A

GAMMA

——Remote Sensing

北京东方泰坦科技有限公司

加拿大阿波罗科技集团北京办事处

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

目　录

目　录 II
1　GAMMA 软件介绍 1
1.1　组件式 SAR 处理器（MSP） 1
1.2　干涉 SAR 处理器（ISP） 2
1.3　差分干涉和地理编码模块(DIFF&GEO) 2
1.4　土地利用工具（LAT） 3
1.5　地理编码模块（GEO） 3
1.6　干涉点目标分析（IPTA） 4
1.7　最近更新 4
1.8　维护和支持 5
2　GAMMA 组件式 SAR 处理器（MSP） 6
2.1　介绍 6
2.2　处理器概览 8
2.2.1　MSP 源程序 8
2.2.2　处理器输出的图形文件 11
2.3　处理器数据结构 12
2.3.1　SAR 传感器参数文件 12
2.3.2　单视复数据(SLC)和多视强度（MLI）图的文件格式 19
2.4　处理器程序 19
2.4.1　原始数据的转录 19
2.4.2　处理参数的生成 20
2.4.3　距离谱估计 21
2.4.4　缺失行的检测和校正 22
2.4.5　多普勒模糊度 22
2.4.6　多普勒中心估计的小数部分 24
2.4.7　JERS-1/PALSAR 无线电频率干扰（RFI）的估计 25
2.4.8　距离压缩/方位预滤波 25
2.4.9　方位向自动聚焦 26
2.4.10　方位压缩 27
2.4.11　多视处理和地距图像 28
3　GAMMA 干涉 SAR 处理器（ISP） 29
3.1　干涉纹图的计算 30
3.1.1　SLC 数据转录和处理参数的生成 30
3.1.2　图像配准和普通的带通滤波 30

3.1.3 干涉图的计算和平地相位的去除 31
3.2 相位解缠 31
3.3 生成高程图 32
3.4 正射校正 32
3.5 ISP 处理实例 32
4 GAMMA 差分干涉和地理编码软件（DIFF&GEO） 54
4.1 地理编码 54
4.1.1 地理编码的流程 55
4.1.2 地图投影和 DEM 的格式 56
4.1.3 GEC（椭球体校正）地理编码 57
4.1.4 提供地图坐标 DEM 的 GTC（地形校正）地理编码 58
4.1.5 基于干涉高程估计（SAR 坐标系下）的 GTC（地形校正）地理编码 59
4.1.6 地理编码查找表 59
4.1.7 前向转换 60
4.1.8 后向转换 61
4.1.9 地理编码查找表的逆变换 61
4.1.10 DEM 相关的产品 62
4.1.11 从 DEM 中模拟 SAR 强度图 63
4.2 多源图像配准 64
4.3 差分干涉 65
4.3.1 2 轨差分干涉 66
4.3.2 3 轨差分干涉 67
4.3.3 4 轨差分干涉 70
4.3.4 2 轨、3 轨、4 轨差分干涉的优缺点 71
4.3.5 复干涉图的联合分析 71
4.3.6 ASAR SCANSAR 干涉 73

1 GAMMA 软件介绍

GAMMA软件能够完成将SAR原始数据处理成数字高程模型、地表形变图、土地利用分类图等数字产品的整个过程。该软件可以分成如下几部分：

- 组件式的SAR处理器(MSP)；
- 干涉SAR处理器（ISP）；
- 差分干涉和地理编码（DIFF&GEO）；
- 土地利用工具（LAT）和干涉点目标分析（IPTA）。

除此之外，GEO软件包中还提供了图像的配准和地理编码功能。对于那些在不太稳定的机载遥感平台上获取的雷达数据，运动补偿软件包（MOCOM）中专门提供了一些高级的处理方法。每一个软件包都是组件式的，因此用户可以按自己喜欢的方式来使用。

该软件是用ANSI-C编写的。目前能够支持的系统有：

- Solaris操作系统UNIX工作站；
- LINUX系统的PC机（32位和6位处理器）；
- 使用NT操作系统和CYGWIN模拟技术的PC机。

软件能够处理以下星载或机载SAR数据：

- ERS-1/2
- JERS
- RADARSAT
- SIR-C
- ENVISAT ASAR

软件能够支持各不同的空间局获取的数据。主要处理过程中可以进行质量控制、中间或最终结果的显示，可生成SUN或BMP格式的图像文件。

1.1 组件式 SAR 处理器（MSP）

SAR处理器的几个主要组件是预处理、距离向压缩和方位向预处理（可选）、方位向压缩和多视后处理。在预处理步骤中，处理参数是从CEOS头文件中得到的。

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108 邮编：100083 电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073 手机：13366576603 联系人:牛晓杰 email:niuxj@otitan.com http://www.otitan.com

在距离向压缩过程中，为了生成快视图，数据可能在方位向上进行了采样。方位向处理使用的是距离-多普勒算法，在处理RADARSAT数据时，需要用到二次距离向迁移处理。用户可以选择输出图像的几何关系，方位向上是否进行去斜处理。自动聚焦算法可以调整沿轨方向平台的估计速度。被处理的图像经过了以下的辐射校正：天线方向图，雷达沿轨增益变化，距离向和方位向参考函数的长度，斜距向。ERS-1、ERS-2和JERS的绝对定标常数是由主动雷达发射接收器，和ESA、NASDA处理后的定标数据交叉定标后决定的。事实表明Gamma处理器在干涉过程中保留相位。多视图像是通过单视复图像样本时域平均得到的。处理的相关参数和数据特征都存储在一个文本文件中，该文本文件可以用一些商业软件打开。对于ERS-1/2 和ENVISAT ASAR数据，该软件支持精确轨道（“Delft”，RPC，DORIS），并且支持ASAR 交替极化（AP）原始数据的处理。对于某些机载SAR数据，该软件可提供高级运动补偿模块进行处理。

1.2 干涉 SAR 处理器（ISP）

Gamma干涉SAR处理器（ISP）包含了生成干涉纹图、高程和相干系数图的一系列算法。处理步骤包括：从轨道数据中估计基线，干涉图像对的精确配准，干涉纹图的生成（包括普通的光谱带通滤波），干涉图相干系数的估计，去除平地相位，干涉纹图的自适应滤波，使用枝切法或基于不规则三角网的最小代价优化算法进行相位解缠，从地面控制点估计干涉基线的精度，生成数字高程，高程和坡度图的校正和插值 。ISP支持ESA PAF处理的SLC和PRI数据的绝对辐射定标，同时也支持从SLC图像对开始的偏移跟踪技术。ISP同时也是差分干涉软件的基础平台。

1.3 差分干涉和地理编码模块(DIFF&GEO)

差分干涉模块(DIFF&GEO)在分离地形和位移的影响时非常灵活。如果你从其他的渠道获得了DEM，可以使用这个模块模拟一个干涉纹图，减去这个干涉纹图就可以消除地形相位的影响（这是这种情况下最好的解决方案）。模拟干涉纹图和真实干涉纹图之间的精确配准（例如由于轨道数据的不确定性）可以自动完成。其他不需要DEM的方法有3轨或4轨干涉。在这种情况下，干涉纹图，最好是没有差分效应的干涉纹图，作为参考，减去地形相位的影响，但是必须解缠作为参考的干涉纹图（在陡峭地形区域，或者森林、水体这些低相干值的地方需要设置一些限制性条件）。

