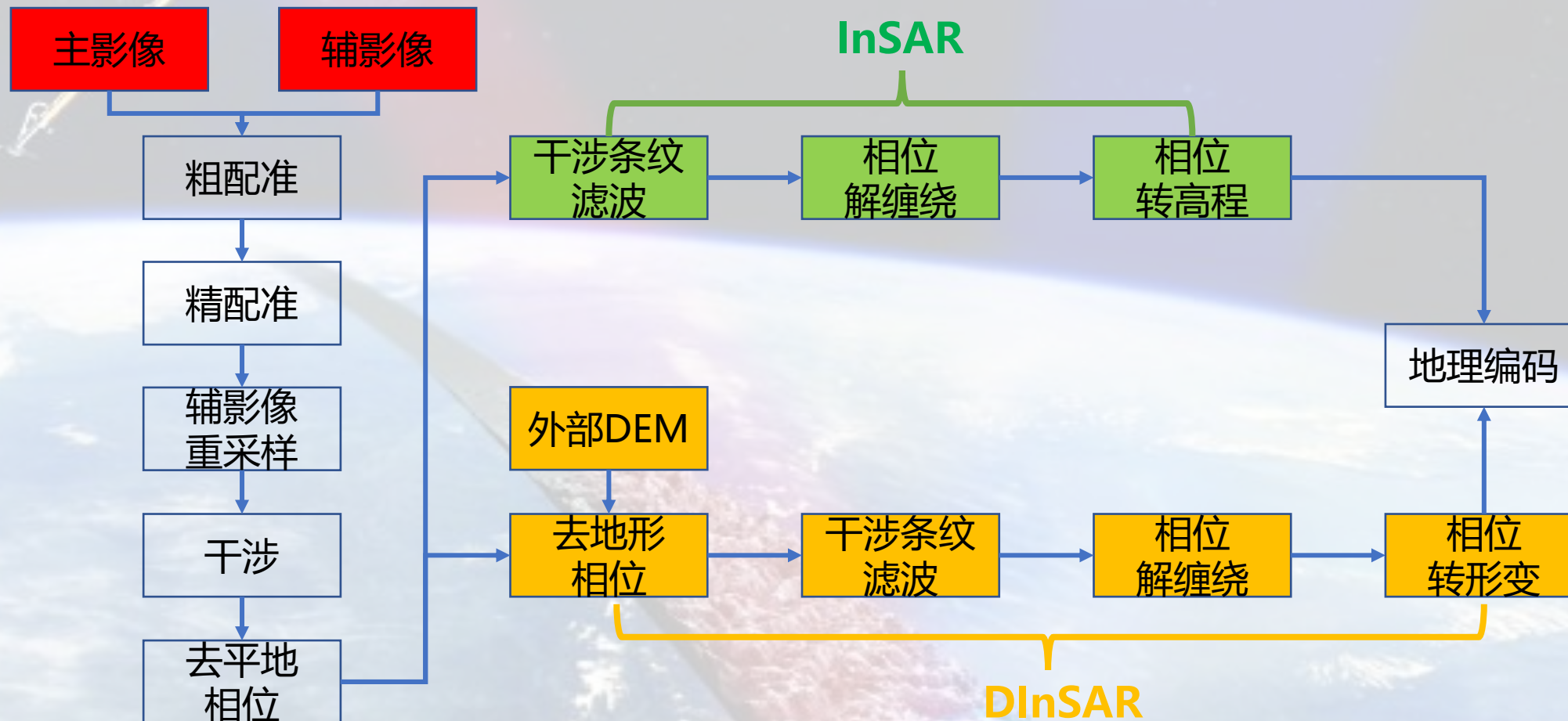


数据覆盖范围

二、SAR数据导入

$$\varphi = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}}$$

地形 形变 平地 大气 噪声



二、SAR数据导入

- 目前PIE-SAR只支持ALOS PALSAR 1.1级别的数据产品，在收集数据时需注意
- 数据导入→PALSAR→PALSAR-1，分别导入两个成像时间的影像
- 常规InSAR只需要一个极化通道的数据，通常同极化（HH或VV）比交叉极化（HV或VH）所接收的回波能量更多，成像效果更优。因此本实验只选择HH通道数据。

二、SAR数据导入

ALOS-1 PALSAR数据导入

输入文件

头文件 ...

☒ HH通道 ...

☐ HV通道 ...

☐ VH通道 ...

☐ VV通道 ...

输出文件名前缀

☒ 成像日期

☐ 自定义

输出数据类型

数据类型

输出目录

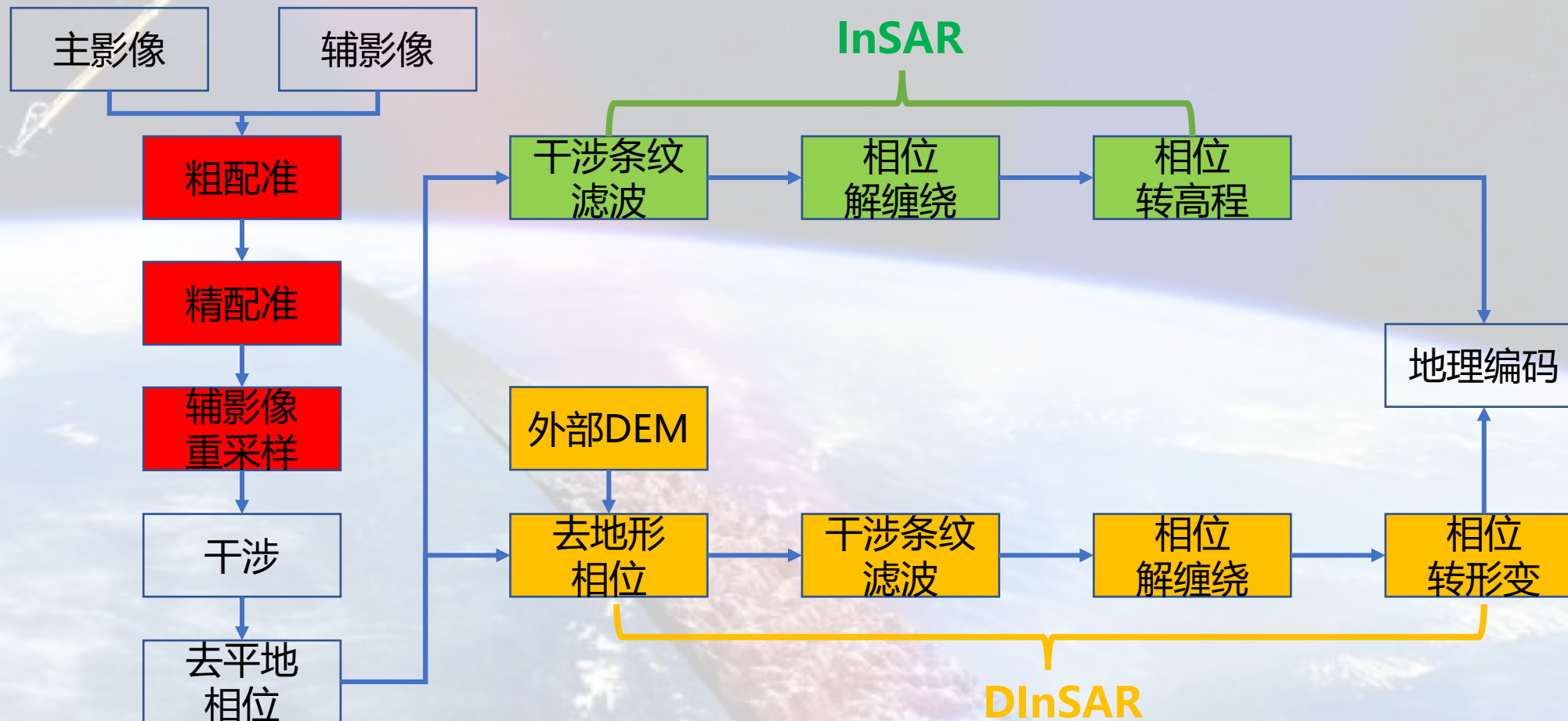
输出目录 ...

确定 取消

三、影像配准和重采样

$$\varphi = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}}$$

地形 形变 平地 大气 噪声




三、影像配准和重采样

- 配准是两幅影像上相同位置的地物建立精确的匹配关系（几何变换模型）
- 重采样是将辅影像根据几何变换模型生成与主影像精确重合的影像
- 通常将日期靠前的影像设为主影像
- InSAR处理对配准的精度要求很高，理论上配准精度需达到子像素级（ $1/10$ 像素），只能通过高精度自动配准算法实现
- 配准流程通常采用粗配准和精配准，分两步提升配准精度


3.1 粗配准

- 粗配准：主要是借助卫星的轨道信息，根据成像多普勒方程、距离方程和参考椭球方程计算主辅影像的初始偏移量，计算出的初始偏移量误差一般可达到距离向 ± 5 个像元和方位向 ± 10 个像元。这样，在精配准时可以大大缩小搜索范围

3.1 粗配准 (干涉SAR→粗配准)


 粗配准

输入文件

主参数文件  早期影像作为主影像

辅参数文件

输出文件

偏移文件  粗配准偏移量

3.2 精配准

- 精配准：在粗配准估计得到的偏移量基础上，利用最大干涉频谱法基于一定的搜索窗口进行精配准，其配准精度可以达到 $1/10$ 个像素级。
- 如果匹配获得的控制点过少，可以通过增大搜索窗口，以估计出更多控制点，但也会增加程序计算量
- 配准完成后，会生成新的偏移量文件

3.2 精配准

(干涉SAR→精配准)

精配准

输入文件

主影像 ...

辅影像 ...

偏移文件 ...

窗口大小

方位向

距离向

窗口个数

方位向

距离向

信噪比

阈值

是否覆盖偏移文件

☐ 是 ☒ 否

确定 取消

适当增大搜索窗口，
可获得更多控制点

3.3 重采样

- 使用精配准后的偏移量文件，将辅影像重采样输出，得到与主影像地物精确重叠，且行列号也与主影像一致的重采样后辅影像
- 后续流程都将基于重采样后辅影像与主影像进行

3.3 粗配准 (干涉SAR→重采样)

重采样

输入文件

主影像 ...

辅影像 ...