（两幅干涉纹图之间）相位的最优缩放比例可以从基线的比值上估计出来。但是，

实际的情况是基线也许并不是足够准确的，所以，我们设置了最优缩放比例这个参数。该参数的设置是基于参考干涉纹图和实际干涉纹图之间的差分效果，从而得到一个最优匹配的值。该功能在特定情况下给计算结果的优化提供了非常灵活的手段。

而且，DIFF&GEO软件包提供一套完整的程序集用于精确的地理编码，支持从距离多普勒坐标系到地图坐标系，或者从地图坐标系到距离多普勒坐标系的地形和椭球体校正和地理编码。重采样步骤中可以使用不同的插值算法。由于轨道信息的不确定性，地理编码需要一个精确的配准步骤。为了实现该步骤的自动化处理，可以（基于DEM）模拟一幅SAR图像，使用交叉相关分析的方法进行自动精确配准。DIFF&GEO软件包同时支持地距图像的地理编码。

DIFF&GEO模块支持SLC数据在考虑地形效应情况下的配准，还支持从检测图像开始的位移跟踪技术。

1.4 土地利用工具（LAT）

土地利用工具包支持滤波、参数提取、简单分类、镶嵌和附加的数据显示工具。滤波工具包括空间滤波（均值滤波、中值滤波、Frost滤波、Lee滤波、增强Lee滤波、Gamma 映射滤波）和多时相滤波（基于Quegan et al）。LAT能够提取和分析特定多边形和线性数据（均值、标准方差、直方图），包含了自适应相干、纹理和有效视数估计程序以及其他一些简单的图像数据运算程序。基于一个或几个配准好的输入数据集，使用分级阈值方法可以将单个或多个类分离出来。在地图几何空间中，LAT支持多个数据集的镶嵌。同时，LAT包含了生成RGB和IHS组分的工具，以及交换两幅图像强度图的工具。

1.5 地理编码模块（GEO）

在独立的GEO模块中可以找到SAR数据地理编码和图像配准功能。这个模块对于那些需要进行高级SAR图像地理编码和图像配准的用户非常有用，但是在干涉分析中并不需要该模块。

该模块支持从距离多普勒坐标系到地图坐标系，或者从地图坐标系到距离多普勒坐标系的地形和椭球体校正和地理编码。重采样步骤中可以使用不同的插值算法。由于轨道信息的不确定性，地理编码需要一个精确的配准步骤。为了实现配准步骤的自动化处理，可以（基于DEM）模拟一幅SAR图像，使用交叉相关分析的方法进行自动地精确配准。同时支持地距图像的地理编码、SAR图像的配准。ISP和DIFF&GEO

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

中完全包含了GEO的功能。

1.6 干涉点目标分析（IPTA）

该模块不是针对一系列干涉纹图进行完整的二维分析，而是仅仅针对选中的目标点的相位进行分析。对应于点目标的象素点上并不像面目标那样会产生去相关效应，因此，对于那些超过临界基线距的图像对也可以分析它们的干涉相位。最终使得更为完整的SAR数据解译成为可能。由于该分析能够包含更多的干涉图像对，因此提高了分析的精度和时相覆盖范围。

一个典型的IPTA处理步骤是这样的：首先，配准多幅重复轨道SLC图像。其次，点目标的确认，这是一个非常重要的步骤。进一步就是分析选中的点目标的干涉相位。描述干涉相位与系统和目标参数之间的依赖关系的物理模型，与传统的干涉分析中使用的模型是一致的。为了从多时相数据集中获取最佳的信息，引入了循环的概念。并且，改进了一些参数，如散射体的地形高度、形变、大气路径延迟和基线等。根据不同的空间、时间和基线依赖性将不同的相位术语分类，譬如，大气相位延迟在空间维上相对平滑，但在时间维上是不相关的。地形相位和垂直基线间显示出了一种线性关系。很多情况下，形变在空间维和时间维上都认为是相对平滑的。

从IPTA得到的主要结果有地形高度、平均形变速率、形变历史和相对大气路径延迟。

IPTA和其他的GAMMA软件完全兼容。它包含了IPTA中使用的矢量数据和普通的2维栅格数据格式之间的转换程序。为了更方便地使用IPTA，要求必须有GAMMA ISP模块和DIFF&GEO模块。

1.7 最近更新

最近的更新包括：

－GEO单独模块

－ENVISAT ASAR改进

－新的IPTA模块

－增强的偏移跟踪功能

－考虑地形高度效应的SLC配准

ALOS PALSAR

在不久的将来，该软件将会提供ALOS PALSAR数据的处理功能（该功能是按

照正常更新的方式提供给用户的，以作为我们软件维护的一部分，也就是说，如果你现在购买了我们这套软件，那么在未来一年的软件维护时间内，ALOS PALSAR更新将作为购买的一部分免费提供）。

1.8 维护和支持

Gamma在自己的研究和开发过程中也在使用自己的软件，意味着该软件随着国际最新进展一直处于更新状态。软件支持中你所联系的都是这样一些人，他们或是软件的开发人员，或是在工作中经常使用该软件的人员。

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083 电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

2 GAMMA 组件式 SAR 处理器（MSP）

2.1 介绍

MSP 是从机载或星载的原始 SAR 信号中得到合成孔径雷达图像的系统。总的来说，该系统的设计思想是：在得到准确的处理结果的前提下，也能够在合理的时间内用工作站计算机来处理信号数据。处理器主要由一系列 ANSI-C 程序组成，之所以选择 ANSI-C 语言的主要原因是它在处理大数据集时的可移植性和高效性。MSP 可在 UNIX 操作系统下的 SUN/HP/DEC/SGI 工作站上运行，也可以在 PC 机的 LINUX 和 Windows NT/2000/XP 操作系统下运行。MSP 处理过程的相关参数和数据特征保存为文本文件，使用简单的语句来描述系统参考信息，这与多数 SAR 数据产品所涉及的难于解译和 CEOS 格式的不同形成了鲜明的对比。

这本手册首先概述了 SAR 处理的主要步骤，然后详细描述了 MSP 系统中的每一个函数。到现在为止，MSP 能够处理的数据包括：Dornier DOSAR 雷达，DLR 的 ESAR, Envisat ASAR, ERS-1, ERS-2, JERS-1, Radarsat 和 SIR-C。
这些机载雷达系统都工作在 5km 以下的高度，速度大约为 80m/s。ESAR 系统工作在 X-、C-和 L 波段（分别是 9.6、5.3 和 1.3 GHz）。DOSAR 系统工作在 Ka-、X-和 C 波段（分别是 35.0、9.5 和 5.3 GHz）。

Envisat ASAR 是多模式 C 波段雷达。MSP 支持它的 IS1 到 IS7 条带图像模式的数据处理。该雷达系统从 2002 年 4 月开始运行，目前仍在运行当中。它的数据以特定格式存储在 CDROM 中，可以使用程序 ASAR_IM_proc.c 将它转换成 MSP 能够处理的数据格式。

欧空局的 ERS1 和 ERS2 具有相同的 C 波段 SAR 设备，分别于 1991 年和 1995 年发射运行。

SIR-C 在 1994 年工作了两次，间隔为 6 个月，采集了地球上很多区域的 C 波段和 L 波段的极化雷达数据。两次工作中也采集了部分干涉雷达数据。

JERS-1 是 NASDA（现在叫 JAXA）研制的 L 波段传感器，工作时间是从 1992 年到 1998 年。PALSAR 是 JAXA 研制的 L 波段多模式 SAR，于 2006 年 1 月 19 日发射。

这些雷达以一定的速率发射脉冲（脉冲重复频率 PRF），接收到的回波经过数字化，或者记录到随机携带的高速数字磁带记录器上，或者是转发到地面上，从而复制到磁带上。这些数据后来转录到与计算机兼容的介质上，如 8mm Extrabyte 磁带或者能够为 SAR 处理工作站读取的 CD-ROM 上。MSP 从这些原始的信号数据计算得到距离/多普勒坐标系下的单视复数据（SLC）和多视强度图。

图像分辨率和坐标系

雷达图像是一个地区的三维反射率投影在二维平面上的结果。目标距离由所发射的带宽为 BW 线性调频脉冲，以及随后的决定斜距向分辨率的脉冲压缩决定：

（1） *delta_range* =C/(2*BW).

比如，ERS-1 名义上的调频带宽是 15.55MHz，所以，斜距向的分辨率是 9.6 米。

相位信息由散射体通过天线波束时，该散射体的多普勒历史的匹配滤波器决定。一般情况下，Doppler 频率都通过零点。与距离向上的脉冲调制相似，一个点的多普勒历史近似于线性 FM 脉冲。记录 Doppler 历史要求雷达时相干的，这意味着它需要记录每个样本回波的幅度和相位信息。数据可以采样成 IQ 样本（同相/正交 复数），也可以采样成偏置视频（实数）样本。

SAR 的方位向分辨率与距离无关，因为当散射体通过天线波束时，多普勒历史的持续时间随着距离的增加呈线性增加的趋势。由于多普勒频率分辨率反比于多普勒历史持续的时间，角分辨率随着距离的增加线性增高，所以，方位向空间分辨率与距离无关。SAR 天线沿轨的长度决定了它的波束宽度，也就决定了记录的多普勒历史的持续时间。这就推导出一个看似自相矛盾的论点，就是 SAR 的分辨率随着天线沿轨长度的减少而增加。SAR 名义上的单视方位向分辨率为：

（2） *delta_az* ＝ L/2

这里，L 是 SAR 天线方位向上的长度。

图像是以雷达系统的自然坐标显示的：斜距（雷达与天线波束所指的方向上的距离）和与 SAR 平台的沿轨速度矢量平行的方向。用户可以选择输出是否去斜。去斜图像是投影在没有斜视（零多普勒频率）的雷达获取坐标系上。在不同多普勒中心获取的图像进行镶嵌时，去斜处理具有一定的优势。用于干涉应用的 SAR 数据的处理最好不要进行去斜处理，这样的话，特定距离线上的所有样本的基线都是一样的。

在雷达沿着飞行路径进行飞行的时候，都会发射和接收脉冲，方位多普勒谱都是以脉冲重复频率（PRF）进行采样的。由于各种原因，如定位信息不准确，风（对于机载的情况）或者其他电子或机械的因素，会导致侧视天线波束的中心并不是正好沿着雷达的飞行轨道。天线波束中心的点的多普勒频率正好是多普勒中心。地面上点的多普勒历史的匹配滤波需要有关距离和雷达平台速度的精确信息。只有通过这种方法才能正确聚焦处理后的图像。沿轨方向上的速度和加速度的误差将会导致图像的模糊。名义上说，雷达并不是沿着直线飞行的。高效的方位处理方法要求飞行轨道是光滑的曲线，在我们这种情况下，使用的是平行于一个近似于地面的球面的曲线。

偏离该光滑曲线，这种情况常见于机载 SAR 系统中，将会导致严重的散焦情况。

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

为了克服这种情况，需要惯性导航系统（IMU）来精确测量飞机的运动情况。通过处理这些数据可以获得准确的雷达天线位置和速度，这些位置和速度是雷达参考相位的中心。假如飞机确实沿着名义轨道飞行，那么，为了获得天线位置和速度实际值的近似，天线与名义上的参考轨道的偏移量可以用来估计天线位置和速度在相位和幅度上的校正量。这就是 SAR 数据的运动补偿。

MSP 用户可以选择输出的 SAR 图像是否经过去斜处理。去斜后的数据是以 0 多普勒为参考的，这就意味着该图像是在雷达沿着飞行轨道速度矢量方向上飞行时获得的图像。图像强度与地面的后向散射成正比的。从 MSP 中得到的 SLC 产品具有干涉应用中所必须的高的相位精度。

相干斑点噪声是 SAR 图像所固有的特征。相干斑点噪声来源于雷达分辨率单元不同部分的后向散射信号的相干干扰。该噪声可以通过同一个场景下、统计独立的不同图像的非相干求和进行抑制。从不同的多普勒带中得到的图像相互间都是独立的，因为它们是以不同的方位角来观测该场景的。可以通过象元的非相干空间平均的方法进一步压制斑点噪声，但是，这是以牺牲空间分辨率为代价的。

2.2 处理器概览

通过概览 MSP 中 SAR 的处理过程，我们将会知道 MSP 是如何运行的。不同的模块所使用的参数保存在 I 外部的 ASCII 文件中，该 ASCII 文件可以用任何传统的文本编辑器进行编辑。实际上，这些参数是保存在数据结构中的。有两个最重要的数据结构，它们是 SAR 和 PROC 结构，这两个数据结构分别说明特定传感器和特定场景的处理参数。可以初始化这些结构，使用 MSP 程序 *create_sar_par* 和 *create_proc_par* 进行更新，这两个程序生成的文件叫做 SAR 传感器参数文件和 MSP 处理参数文件。对于某些 MSP 程序，处理参数文件中的某些参数可以通过命令行输入进行更新。