偏移文件

输出文件

重采样文件

确定 取消

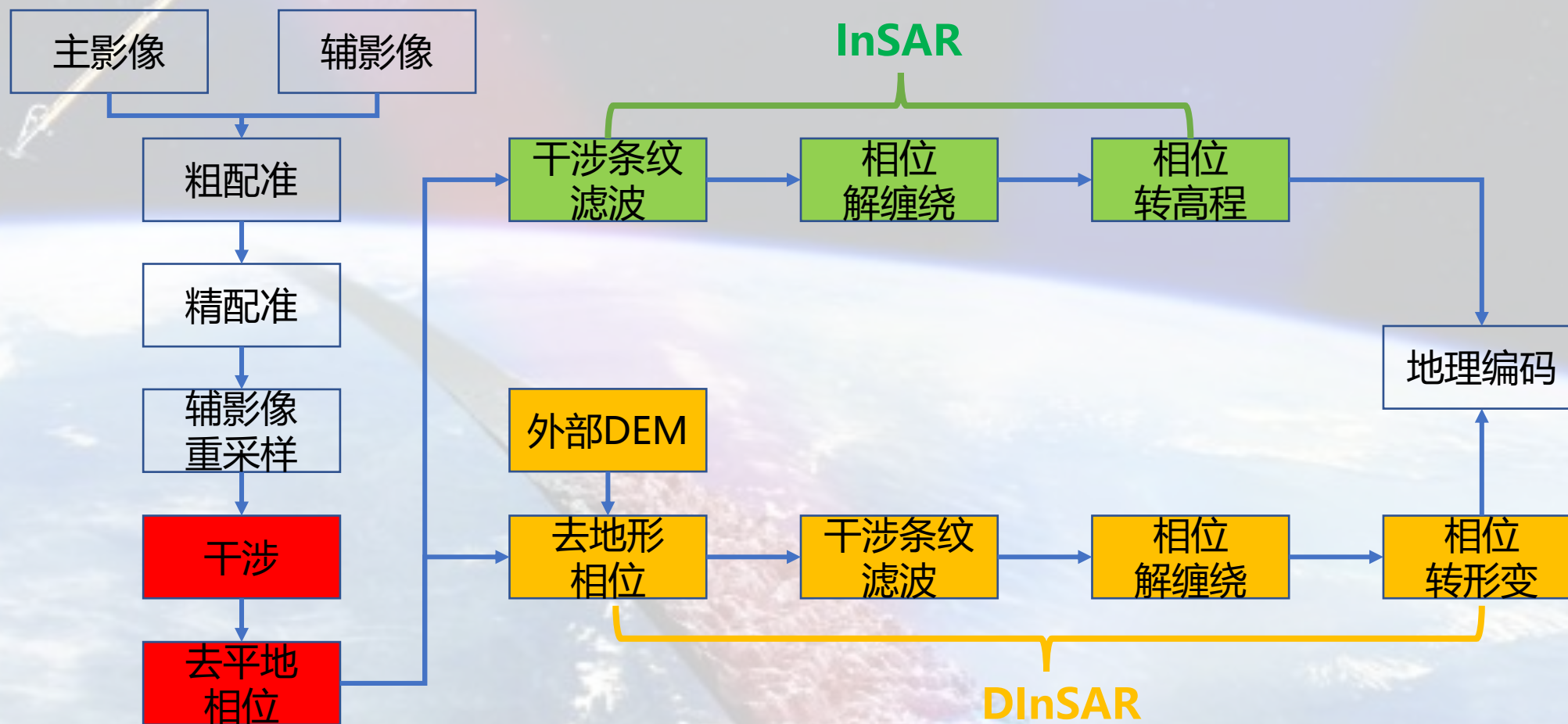
精配准得到的偏移
量文件

重采样后的辅影像

四、干涉和去平地相位

$$\varphi = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}}$$

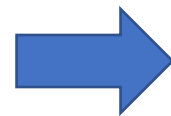
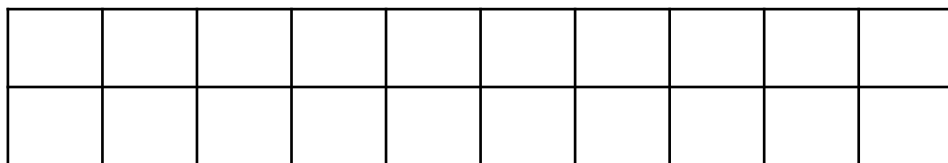
地形 形变 平地 大气 噪声



四、干涉和去平地相位

- 干涉：将主影像和重采样后的辅影像，进行共轭相乘生成干涉图，同时可对干涉图进行多视处理
- 多视：本质就是像元平均，其目的是以牺牲分辨率为代价降低噪音，并使距离向和方位向的分辨率尽可能一致
- 多视视数可根据导入SLC的辅助文件 (.xml) 中的入射角、距离向分辨率和方位向分辨率计算。计算方法：保证（距离向分辨率/ $\sin(\text{入射角})$ ）与对应视数的乘积近似等于方位向分辨率与对应视数的乘积即可

4.1 多视的原理



多视的原理

4.2 多视视数的计算

- 浏览导入的主影像对应的辅助.xml文件
- 其中incidenceAngle为入射角 (i)、slantRangeSpacing为距离向分辨率 (r)、azimuthSpacing为方位向分辨率 (a)
- 以本实验数据为例, $i \approx 38.74$ 、 $r \approx 9.37$ 、 $a \approx 3.18$, 则
 $r/\sin(i) \approx 14.97$; $r/\sin(i)$ 与 a 之比约为5:1, 则距离向视数可设为1, 方位向视数可设为5

4.3 干涉图计算 (干涉SAR→干涉图计算)

干涉图计算

输入文件

主影像 G:/Guiping_alos1.1/insar_/20070905_HH.img

辅影像 G:/Guiping_alos1.1/insar/20071021_HH_Resampled.img

偏移文件 G:/Guiping_alos1.1/insar/Coarse_offset_New.off

多视视数

距离向 1 方位向 5

频谱滤波

☐ 距离向 ☐ 方位向

输出文件

干涉图 G:/Guiping_alos1.1/insar/Insar.img

确定 取消

重采样后的辅影像

4.4 复数数据转换 (基础SAR→复数数据转换)

- 干涉图为复数影像，PIE-SAR直接载入复数影像将默认显示幅度图，需要运行“复数数据转换”工具，从复数影像中转换出相位图，才能查看干涉相位
- 后续，对干涉相位滤波或相位转高程/形变等流程都需要使用相位图

复数数据转换

待处理影像列表

序号	影像
1	G:\Guiping_alos1.1\insar\Insar.img

输入影像
删除
清空

参数类型

☐ 强度 ☐ 幅度 ☒ 相位 ☐ 实部 ☐ 虚部

输出文件命名方式

☒ 后缀 ☐ 原始文件名

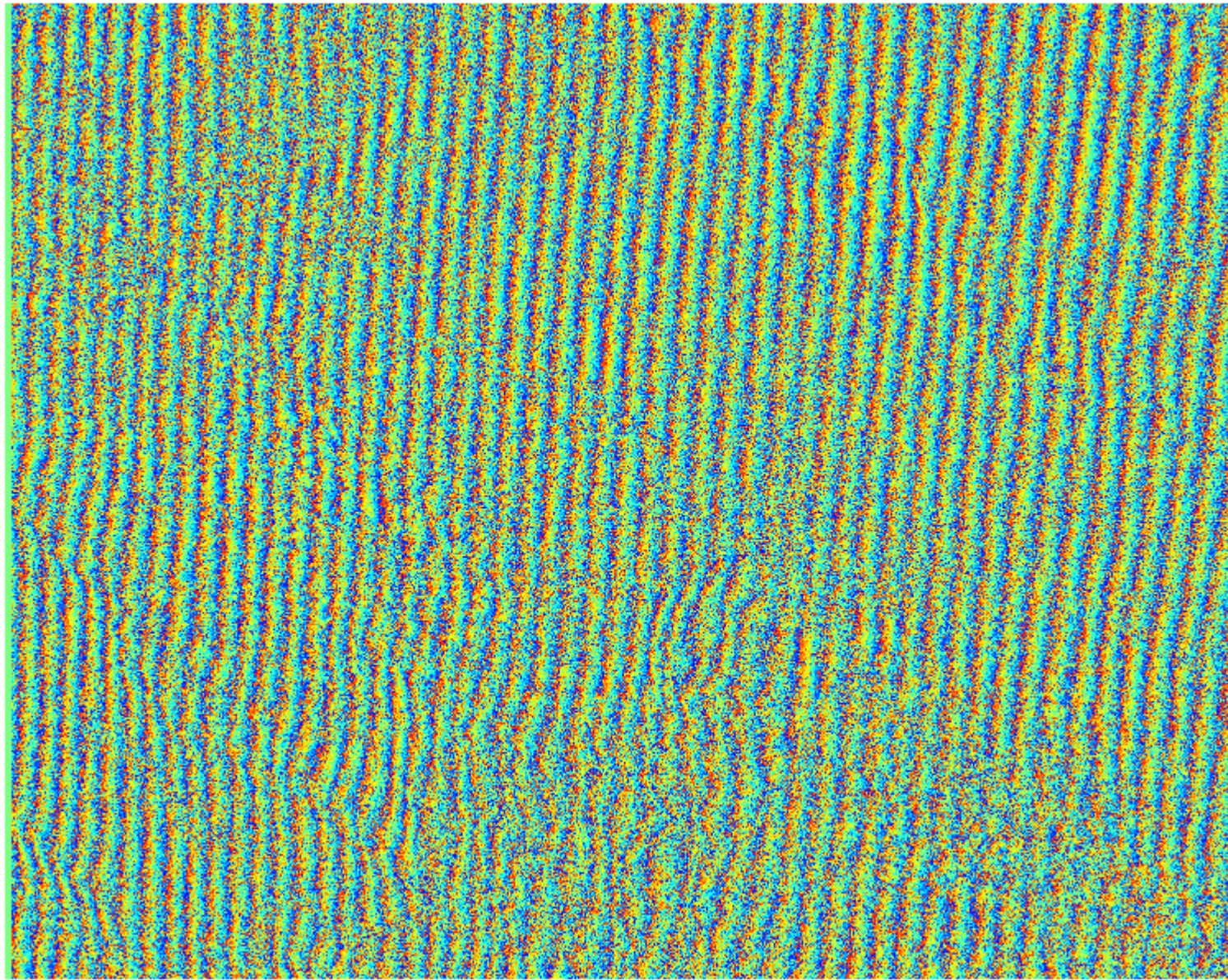
输出文件数据类型

数据类型

输出目录 ...

确定 取消

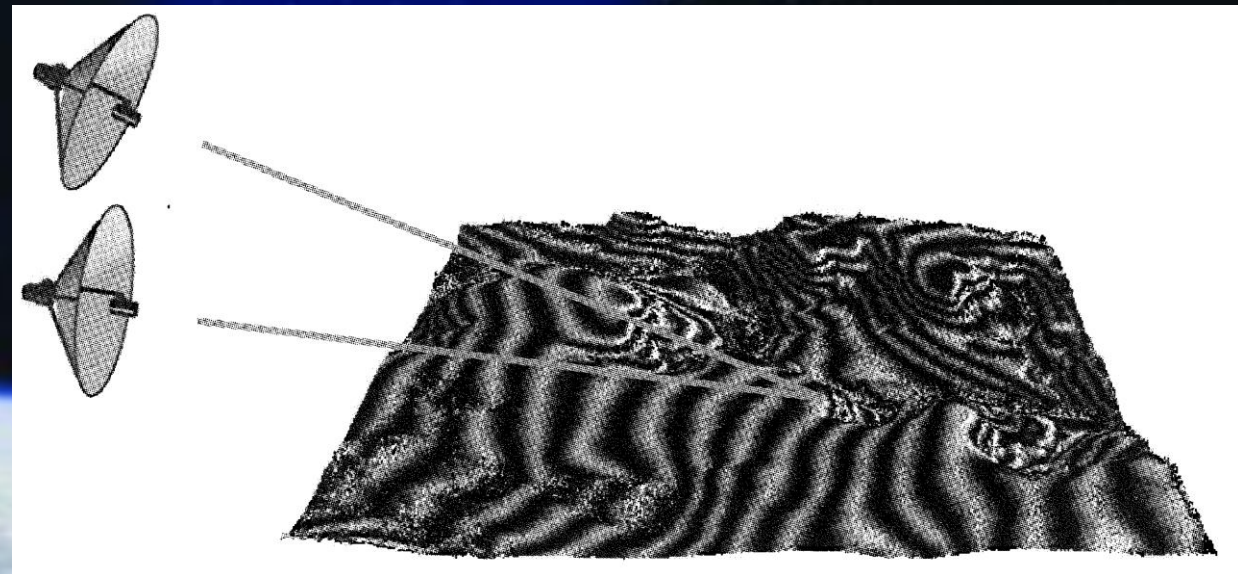
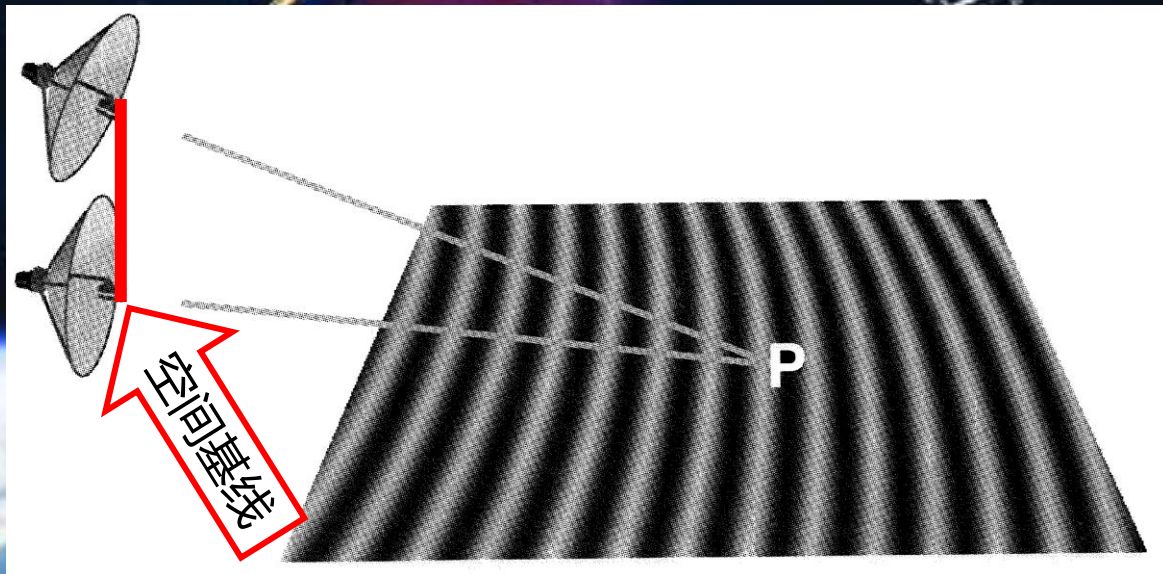
干涉后相位（包含平地相位）