2.2.1 MSP 源程序

以下列出了 MSP 中的处理程序：

程 序	功 能
autof	自动聚焦，估计雷达有效沿轨速度，求解多普勒模糊度
az_proc	使用距离/多普勒方法，方位压缩那些已经经过距离压缩的数据

azsp_IQ	估计原始的 IQ 复 SAR 数据的方位谱，估计多普勒中心
azsp_SLC	估计 SLC 数据的方位谱，估计多普勒中心
create_proc_par	使用用户选择的参数，创建/编辑处理参数文件
create_sar_par	使用用户选择的参数，创建/编辑 SAR 传感器参数文件
DELFT_orb	使用 DELFT 包中的程序 *getorb* 生成 DELFT ERS-1 和 ERS-2 的状态矢量
DELFT_proc	从 *getorb* 生成的 DELFT 状态矢量中计算 ERS-1 和 ERS-2 的 MSP 状态矢量
dop_ambig	使用 MLCC 或 MLBC 算法获得中心条带的多普勒中心的模糊估计，用于多普勒模糊度的计算
dop_mlcc	使用 MLCC 算法得到多普勒中心的模糊估计
dop_interf	计算一个多普勒函数用于提高不同多普勒中心获取的图像间的相关系数
doppler	对于 IQ 格式的 SAR 数据，使用方位向行对行的交叉相关算法，估计多普勒和斜距之间的函数关系
doppler_2d	使用交叉相关算法，估计 2-D 多普勒 *fd（r，t）*和距离、方位向的函数关系： ***fd(r, t) = a0 + b0*t + c0*t**2 + (a1 + b1*t)r + a2*r**2***
doppler_real	对于偏置视频 SAR 数据（SIR-C）,使用行对行交叉相关的方法，估计多普勒和斜距向的函数关系
ERS_fix	用于检测和替换 ERS 数据中缺失的行，也用于连接原始 ERS 数据文件
ERS_proc_*	读取不同地面站（PAF）的 CEOS 头文件

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

extract_psd	从一系列 JERS-1 和 PALSAR 距离谱中提取距离谱，该距离谱是由 *rspec_JERS* 计算得到的
hist_IQ	用 *xmgrace* 或 *gnuplot* 绘图生成原始数据的直方图,输出为 ascii 文件，
JERS_fix	连接和距离重整 NASDA JERS-1 原始数据文件
JERS_proc	从 JERS-1 的 CEOS 头文件（NASDA 格式）中创建 MSP 处理参数文件
multi_SLC	从 SLC 图像中计算多视强度图像
PALSAR_proc	从 PALSAR 的 CEOS 头文件（JAXA 格式）中创建 MSP 处理参数文件，预处理原始数据，包括距离重整
prefilt	对于距离压缩 SAR 数据进行方位向带通滤波和采样
pre_rc	对 ERS 数据，进行距离压缩，以及方位向预滤波/采样原始的 IQ SAR 数据（可选）
pre_rc_JERS	对于 ERS-1 和 PALSAR 原始数据，进行距离压缩，方位向预滤波/采样（可选）
pre_rc_RSAT	距离压缩和方位预滤波/采样（可选）Radarsat 条带模式数据，包括二次距离迁移的校正
ptarg	点目标分析程序
rc_real	距离压缩偏置视频 SAR 数据，如 SIR-C
rspec_IQ	IQ SAR 数据的距离谱的计算
rspec_real	计算偏置视频（实数）SAR 数据的距离谱
rspec_JERS	JERS 原始数据的距离谱计算，用于无线电频率干扰（RFI 抑制）
RSAT_lks	从 SLC 数据中通过方位向上的带通滤波计算多视强度图，只针对 Radarsat 标准波束条带数据

SIRC_proc	通过读取 JPL 或者 USGS EROS 数据中心（EDC）生成的 SIR-C 产品的头文件，创建 MSP 处理参数文件
swap_bytes	为了解决机器间的兼容性问题，交换数据文件的字节（作为 DISP 包的一部分）
swap_IQ	交换原始 SAR 数据的 I、Q 通道
DISP_lib.c	读/写 SUN 栅格和 BMP 格式图像文件的子程序包
MSP_io.c	读/写和显示 MSP 参数文件的子程序包
MSP_lib.c	MSP 中插值和估计的子程序包
SWAP_io.c	为了读/写不同平台（big and little endian）上的数据而进行字节互换的子程序包

2.2.2 处理器输出的图形文件

MSP 生成一些辅助的数据文件。*.out 文件是程序运行时输出的 ASCII 列表，包含了许多不同的信息和执行时间。*.dat 文件是一个 ASCII 文件，包含了方位谱数据，距离向调频信号的信息，插值器和运动数据。可以使用免费软件 *xmgrace* 和 *gnuplot* 生成这些数据的图形，存为 postscript 格式（*.ps 或*.eps）。

文件后缀	内 容
*.mlcc	多视交叉相关系数，由程序 *dop_ambig* 生成
*.auto	自动聚焦相关系数函数
*.azsp	方位谱
*.dop	作为距离的函数的多普勒中心
*.state	状态矢量图（速度,位置）

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108 邮编：100083 电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073 手机：13366576603 联系人:牛晓杰 email:niuxj@otitan.com http://www.otitan.com

2.3 处理器数据结构

处理器存储着处理的参数。多普勒参数保存在处理器但是文件结构中。SAR 系统参数通过 SAR 结构进行传递，SAR 结构在绝大多数处理模块中都有使用，它记录在 *typedef_MSP.h* 中，所有的 MSP C 程序都可以共享。

输入到处理器中的数据文件是复原始 SAR 数据，每个样本占用 8 个字节的复数。SAR 数据的记录结构在 SAR 传感器参数文件中进行了描述。记录的信息包括每个记录的字节数，样本/记录的数目，以及每个记录头的字节数。输出图像是一个 32 位的浮点型数据，或以复数对来表示，或是单值的强度图。

SAR 传感器参数文件和 MSP 处理参数文件中包含了处理器的参数和处理器操作的命令，它们是简单的 ASCII 字符文件，在需要的时候，处理器中的每个程序都可以读取它们。使用关键字来定义和记录这些参数值，也可以添加说明和单位信息。下表列出了每个文件中的函数的说明：

文 件	描 述
SAR 传感器参数文件	包含了用于定义 SAR 传感器的一些特征。这些参数定义了线性调频脉冲和接收器的特征，ADC 配置，原始数据的结构，以及天线方向图。
MSP 处理参数文件	包含了控制处理器操作的参数。这些参数包括处理的数据量，输出数据的格式，距离和方位向分辨率，多普勒和多普勒速率多项式，平台位置和速度，多视参数，以及图像的维数。

2.3.1 SAR 传感器参数文件

SAR 传感器参数文件中以 ASCII 文本的格式给出了处理器所使用的 SAR 传感器参数。SAR 传感器参数文件的格式在 MSP 参考手册中或在程序代码的数据结构中有详细的说明。典型的传感器参数文件如下表所示。

格式和定义

格式在 MSP 类型定义文件 *typedef_MSP.h* 中进行了定义。

参数关键字	描述
title	参数文件的 ascii 文本描述
sensor_name	传感器名称(SIR-C, ERS1, ERS2, JERS1, PALSAR ...)
chirp_direction	线性调频信号方向的标志值: (UP_CHIRP, DOWN_CHIRP)
receiver_adc_mode	接收器 ADC 模式：(REAL, IQ), REAL 表示偏置视频的采样，IQ 是同相/正交 ADC 采样，2 个样本/点
sample_type	样本类型（FLOAT, BYTE), FLOAT 是 4 字节/值，BYTE 是无符号字符型，1 字节/值
receiver_spectrum_type	SAR 接收机频谱：(NORMAL, INVERT),逆频谱是由高于调频信号谱的接收机 L.O.频率引起的
SAR_center_frequency	雷达的载频（Hz）
chirp_bandwidth	调频信号的带宽（Hz）
chirp_duration	调频信号持续时间(sec)
ADC_sampling_frequency	距离采样频率(Hz)
file_header_size	SAR 原始数据文件头的大小（字节）
record_header_size	记录的头的大小（字节）
samples_per_record	样本数/记录（IQ 数据对）
record_length	记录（行）的长度（字节）
antenna_azimuth_3dB_beamwidth	方位向天线的 3dB（1/2 强度）带宽(十进制的)

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108 邮编：100083 电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073 手机：13366576603 联系人:牛晓杰 email:niuxj@otitan.com http://www.otitan.com

antenna_range_3dB_beamwidth	距离向天线的 3dB（1/2 强度）带宽(十进制的)
nominal_antenna_azimuth_angle	方位向天线名义上的张角（右侧视 SAR 90.0，左侧视 －90.0）
nominal_antenna_look_angle	天线名义上的视角
nominal_platform_pitch_angle	平台名义上的偏航角
antenna_pattern_filename	天线方向图的文件名（不是以 dB 为单位）

SAR 处理器使用的参数存储在 MSP 处理参赛文件中。MSP 处理参数文件的格式和定义在参考手册和文件 *typedef_MS.h* 的相应数据结构定义中有详细描述。每一个参数前面是它的关键字说明。以下给出了一些参数和定义的列表：

格式和定义

格式在 MSP 类型定义文件 typedef_MSP.h 中进行了定义。

参数关键字	描　述
title:	场景和处理参数的标题
date:	日期 DD MMM YYYY
raw_data_start_time:	信号数据文件中的第一行记录的时间(HH MM SS.SSSS)
channel/mode:	将要处理的极化/通道{HH, HV, VH, VV, CH1, CH2}
scene_center_latitude:	场景中心的纬度（十进制）
scene_center_longitude:	场景中心的经度（十进制）
track_angle:	飞行路径的角度（度）
platform_altitude:	高于大地水准面的高度（米）

terrain_height:	高于大地水准面的平均地形高程（米）
sensor_position_vector:	在预滤波数据中心的平台的(x,y,z)位置(米)
sensor_velocity_vector:	在预滤波数据中心的 SAR 平台的速度(米/秒)
sensor_acceleration_vector:	在预滤波数据中心的 SAR 平台的加速度（米/秒^2）
pulse_repetition_frequency:	雷达脉冲重复频率（脉冲/秒）
I_bias:	原始数据 I 值的平均 DC 偏移量
Q_bias:	原始数据 Q 值的平均 DC 偏移量（对于偏置视频原始 SAR 数据设置成 0）
I_sigma:	原始数据 I 值的标志方差
Q_sigma:	原始数据 Q 值的标志方差(对于偏置视频原始 SAR 数据设置成 0）
Q_corr:	I、Q 通道归一化的相关系数（对于偏置视频原始 SAR 数据设置成 0）
DAR_Doppler:	多普勒中心的准确估计用于计算多普勒模糊
DAR_snr:	准确的多普勒估计的信噪比
doppler_polynomial:	多普勒频率 *fd*，是斜距 *r* 和相对于原始数据中心的方位向时间 t 的函数，多项式系数是 ***a0,a1,a2,*** ***fd(r, t) = a0 + b0*t + c0*t**2 + (a1 + b1*t)r + a2*r**2***
doppler_poly_dot:	多普勒相对于方位时间和斜距 ***b0,b1*** 的一阶

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

	倒数的系数
doppler_poly_ddot:	多普勒相对于方位时间和斜距 ***c0***的二阶倒数
echo_time_delay:	脉冲发射和第一次接收到的回波之间的时间延迟（秒）
receiver_gain:	接收机衰减增益（dB）
calibration_gain:	为了获得相对或者决定后向散射系数而使用的定标比例因子 (dB)
near_range_raw:	原始 SAR 数据的第一列斜距数据
center_range_raw:	原始 SAR 数据的中心列斜距数据
far_range_raw:	原始 SAR 数据的最后一列斜距数据
near_range_slc:	输出影像的第一列斜距数据
center_range_slc:	输出影像的中心列斜距数据
far_range_slc:	输出影像的最后一列斜距数据
range_pixel_spacing:	斜距图像象元采样分辨率(米)
range_resolution:	斜距图像分辨率(米)
secondary_range_migration:	二次距离迁移（ON, OFF）(缺省 = OFF)
azimuth_deskew:	SLC 数据的方位向去斜处理(ON, OFF) (缺省 = ON)
autofocus_snr:	自动聚焦算法的信噪比，SNR 小于 1。5 意味着聚焦失败
azimuth_bandwidth_fraction:	处理的多普勒带宽的百分比（0 --> 1.0, 缺省=0.8)

azimuth_presum_factor:	方位预滤波采样因子(对于 4:1 采样也就是4)
total_raw_echoes:	SAR 信号数据文件中原始数据的总数
offset_to_first_echo_to_process:	SAR 信号数据文件中，回波相对于开始的偏移量
echoes_to_process:	处理的回波的数目
range_offset:	相对于第一个距离样本的偏移量（样本），每个 I/Q 对作为 1 个样本
raw_range_samples:	要处理的原始 SAR 回波样本的数目
near_range_extension:	在近距向每列的样本数（损失了分辨率）
far_range_extenstion:	在远距向每列的样本数（损失了分辨率）
range_looks:	距离向的视数
azimuth_looks:	方位向的视数
azimuth_offset:	图像的第一列与预滤波数据第一列之间在方位向的偏移量
azimuth_pixel_spacing:	方位向图像象元的空间采样分辨率(米)
azimuth_resolution:	方位向图像分辨率(米)
range_pixels:	距离向图像的大小
image_format:	图像的数据格式：FCOMPLEX, SCOMPLEX, FLOAT, SHORT, BYTE
azimuth_pixels:	方位向图像的大小
sensor_latitude:	图像中心 SAR 传感器的纬度（度）

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108 邮编：100083 电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073 手机：13366576603 联系人:牛晓杰 email:niuxj@otitan.com http://www.otitan.com

sensor_longitude:	图像中心 SAR 传感器的经度（度）
sensor_track_angle:	图像中心 SAR 传感器的飞行角度（度）
map_coordinate_1:	处理后的图像第 1 个角的纬度，经度和高度(米)
map_coordinate_2:	处理后的图像第 2 个角的纬度，经度和高度(米)
map_coordinate_3:	处理后的图像第 3 个角的纬度，经度和高度(米)
map_coordinate_4:	处理后的图像第 4 个角的纬度，经度和高度(米)
map_coordinate_5:	处理后的图像中心的纬度，经度和高度(米)
number_of_state_vectors:	这个文件中给出的状态矢量的个数
time_of_first_state_vector:	第一状态矢量的时间
state_vector_interval:	状态矢量之间的时间间隔
state_vector_position_1:	状态矢量 1 的(x,y,z)坐标 (米)
state_vector_velocity_1:	状态矢量 1 的速度的(x,y,z)坐标 (米/秒)
state_vector_position_2:	状态矢量 2 的(x,y,z)坐标 (米)
state_vector_velocity_2:	状态矢量 2 的速度的(x,y,z)坐标 (米/秒)
state_vector_position_3:	状态矢量 3 的(x,y,z)坐标 (米)
state_vector_velocity_3:	状态矢量 3 的速度的(x,y,z)坐标 (米/秒)
state_vector_position_4:	状态矢量 4 的(x,y,z)坐标 (米)
state_vector_velocity_4:	状态矢量 4 的速度的(x,y,z)坐标 (米/秒)

state_vector_position_5:	状态矢量 5 的(x, y, z)坐标 （米）
state_vector_velocity_5:	状态矢量 5 的速度的(x, y, z)坐标 （米/秒）