4.5 去除平地相位

- 平地相位：两副天线各自发射出同频率的相干雷达波，就会发生相位干涉，其波束投射到平坦地面上，最终形成的干涉相位图会呈现趋势性一致的平地条纹
- 如果平地上包含了起伏的地形，则干涉相位将同时包含地形相位和平地相位，条纹将是平地条纹与地形条纹的叠加
- 如果起伏地形中发生了形变，则干涉相位将包含地形相位、平地相位和形变相位，条纹将是这三者的叠加。更复杂的，还会包含大气相位以及可能的噪声相位等。
- 无论做地形测量还是形变测量，平地相位都会掩盖地形或形变的相位信息，都是首先需要去除的
- 平地相位和空间基线有关，基线越大条纹越密集，影像干涉质量越差

4.5 去除平地相位



$$\varphi = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}}$$

干涉相位的组成

地形相位

形变相位

平地相位

大气相位

噪声相位

4.5 去除平地相位 (干涉SAR→基线计算、去除平地相位)

基线计算

输入影像

主参数文件 ...

辅参数文件 ...

输出文件

基线文件 ...

首先，利用主副影像的轨道参数
计算获得基线值

去除平地相位

输入文件

干涉图 ...

基线文件 ...

偏移文件 ...

轨道模式

☒ 重复轨道 ☐ 螺旋卫星编队

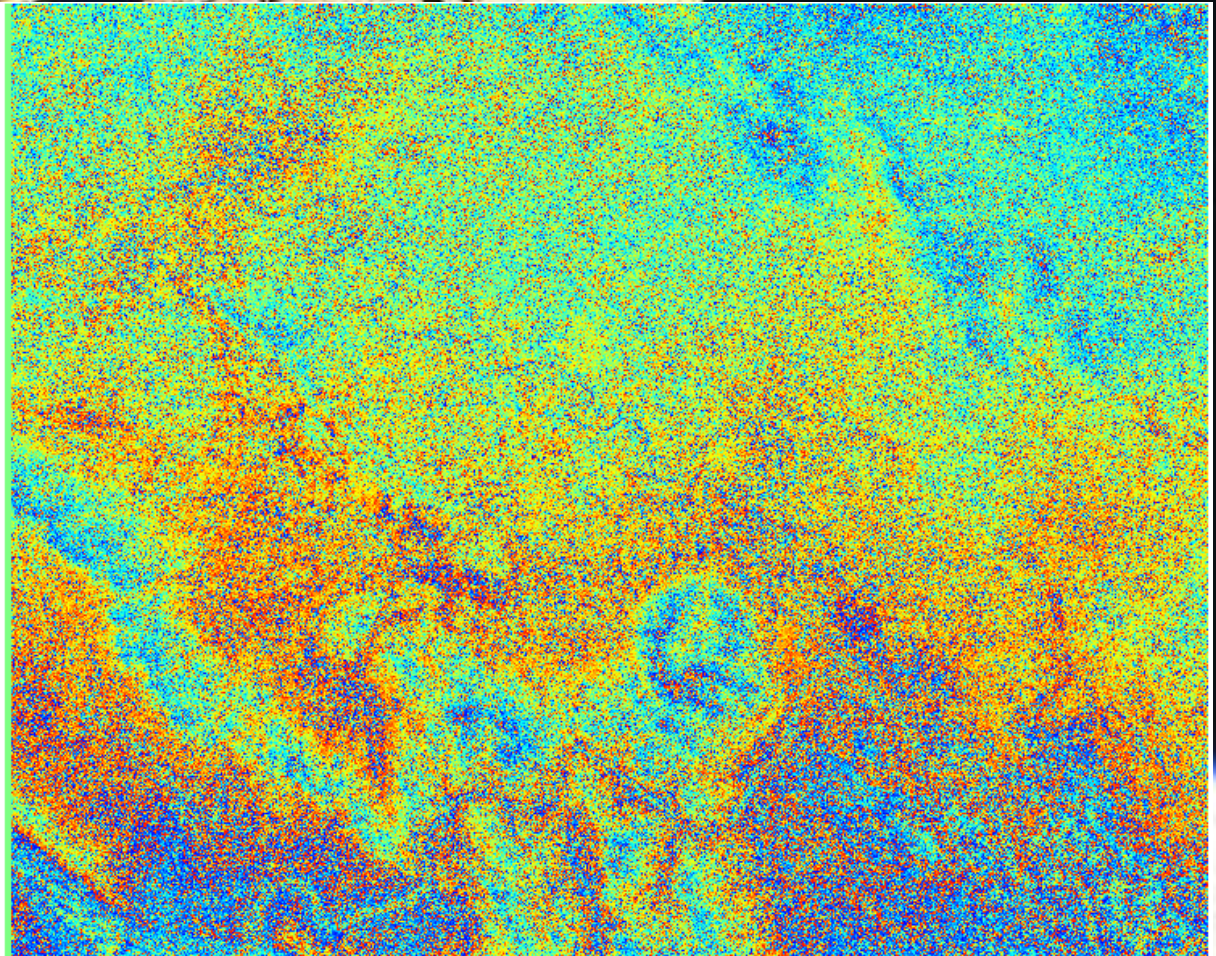
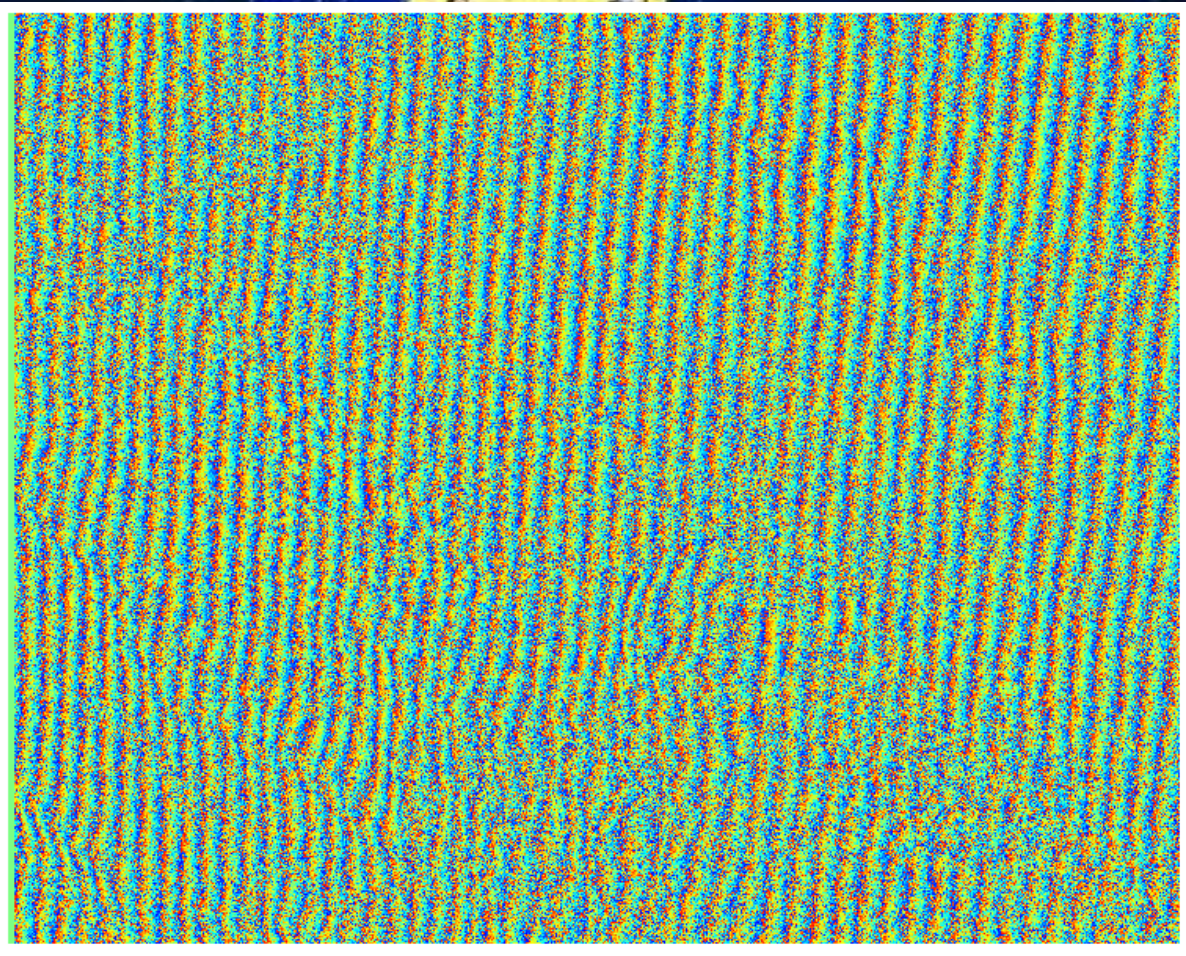
输出文件

平地相位图 ...

去平干涉图 ...