2.3.2 单视复数据(SLC)和多视强度（MLI）图的文件格式

输出的 SLC 图像是二进制文件，存为 4 字节浮点型数据(FCOMPLEX)对或短整型（SCOMPLEX）数据对。从处理参数文件中可以得到文件和数据格式的大小，包括图像行列数。MLI 图像存为 4 字节浮点型（float）。

2.4 处理器程序

处理器是由一系列 ANSI C 程序和由 IDL 语言编写的绘图显示子程序包组成的。MSP 的用户界面很直接，从命令行中运行程序。

2.4.1 原始数据的转录

SAR 原始数据通常是以 CDROM 方式发布的，在过去，是通过 8mm Extrabyte 磁带发布。一景原始数据有几百兆。这些数据是以著名 CEOS 格式存储的，CEOS 格式是由一些分级数据格式的文件组成。这些文件包括卷路径文件（VDF）、CEOS 头文件（LDR）、CEOS 尾文件（TRL）、图像数据文件（DATA）和空卷路径文件（NVDF）。解译这些文件是一件非常困难的事情，因为每个人会选择不同的参数，并且以自己的方式来进行编码。所以，对于不同的地面站和传感器来说，这五个文件会具有不同的长度和格式。

建议将 CDROM 中的数据拷贝到硬盘的用户目录中，并以该景数据的轨道号来重新命名该目录。MSP/script 路径中提供了许多 csh 命令脚本用于从 Extrabyte 磁带中读取原始 SAR 数据。这些命令脚本根据不同的地面站而有所不同，这样也有利于将数据拷贝到硬盘中。这一步是进行进一步处理的前提条件。

早期 UK-PAF, CCRS 和 JERS-1 原始数据的转录

UK PAF 发布的 ERS 数据和在 1999 年以前 CCRS 发布的 ERS 数据都被转录到

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108 邮编：100083 电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073 手机：13366576603 联系人:牛晓杰 email:niuxj@otitan.com http://www.otitan.com

3 盘 Extrabyte 磁带中，而且只使用了这 5G 容量的 Extrabyte 磁带中的 100M 的空间。当使用 Extrabyte 磁带读取程序读取一个新磁带的时候，针对这种情况，Gamma 软件中的脚本命令将会提示用户。一旦读完了原始数据的这 3 个部分，用户必须使用 UNIX 中的 *cat* 命令将这三个文件连接成一个文件。

直到 1997 年，JERS-1 数据都是存储在一种现在已经不用了的 9 磁道的磁带上进行发布的，同样，也只有 100M 数据能够存储在一盘磁带上，也必须使用 *cat* 命令将转录的文件连接起来。

2.4.2 处理参数的生成

对于传感器参数和处理参数结构来说，使用前面提出的数据结构传递处理参数。一般来说，传感器参数描述的是特定传感器或者数据集的静态参数。对于单模式雷达，如 ERS，情况是这样的，而对于多模式雷达，如 SIR-C 和 Radarsat, 每一个处理过程都会生成一个单独的传感器文件。这个过程是程序自动完成的。

对于不同的传感器，参数生成程序是不同的。对于 ERS 数据，不同的地面站获取的数据所使用的参数生成程序也不同，因为不同的地面站所采用的 CEOS 头文件是不同的，从而使得各个地面站所获取的数据之间具有很大的差异。1996 年后，ESA 在欧洲范围内协调了 CEOS 格式。由于诸多因素，所以，如果你在读取特定数据时遇到了我们还没有遇到过的问题，请及时联系 Gamma。目前，我们支持的 CEOS 原始数据有: 澳大利亚遥感中心（ACRES），阿拉斯加 SAR 地面站（ASF），ASI（意大利地面站），CCRS（加拿大地面站），D-PAF(德国)，C-PAF(ESA/ESRIN), 新加坡 PAF（CRISP）和 UK-PAF。参数生成程序读取 CEOS 头文件，提取适当的参数，询问用户将要处理的图像范围，设置处理参数文件。如果所有选项都是选择缺省设置的话，那么处理的是整幅图像。根据地面站的不同，这些程序分别是：*ERS_proc_ACRES, ERS_proc_ASF, ERS_proc_ASF_91, ERS_proc_ASF_2000, ERS_proc_CCRS, ERS_proc_ASI, ERS_proc_CRISP, ERS_proc_ESRIN_ACS, ERS_proc_ESA, ERS_proc_NASDA*。

MSP 也能够处理条带模式的 Radarsat 数据。通过 RSAT_raw 程序，从每一回波的 CEOS 头中读取大多数系统参数信息。注意，不要将每一回波记录的头的字节数和整个原始数据文件的 CEOS 头记录混淆了。每个回波头的字节数都是不同的。对于 Radarsat 来说，这些字节包含了系统的信息和发射脉冲的信息。系统信息包括雷达站点信息、时间和航天器高度。雷达站点信息用于决定传感器参数，如脉冲带宽。而且，原始数据的 IQ 样本是 2 的补码形式，而不是其他星载 SAR 所采用的偏移二进制格式。解码程序能够将 Radarsat 数据快速地转换成偏移二进制格式，以与 MSP 中其他的 SAR

图像格式一致。

使用程序 JERS_proc 可以从 NASDA CEOS 头中读取 JERS-1 处理参数。由于单模式雷达的传感器参数是不变的，所以 JERS_proc 只生成一个处理参数文件。

使用程序 *PALSAR_proc* 可以从 NASDA CEOS 头和原始数据中提取 PALSAR 处理参数。由于 PALSAR 是多模式传感器，所以传感器参数文件和处理参数文件都是由 *PALSAR_proc* 程序生成的。而且，该程序检查距离重整，将原始数据文件中的空值设置成 255。使用 MSP 程序 *cat_raw* 可以连接多景数据。

由于 SIR－C 具有多模式、多频率（L-和 C 波段）、多分辨率和多极化的特征，因此它和 Radarsat 的情况类似。对于每一幅 NASA JPL 或者 EROS 数据中心提供的原始数据，*SIRC_pro* 创建该数据的传感器参数和处理参数文件。

2.4.3 距离谱估计

SAR 数据的距离谱对于估计最终图像的 SNR 是很有用的。一般地，脉冲频谱分布于数字带宽的 80%。通过比较脉冲带宽的平均水平和噪声区域的水平得到 SNR 估计。该估计在 SAR 图像定标中用于天线增益的辐射补偿，主要是因为天线增益校正只作用于信号，对于 SAR 图像中的噪声部分，则不起作用。对于 IQ 格式的 SAR 数据，使用程序 *rspec_IQ* 完成距离谱估计，而对于偏置视频 SAR 数据，使用程序 *rspec_real* 完成该步骤。

2.4.4 缺失行的检测和校正

不同地面站提供的 ERS 数据经常存在缺失数据行的情况。在情况严重的情况下，文件中有可能会缺失几百行。如果只是缺了几行数据，那么由该数据生成的多视强度图中很难看出来。但是，对于干涉应用来说，即使是缺失了一行数据，那么图像间的干涉相关性都会完全丢失掉，这是决不可能接受的。程序 *ERS_fix* 用于检视二进制行计数器以决定原始数据集中是否存在缺行的情况。由于行计数器本身可能存在单个比特误差的情况，因此整个问题变得更加复杂了。如果计数计错了的话，将会导致大块的缺失行。*ERS_fix* 自适应跟踪行计数器，通过复制当前行来补全缺失行。这种方法保留了图像的 RMS 强度信息。当然。随着缺失行的增加，图像的信噪比将会降低。

ERS_fix 也可以将几景图像连接起来形成一个大的图像。MSP 已经成功处理了 5

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

景（500km）长的条带 SLC 数据，用于南极冰运动状况的干涉测图。沿着轨道方向 ERS 大约每隔 30 秒改变一次距离门（也就是第一行的斜距）的位置。*ERS_fix* 检测这些变化，平移原始数据以使得整个数据集都有相同的初始斜距。

到目前为止，我们还没有在 JERS-1 数据中检测到行缺失的情况，但是距离门的变化确实有。程序 *JERS_fix* 可以用来连接几景图像的数据段，在有距离门变化时，可以进行距离重整。

PALSAR 数据在发布之前已经经过了缺失行检查，所有缺失的行都用 0 填充。*PALSAR_proc* 重新调整输入数据的格式以与 MSP 相适应。使用 *cat_raw* 程序可以将多景数据连接起来。

2.4.5 多普勒模糊度

多普勒频率与目标相对于雷达的速度成正比：

*f_doppler = 2*目标速度/波长。*

雷达回波精确的匹配滤波器需要知道多普勒历史，包括由于天线视轴偏离 SAR 轨迹的垂直方向（零多普勒频率）而产生的模糊性。相对于雷达轨迹形成的多普勒频率不变的面是一个同心圆锥。这些圆锥与地面相交的部分形成了一系列 hyperpola。零多普勒频率面是一个与飞行方向垂直的平面。估计多普勒模糊有几种方法，最可靠的方法是使用航天器高度的精确数据（如果有的话）估计斜视角。现在的雷达大多数都缺乏这种重要的测量能力。SRTM 能够提供足够的精度用于直接估计多普勒中心，而且它还有一个多普勒跟踪器，用于将多普勒中心锁定在 0 位置。新一代 SAR（ENVISAT, ALOS 和 Radarsat II）在定位的能力和知识上都有很大的提高。

为了将数据的多普勒中心保持在 SAR 脉冲重复频率的 1/2 范围内，ERS-1 和 ERS-2 平台上使用了雷达偏航控制系统。在这种情况下，多普勒中心是没有模糊的，因为有限带宽信号的采样满足 Nyquist 原理。Nyquist 原理更一般形式的描述是：只要信号的带宽小于采样率（PRF），那么知道了采样频率的正确倍数，就可以恢复原始的信号。多普勒中心小数部分的估计可以通过方位谱的非相干叠加(Li et.al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (TGRS), January 1985)和交叉相关(S.N. Madsen, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, March 1989)的方法得到。这两种方法都可以得到可靠的以 PRF 为模的多普勒中心的估计。

由于斜视角很大，超过了 SAR 天线的波束宽度，将会发生多普勒重叠的现象。在处理 SAR 时，如果多普勒中心含有重叠现象，那么意味着图像中目标的距离迁移速率的估计是不正确的。由于缺乏直接测量的技术，解决这个问题最可靠的方法时测量未补偿的距离迁移，通过多普勒谱不同部分所生成的图像间的相关运算得到。距离

向和方位向多普勒谱的不同部分生成的图像，可以通过自动聚焦程序 *autof* 进行相关运算。方位向偏移与平台速度的误差成正比，距离向偏移表明了由多普勒模糊的误差所引起的距离迁移的误差。自动聚焦方法的一个局限是它要求场景之间具有一定的对比，在多普勒带宽内，目标都是相干的。绝大多视图像都满足这些要求，但是海上或是雪上的图像不满足这些条件。

事实表明，ERS 的定位方法在南半球产生了误差，导致实际的多普勒中心偏移基带 1 到 2 倍 PRF。Radatsat, JERS-1 和 PALSAR 不使用偏航控制系统来控制 PRF，所以它们的多普勒中心是传感器纬度的函数。SAR 数据偏航幅度的加大不仅使得处理起来非常困难，而且会降低图像的分辨率。将来，都应该进行偏航控制以获得最好的分辨率。缺少准确的偏航控制也会导致干涉结果变坏，因为重轨干涉得到最好相关性的条件是重复轨道必须从同样的角度来观测地面上的一点。

另一类方法是将多普勒中心变化看作载频的函数。为了使得这些算法很好地运行，SAR 带宽的小数部分应该很大，场景相对来说是缺乏特征的。现在，可以使用两种不同的算法。最成功的算法是基于 DLR 的 Richard Bamler 的工作而提出的，通过估计距离向线性调频脉冲带宽内不同段的多普勒中心，将多普勒偏移看作是频率的函数来检查多普勒偏移。多普勒中心的估计可以通过回波之间的复相关得到，相关系数的相位直接与多普勒中心成正比关系。将多普勒中心偏移作为频率的函数来检查多普勒中心偏移将会得到多普勒中心的准确估计。该算法叫做多视交叉相关算法（MLCC），在 1991 年 11 月的 IEEE TGRS 中有相关介绍。

第二种算法叫做多视撞击频率法（MLBF），由 MacDonald Dettwieller 的 Frank Wong 和 Ian Cumming (*IEEE TGRS*, May 1996)提出的。它也同样使用了不同的距离向多视的概念，不过，计算的是距离向多视图像的谱，而不是相关系数。该算法在点目标区域，如郊区或城区，运行结果最好。MLCC 算法在处理高对比度的区域会产生错误，处理数据量的增大将会降低这种敏感性。

对于多普勒模糊度估计程序 *dop_ambig* 是否提供了一个精确的答案这个问题，MSP 给出了置信度评价，参数 *DAR_snr* 存储着该评价值。对于 MLCC 算法，*DAR_snr* 的值误差的函数，使用该误差将会得到 PRF 的错误倍数。信噪比是 1 表示预测的误差和将会产生错误的多普勒模糊度的误差是一致的，信噪比是 4 表明相位估计中估计的误差是将会产生错误的多普勒模糊度误差的 1/4。在 MLCC 算法中，距离向多视图傅立叶变换得到频率谱，*DAR_snr* 是该频率谱峰值信噪比的量度。小于 4 的信噪比意味着多普勒中心估计出现错误的可能性更大。