然后，计算得到去平后的干涉图

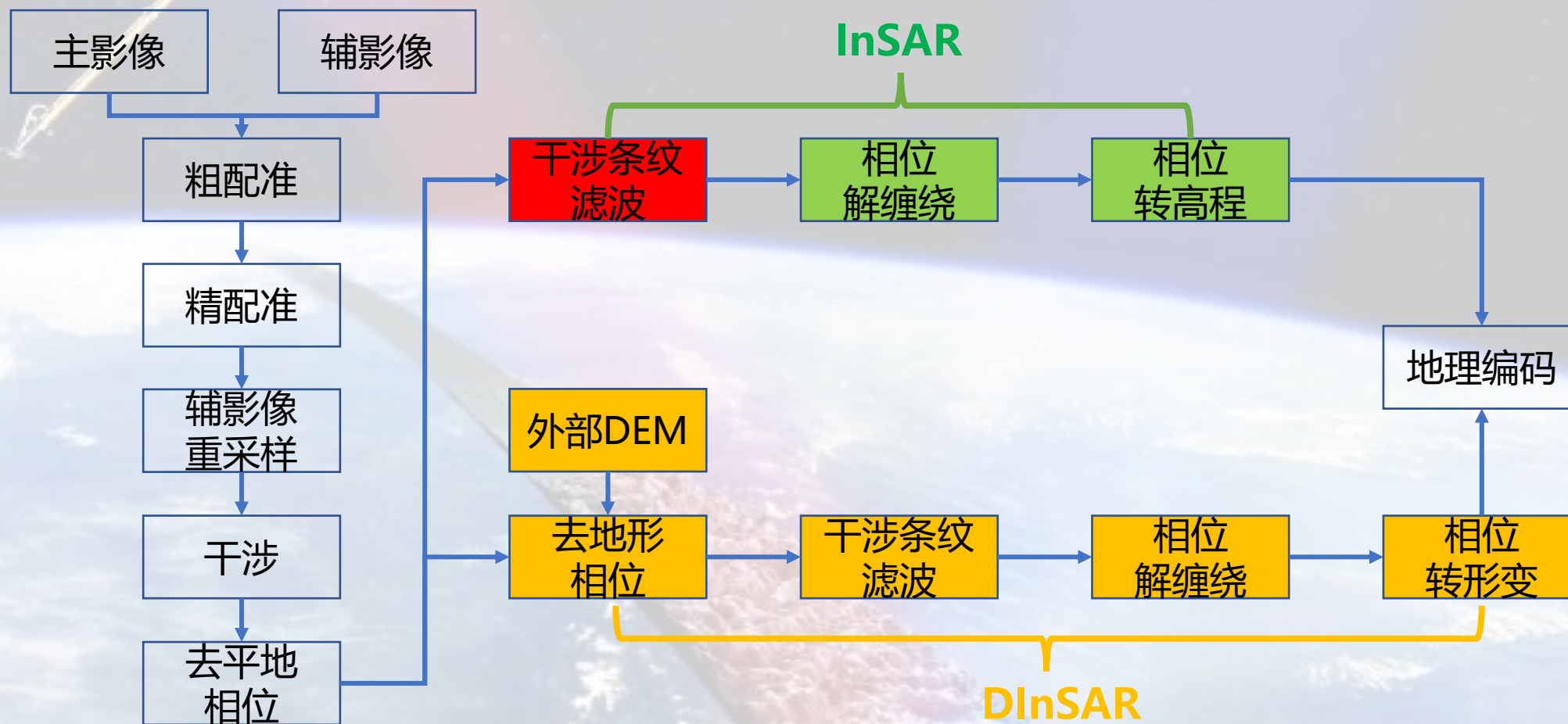
去除平地相位前后的干涉图



五、干涉图滤波

$$\varphi = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}}$$

地形 形变 平地 大气 噪声



五、干涉图滤波

- PIE-SAR提供了两种滤波方法：自适应滤波和Goldstein滤波，两种方法都需要额外的多视数据，这里选择Goldstein滤波进行讲解。
- Goldstein滤波首先需要计算相干性（Coherence），相干性是衡量干涉质量的一个重要指标，值域 $[0, 1]$ ，由多视后的主副复数影像计算得到

5.1 多视处理 (基础SAR→多视处理)

输入为主、经重
采样后的副影像

自定义视数

选择输出为
多视复数类型

多视处理

待处理影像列表

序号	影像	
1	G:\Guiping_alos1.1\insar\20070905_HH.img	FCC
2	G:\Guiping_alos1.1\insar\20071021_HH_Resampled.img	FCC

输入影像
删除
清空

多视定义方式

☒ 自定义视数
☐ 栅格格网大小(m) 10

多视参数

距离向视数 1
方位向视数 5

多视类型

☒ 多视复数 ☐ 多视幅度

输出文件后缀

后缀 MultiComplex

输出文件数据类型

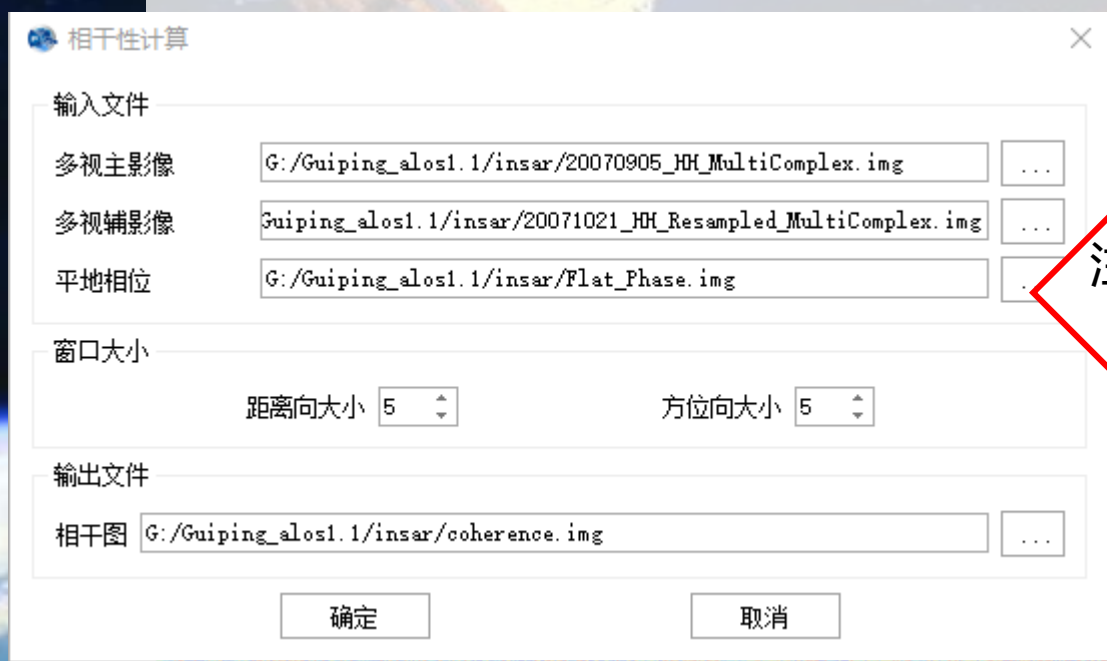
数据类型 ENVI IMG(*.img)

输出目录 G:\Guiping_alos1.1\insar

确定 取消

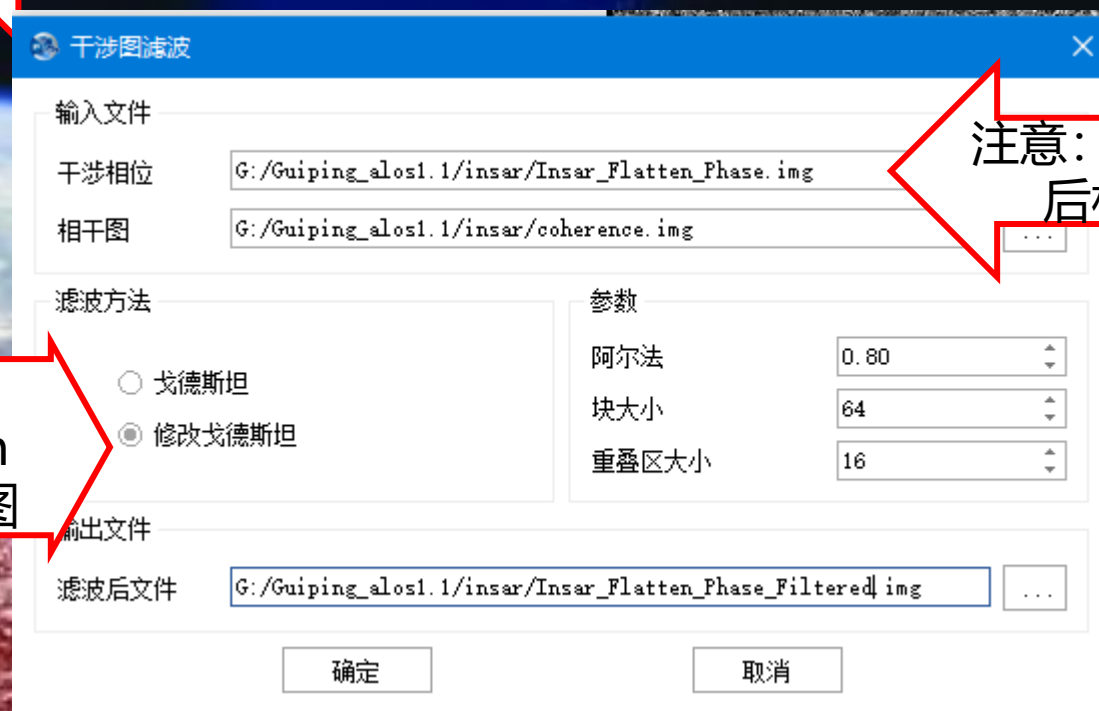
输入与干涉图
相同的视数

5.2 干涉图滤波 (干涉SAR→相干性计算、Goldstein滤波)



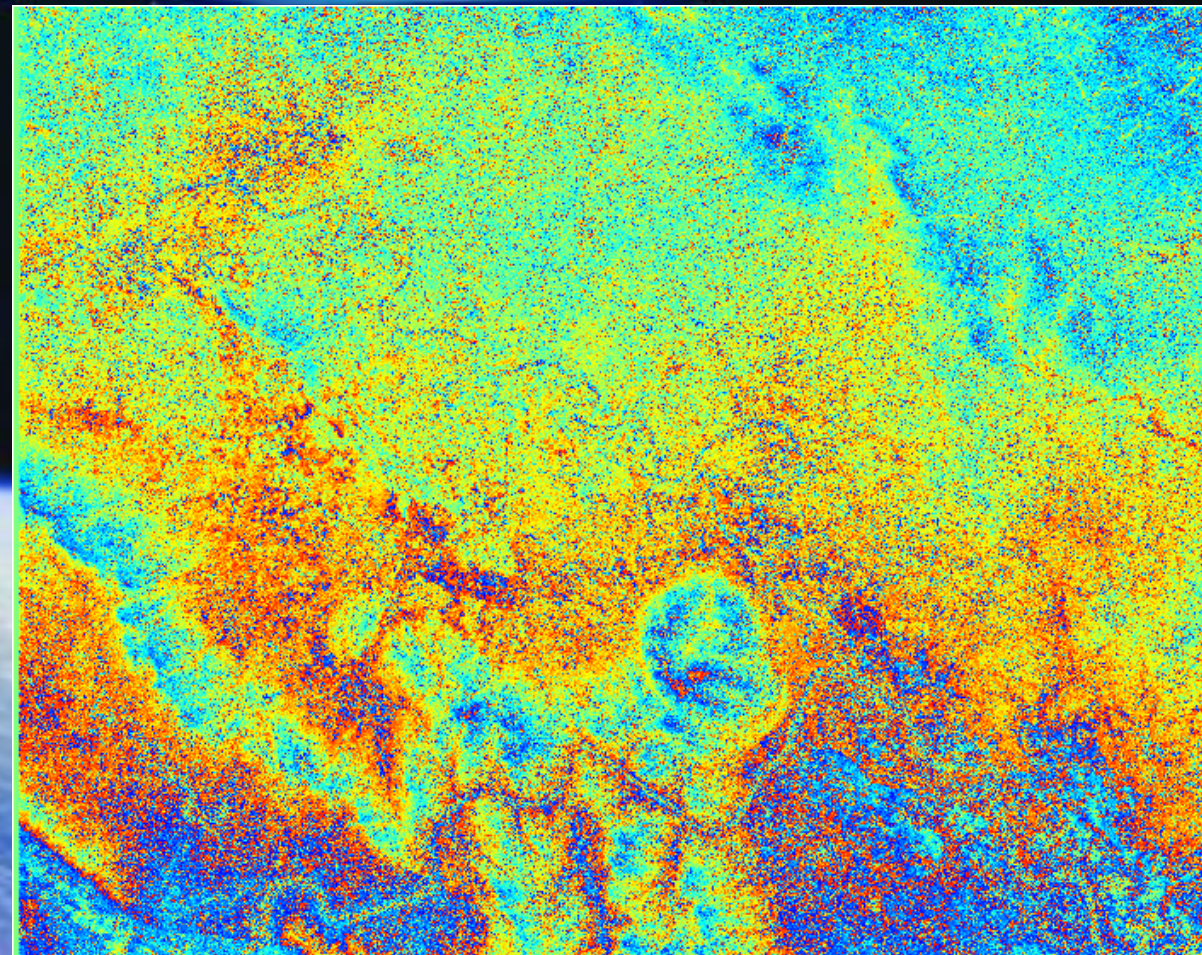
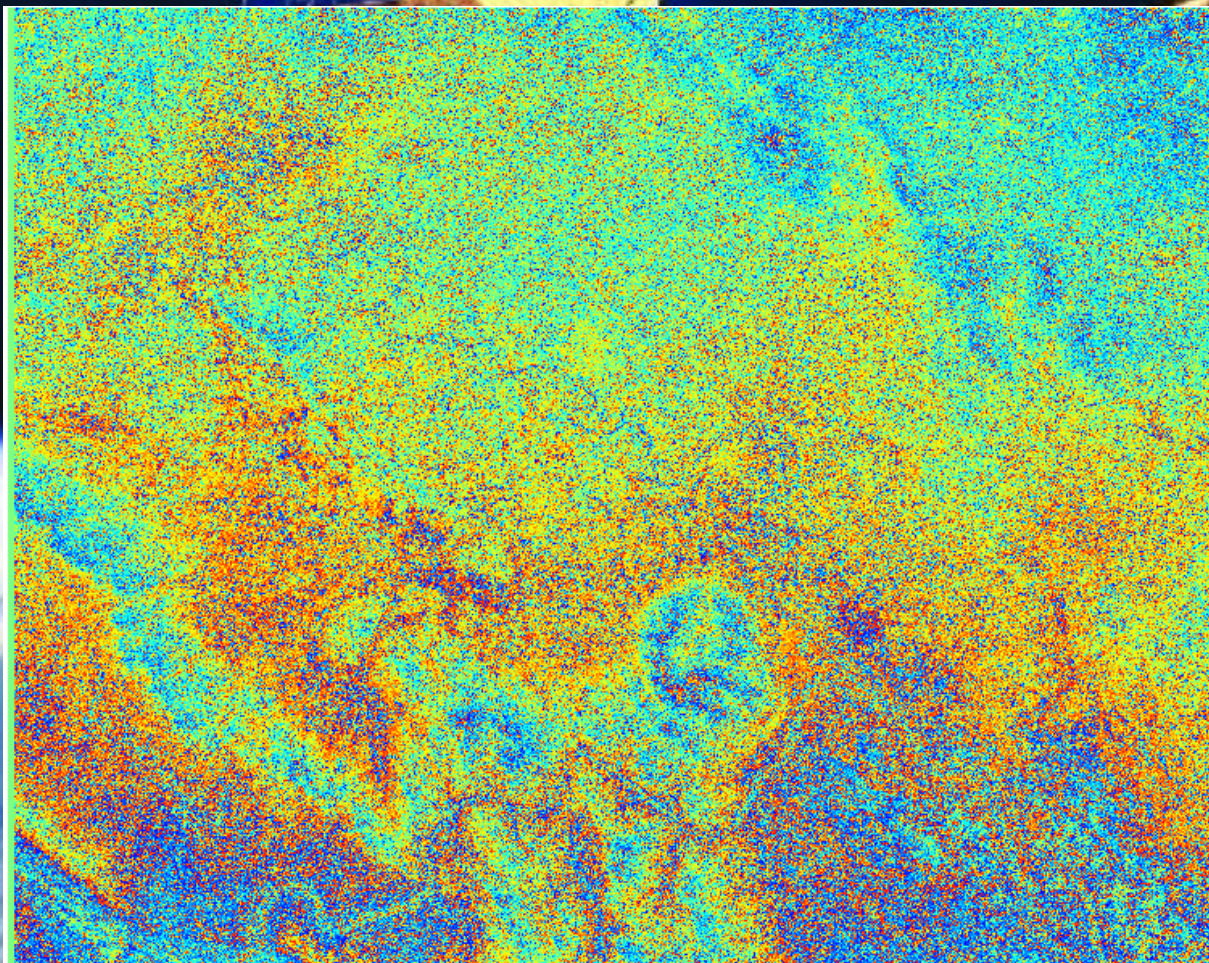
注意：是平地相位，
非去平后相位

选择
修改Goldstein
才能使用相干图



注意：是去平
后相位

滤波前后相位



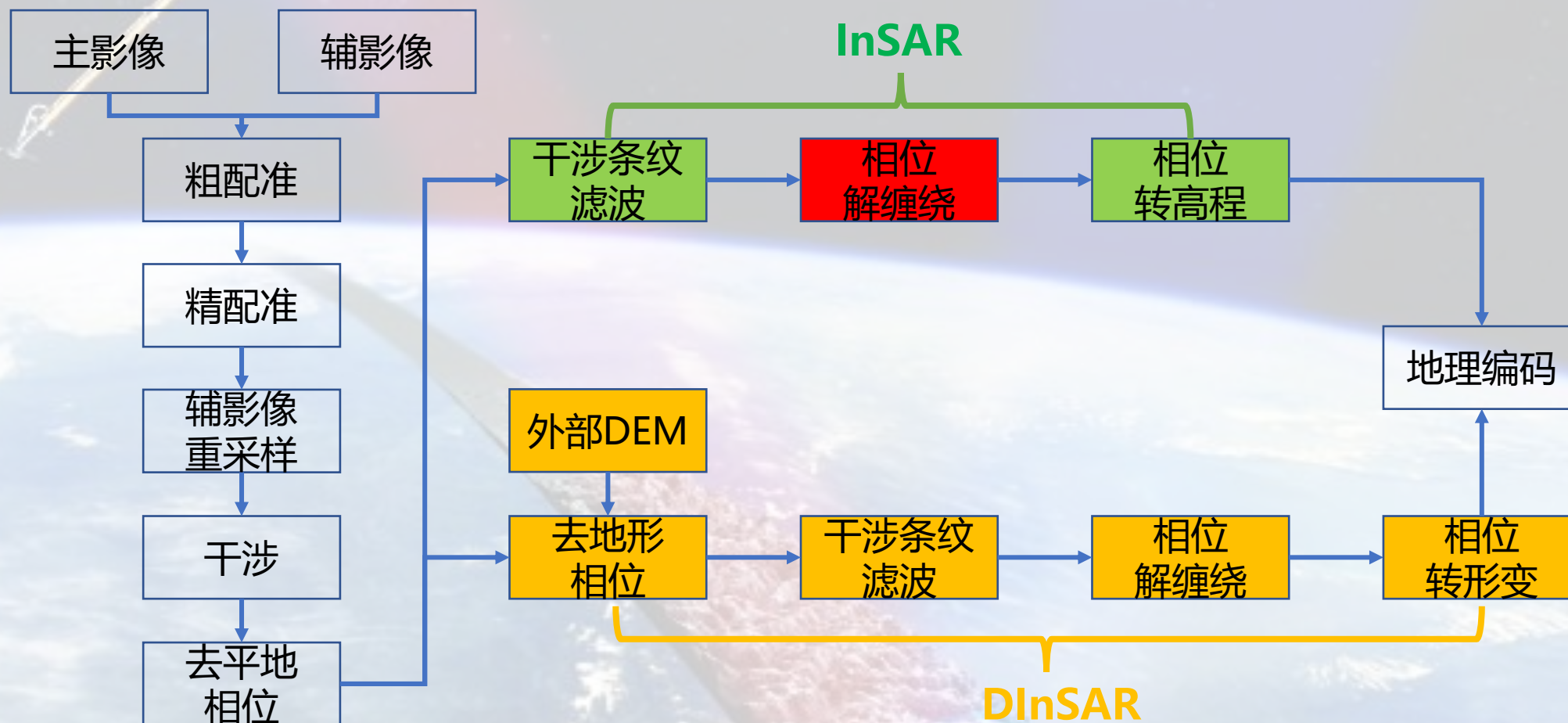
5.3 滤波参数调整

- 干涉质量越好，反映在干涉图上是干涉条纹越清晰，噪声越少
- 如果想获得更好的滤波效果，可增大阿尔法值或块大小，但有可能在条纹密集区破坏条纹的分布

六、相位解缠绕

$$\varphi = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}}$$

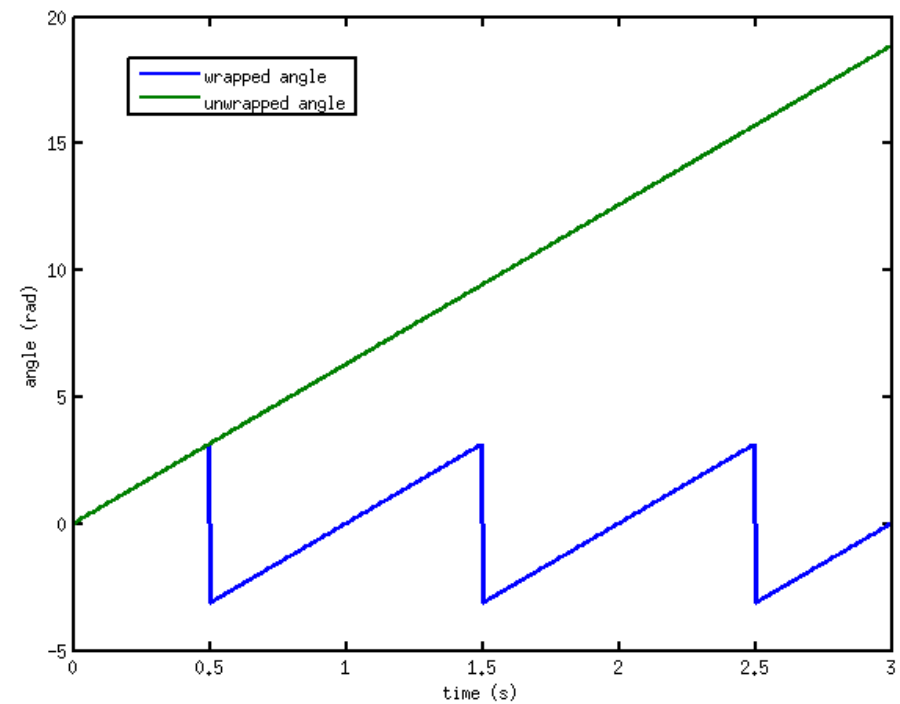
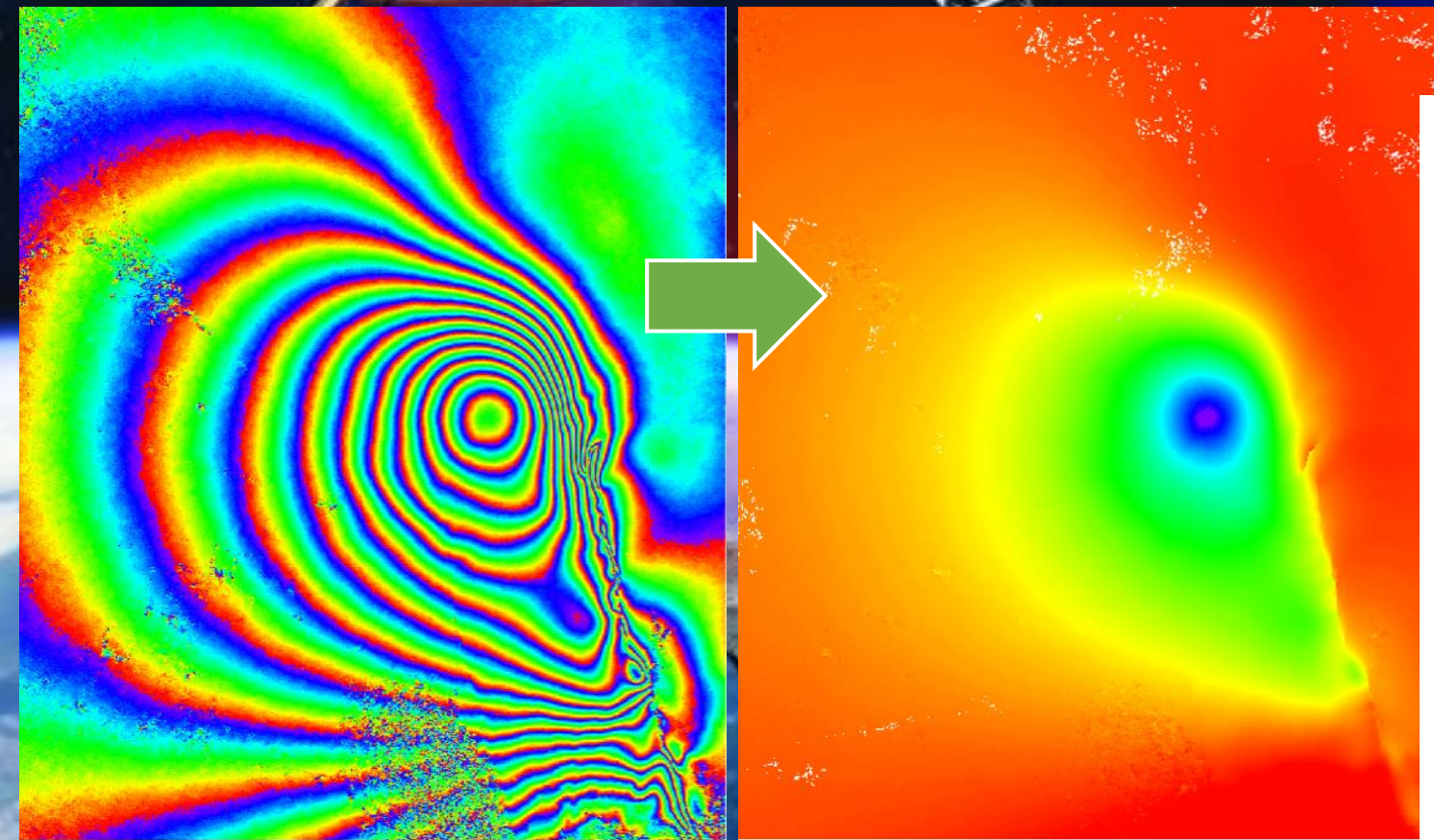
地形 形变 平地 大气 噪声



六、相位解缠绕

- 干涉相位的值域是固定在 $(-\pi, +\pi)$ 范围内的，这样的现象称为相位缠绕（相对相位），呈现在空间上就是连续的周期性条纹分布。
- 相位解缠绕的目的，是将缠绕的相位（相对相位）转为绝对相位，才能还原地物信息（地形或形变）。
- 相位解缠绕是InSAR的关键，直接决定结果的正确性和精度，为了提高相位解缠绕的准确度，通常需要先做多视和相位滤波

六、相位解缠绕



6.1 相位解缠绕 (干涉SAR→相位解缠)

最小统计费用流相位解缠

输入文件

干涉图

相干图

☐ 掩膜文件

影像解缠范围

距离向起始位置	<input type="text" value="1"/>	距离向列数	<input type="text" value="4640"/>
方位向起始位置	<input type="text" value="1"/>	方位向行数	<input type="text" value="3686"/>

解缠参考点偏移量

距离向	<input type="text" value="1"/>	距离向	<input type="text" value="1"/>
方位向	<input type="text" value="1"/>	方位向	<input type="text" value="1"/>

分块个数

输出文件

解缠相位

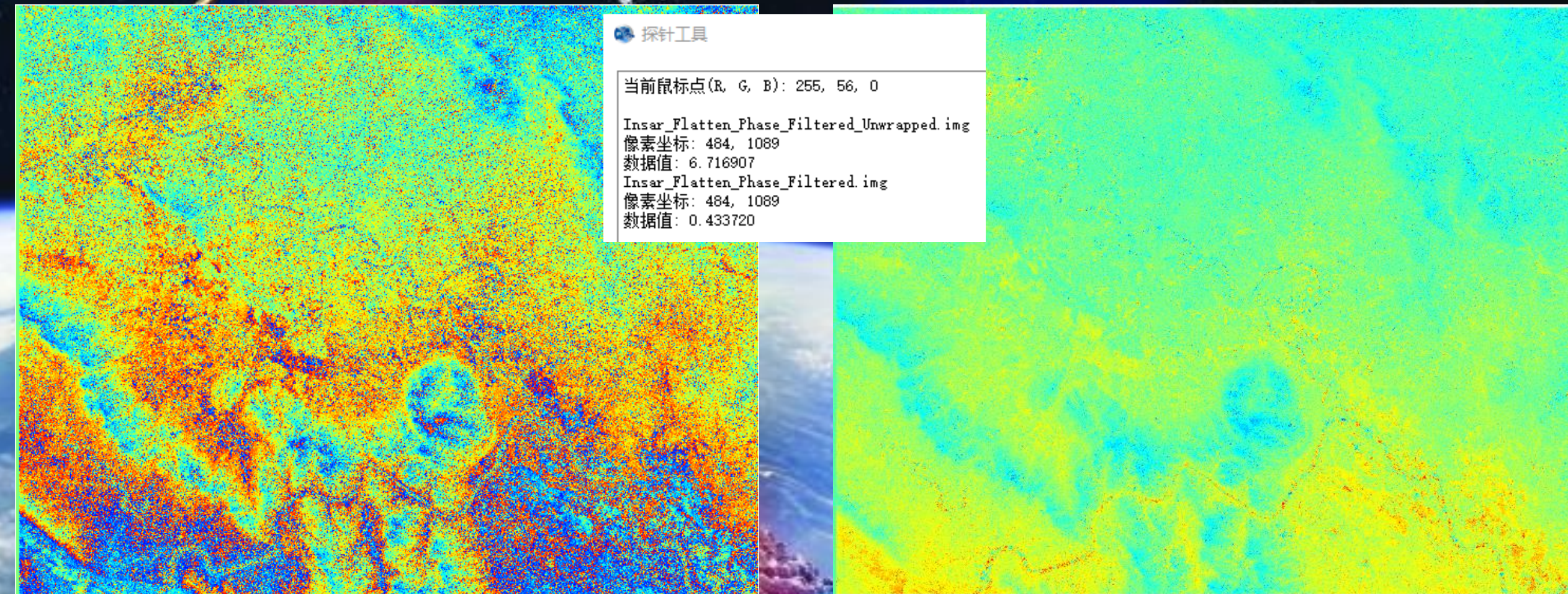
确认 取消

滤波后的干涉相位

通常不做分块处理

6.2 相位解缠绕前后对比

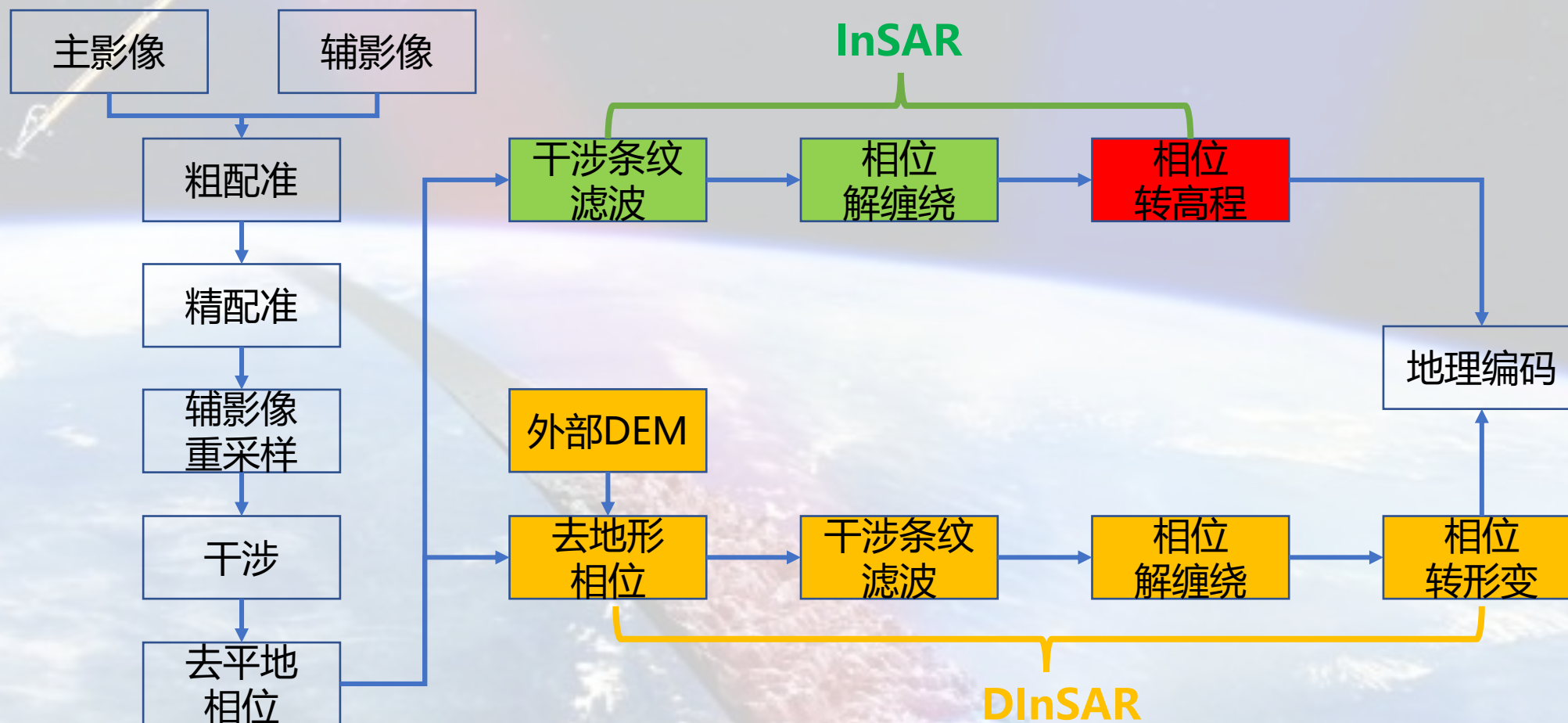
(解缠后干涉条纹消失，相位的空间变化不再是周期性而是连续性的，相位值域也不局限在 $[-\pi, \pi]$ 内)



七、基线精化和相位转高程

$$\varphi = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}}$$

地形 形变 平地 大气 噪声



7.1 基线精化

- 通过外部DEM辅助，在地形起伏不大的地区选择控制点，利用控制点所提取出的相位进行最小二乘拟合，精化基线向量。根据误差传播理论，微小的基线估计误差可能会导致 InSAR 在定位时产生上千倍的误差，而如果没有控制点的辅助，现有的轨道数据无法满足精密基线估计的要求。基线精估计利用控制点和粗基线生成的干涉条纹图来进一步精化基线。
- 这里的外部DEM是雷达坐标系（距离-多普勒坐标系），因此需要将DEM的地理坐标转为雷达坐标
- 坐标转换的过程由“查找表”实现，查找表记录了雷达坐标系下像元对应的地理坐标，是雷达坐标与地理坐标相互转换的重要依据，因此需要首先生成查找表。

7.2 通过地理编码生成查找表 (基础SAR→多视处理、地理编码)

- 地理编码的作用是将雷达坐标数据转为地理坐标，但在转换的过程中会生成查找表。
- 这里使用多视后的幅度图，并配合带有地理坐标的DEM作为辅助数据，以提高精度

多视后的
主影像幅度图

输入带有地理坐标
的外部DEM

可勾选模拟幅度图
以备后续使用

利用轨道信息和
外部DEM模拟的
SAR 幅度数据
(雷达坐标)

地理编码

待处理影像列表

序号	影像
1	G:\Guiping_alos1.1\insar\20070905_HH_MultiA

输入影像
删除
清空

☒ 采用优化系数

DEM文件 G:/Guiping_alos1.1/dem/dem.tif

地理编码类型

☒ 地形校正 ☐ 椭球校正

DEM外扩边界范围

外扩边界值 0.10 度

参数设置

平均高程 (米) 100.0

采样间隔 (像素) 10

输出分辨率

X方向 (北) 10 米

Y方向 (东) 10 米

输出坐标系

坐标系 WGS 84

重采样方法

重采样方法 最近邻

其他产品

☒ 模拟幅度图 ☐ 叠掩与阴影

☐ 投影角 ☐ 局部入射角

☐ 参考入射角

输出文件后缀

后缀 _GTC_Geocode

输出文件数据类型

数据类型 ENVI IMG (*.img)

输出目录 G:/Guiping_alos1.1/insar

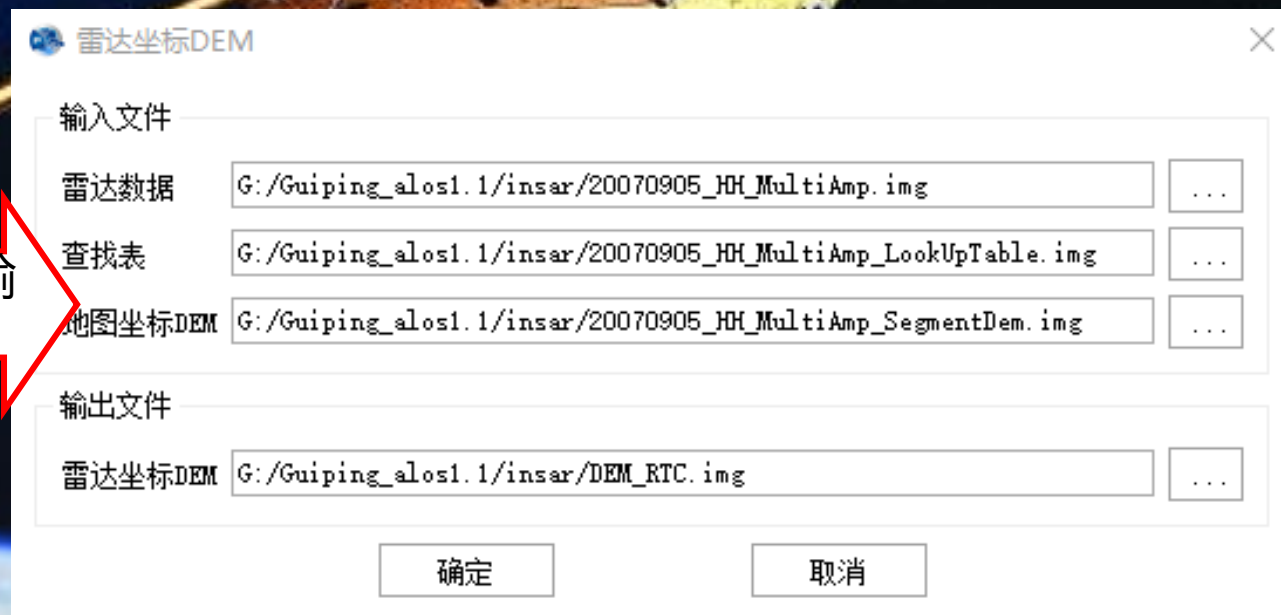
确定 取消

7.3 DEM地理坐标转雷达坐标 (干涉SAR→雷达坐标DEM)

➤注意：“地图坐标DEM”并非原始的DEM文件，而是经过地理编码后生成的

SegmentDEM，该DEM是地图投影坐标，且空间范围等于实际SAR影像的地理覆盖范围，并与查找表记录内容匹配

地图坐标DEM应输入SegmentDEM



雷达成DEM

输入文件

雷达数据 G:/Guiping_alos1.1/insar/20070905_HH_MultiAmp.img ...

查找表 G:/Guiping_alos1.1/insar/20070905_HH_MultiAmp_LookUpTable.img ...

地图坐标DEM G:/Guiping_alos1.1/insar/20070905_HH_MultiAmp_SegmentDem.img ...

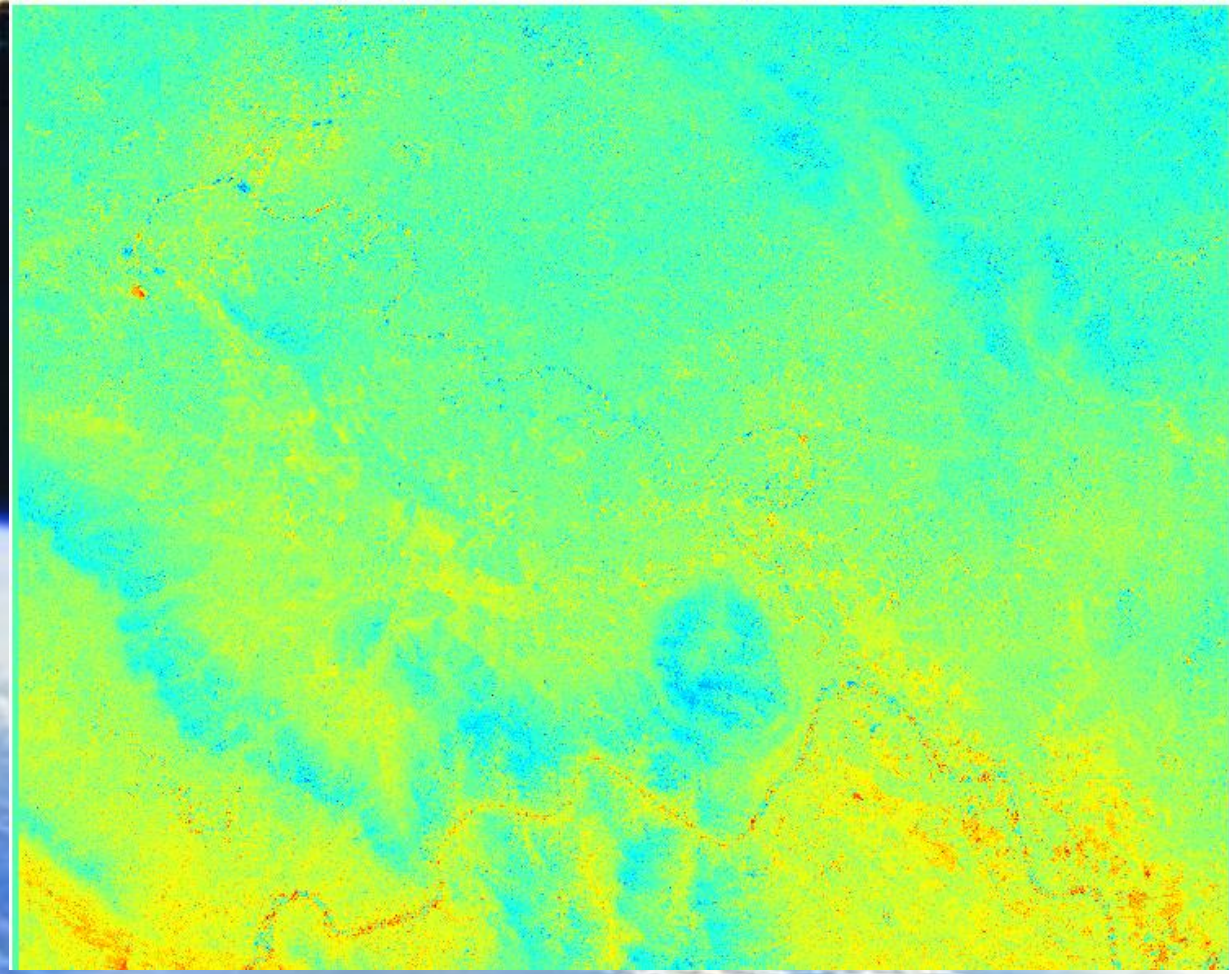
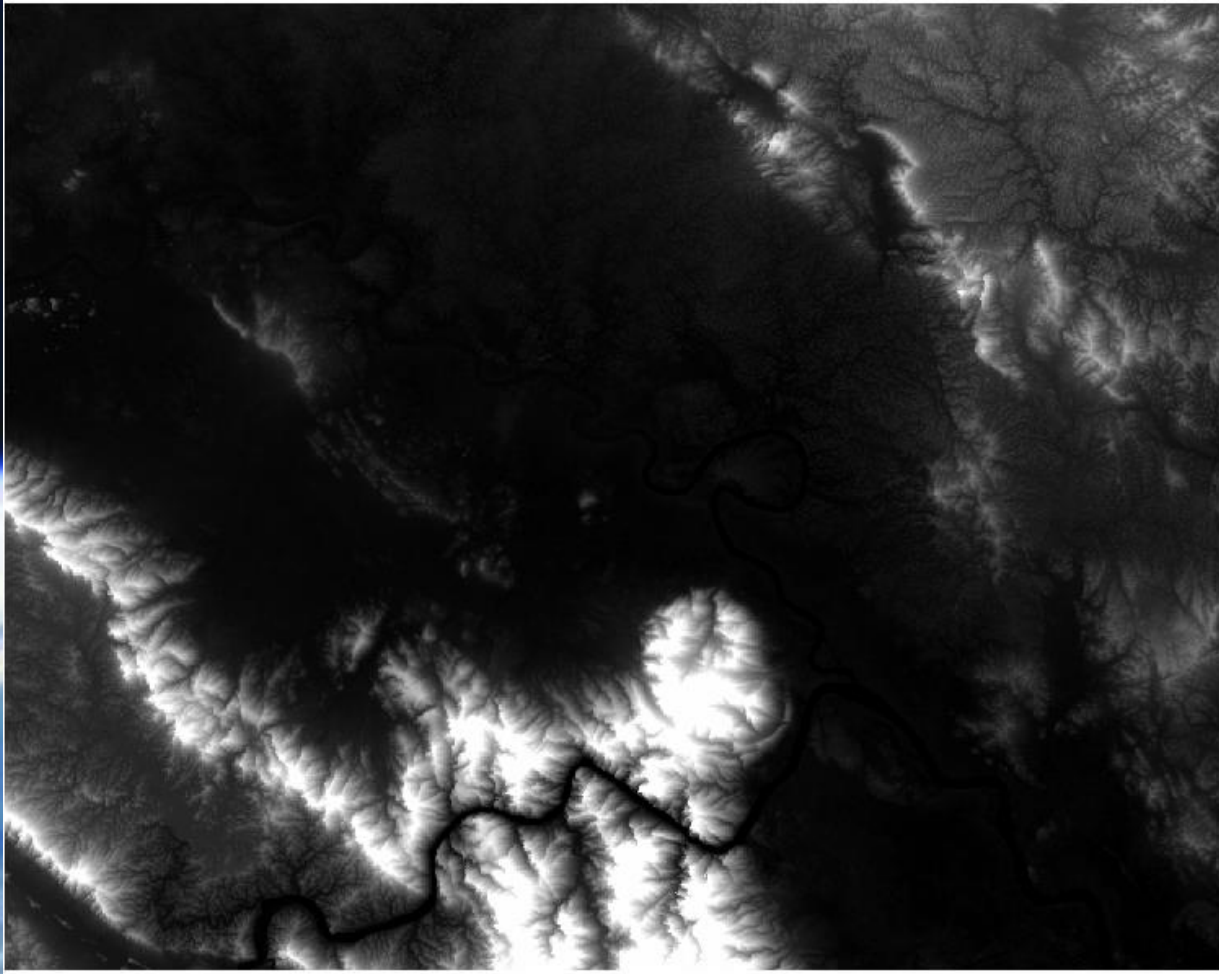
输出文件

雷达成DEM G:/Guiping_alos1.1/insar/DEM_RTC.img ...

确定 取消

7.3 DEM地理坐标转雷达坐标

(雷达坐标DEM与相位图具有相同的行列号，地形也完全匹配)



7.4 基线精估计

(干涉SAR→自动选择GCP、GCP解缠相位、基线精估计)

从雷达坐标DEM获取GCP

输入文件

雷达坐标DEM

偏移文件

☐ 掩膜文件

GCP个数

距离向 方位向

输出文件

GCP文件

确定 取消

GCP解缠相位

输入文件

解缠文件

GCP文件

输出文件

GCP解缠

确定 取消

2、提取GCP定位下的解缠后相位值

1、从雷达坐标DEM中自动生成控制点GCP

3、基线精估计 (基线文件会被更新覆盖)

基线精估计

主参数文件

偏移文件

解缠GCP文件

轨道模式

☒ 重复轨道 ☐ 螺旋卫星编队

基线文件

确定 取消

7.5 相位转高程DSM (干涉SAR→相位转高程)

将输出雷达坐标系下的
高程DSM

相位转高程

输入文件

单视主参数 ...

偏移文件 ...

基线文件 ...

解缠文件 ...

轨道模式

☒ 重复轨道 ☐ 螺旋卫星编队

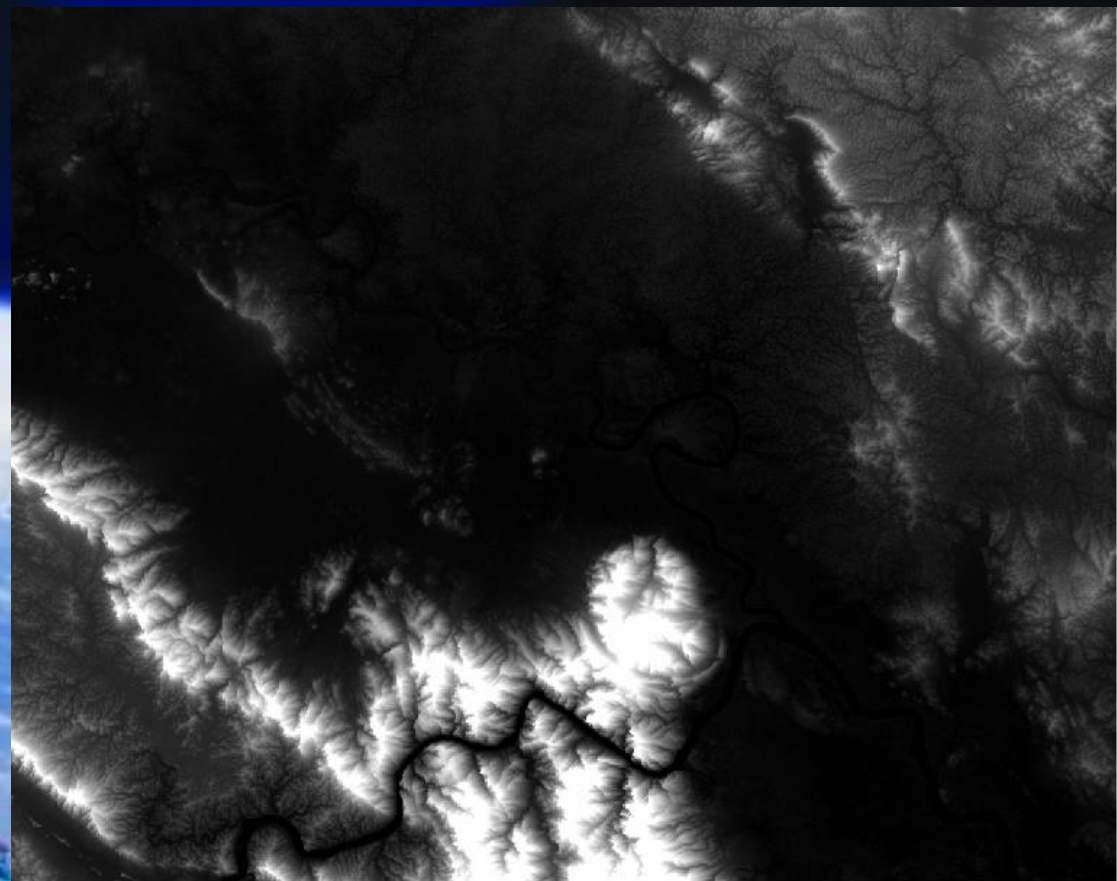
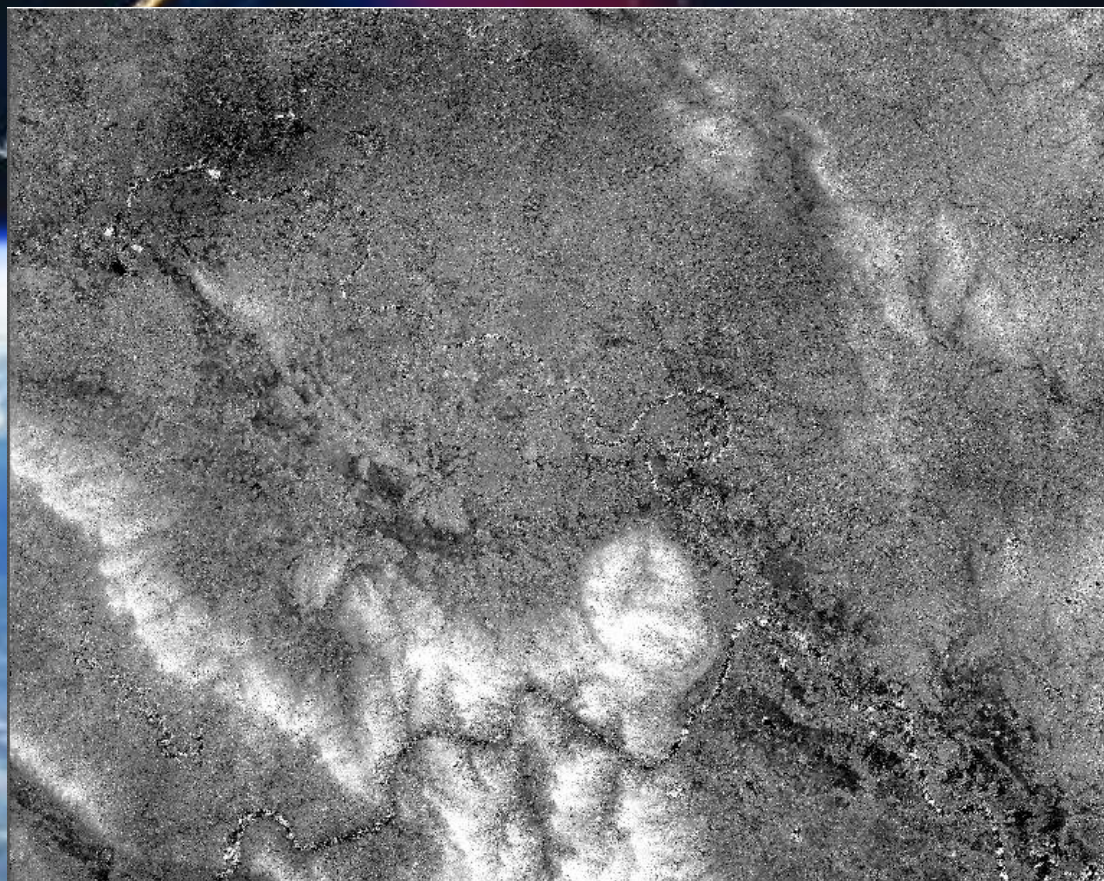
输出文件

高程文件 ...

确定 取消

7.5 相位转高程DSM

(与外部DEM做比较，地形起伏相吻合，但存在噪点和误差，这是由于重复轨道干涉下受大气延迟、基线估计误差和时间失相干等多方面影响造成的)



7.6 雷达坐标DSM转为地理坐标

(由于DSM产品缺少xml辅助文件，因此无法使用地理编码转换坐标，但可使用干涉SAR→坐标转换工具)

坐标转换

查找表 ...

雷达坐标文件 ...

地图坐标文件 ...

坐标转换格式

☒ 雷达坐标→地图坐标

☐ 地图坐标→雷达坐标

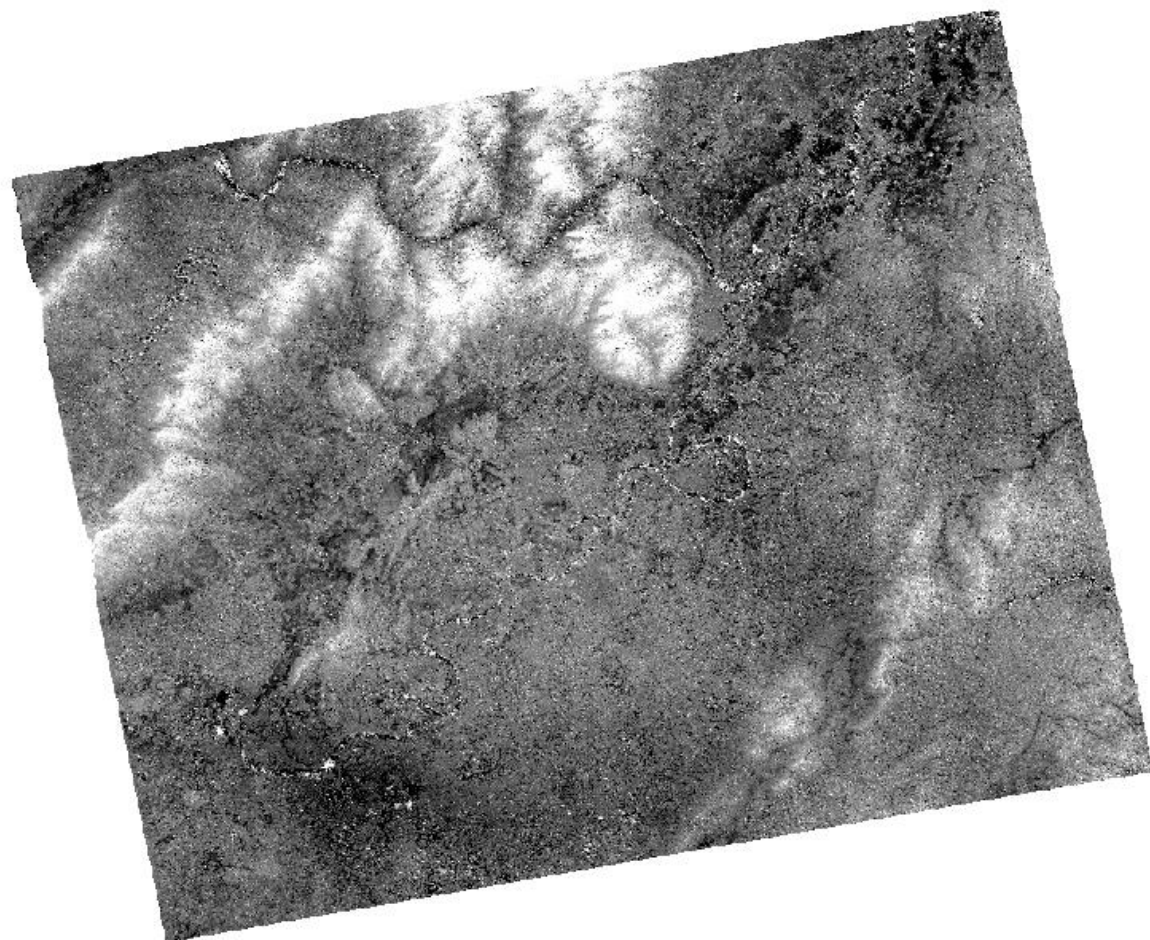
重采样方法

☐ 最临近 ☐ 线性

☒ 双线性

输出文件 ...

确定 取消



课后扩展练习

- 在目前InSAR提取高程的工作基础上，结合DInSAR原理和流程，进一步完成该区域地表形变提取及地理坐标转换
- 最终结果可能如下图所示，仅供参考