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

2.4.6 多普勒中心估计的小数部分

多普勒中心的小数部分可以使用行对行的复相关方法得到，也可以通过寻找方位强度谱的中心得到。ERS 数据从距离向的一端到另一端的多普勒中心大致是不变的，方位谱方法在这种情况下工作很好。但是，Radarsat 和 JERS 数据通常情况下会有一个很大的斜视角，从而导致距离向两端的多普勒中心变化大于 1/2 PRF。对于这些传感器，*doppler* 程序中要求使用交叉相关的方法。*Doppler* 程序中使用的交叉相关的方法可以得到每一个距离范围内的中心估计。这些单独的估计有些不太准确，因此，整个数据列的多普勒中心使用最小二乘多项式拟合的方法得到最终的结果用于数据处理。多项式存储在 MSP 处理参数文件中。

对于 ERS、Radarsat 和 JERS IQ 格式的 SAR 数据，使用的是 *azsp_IQ* 程序中的方位向强度谱方法进行处理。从距离向的中心区域得到的一小段方位数据进行傅立叶变换，获得的强度非相干叠加形成周期图。然后，程序通过找到平衡频率谱的频率来决定多普勒中心。该程序只在图像的中心寻找多普勒中心，用于 ERS 的处理。

可以使用程序 *dop_ambig* 和 *dop_mlcc* 得到多普勒中心的准确估计，*azsp_IQ* 和 *doppler* 使用该估计决定模糊数，添加 PRF 的正确倍数到估计的多普勒中心的小数部分上。如果 MLCC 和 MLBF 算法都没能得到正确的模糊度，*doppler* 可以从命令行中接受一个整数值作为模糊度。

2.4.7 JERS-1/PALSAR 无线电频率干扰（RFI）的估计

对于许多的 JERS 和 PALSAR 图像来说，无线电频率干扰（RFI）是一个非常严重的问题，因为雷达波段是与使用这部分频谱的其他用户共享的。表现在 SAR 图像上的效应是在图像上产生条纹和多余的噪声。从而模糊了地面场景。MSP 程序 *rspec_JERS* 在整个原始数据集范围类以 1024 个回波为单位平均距离强度谱。然后，距离压缩程序 *pre_rc_JERS* 使用该强度谱去除窄带 RFI 引起的干扰。在强度谱中 RFI 信号以长钉的形态出现。可以在距离谱中使用中值滤波的方法检测该长钉形态，标记出该区域，在距离向匹配滤波的时候这些区域将被设置成零。对于处理的原始数据的每一部分，滤波器是可以不同的。使用程序 *extract_psd* 可以绘出每个频率谱，这些频率谱也可以传递到 *xmgrace* 绘图程序中显示。关于 *extract_psd* 详细的使用方法，可以参考 JERS/PALSAR 指南。

2.4.8 距离压缩/方位预滤波

原始 SAR 数据是雷达沿着飞行路径飞行时，雷达接收到的连续 SAR 回波的采样，该样本是复数形式的。雷达样本可以用两种方式中的任一种记录。如果接收到的信号被外差到基带，那么每个样本是一个复数对，用 I、Q（同相、正交）通道表示。如果接收器输出谱在 DC 的载波偏置上，那么只需要一个模数转换器（ADC），数据样本是实数值的偏置视频格式。如果数据是偏置视频格式，数据的处理需要减去载波 。偏置视频采样的唯一缺点是 ADC 的采样速度必须是 IQ 系统中所使用的 2 个 ADC 的采样速度的两倍。这两个系统总的数据量是相同的。偏置视频具有一定的优势，因为你不必关心通道的幅度或相位不均。

在雷达沿着飞行路径进行飞行的过程中，发射器不停地发射脉冲，这些脉冲是线性调频信号，时带积非常大。对于接收到的数据，距离压缩程序使用匹配滤波的方法进行处理。下表中列出了 MSP 中的基于传感器的距离压缩程序：

程 序	功 能
pre_rc	对于 ERS 数据，进行距离向压缩和方位向预滤波/采样原始 IQ 格式的 SAR 数据（可选）
pre_rc_JERS	距离向压缩和方位向预滤波/采样原始的 JERS-1 数据
pre_rc_RSAT	距离向压缩和方位向预滤波/采样原始的 Radarsat 条带模式的数据，包括二次距离迁移的校正
rc_real	距离向压缩偏置视频 SAR 数据，如 SIR-C

这些程序都以大致相同的方法工作的，考虑了基于传感器的因素以及补偿了方位向和距离向后向散射的变化。所有的程序都估计了原始数据的直方图和数据统计特征，包括每个通道的均值，标志方差，以及在 IQ 数据的情况下，I、Q 通道间的相关性。*pre_rc_JERS* 在接收器增益中补偿了方位向变化，也补偿了方位向增益的变化，叫做敏感度时间控制（STC）。*pre_rc_RSAT* 补偿 Radatsat 数据方位向接收器增益的变化。Radarsat 每 8 个回波更新一次接收机增益，而 JERS 每 64 个回波更新一次。在所有的情况下，程序都会归一化发射的调频信号的输出长度。*rc_real* 用于 SIR-C 接收到的偏置视频格式的数据的压缩处理。

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

决定旁瓣水平和距离压缩数据的分辨率的一个重要参数是用于距离参考函数的窗口。MSP 中所有的程序都使用 Kaiser-Bessel 窗口作为权重函数。分辨率和旁瓣水平的关系可以通过调整窗口参数 beta 实现。Beta 的缺省值是 2.12，此时，旁瓣大约是－25dB。在多数有关信号处理的标准文献中，如 Oppenheim 和 Schafer 编写的数字信号处理（第二版），都有关于该窗口的讨论。

在 ERS、Radarsat 和 JERS 的距离压缩时，程序提供一个选项，可以选择是否在距离压缩前通过在多普勒中心附近预滤波的方法在方位向采样数据。如果需要生成快视图产品可以考虑使用该选项。这个步骤也可以在距离压缩之后进行，使用 *prefilt* 程序。用户指定所要的采样因子和有限脉冲响应（FIR）滤波的相对长度。

2.4.9 方位向自动聚焦

程序 autof 计算雷达平台沿轨速度的精确估计，使用的是图像间交叉相关的方法，这些图像是由方位多普勒谱的不同部分形成的。自动聚焦要求试验区有一些图像对比，否则子图像间的相关匹配将会失败。

算法是基于这样一个思想：给定一幅子图像的多普勒中心，作为时间函数的方位向频率直接与速度有关。不同斜视角的子图像是从不同方向来观测地面的。如果使用估计的速度导致这些图像间产生重叠，主要原因很可能是估计的速度不够准确。图像偏置就是用来校正速度估计的。重复该过程将会提高估计的精度。建议至少使用两次该算法以达到最好的聚焦精度。

自动聚焦程序将绘制不同视之间相关性的图形，检查相关系数峰值的结构。如果相关性很低，峰值相对于周围的对比就很低。那么将会估计自动聚焦的 SNR。一般地，SNR 值低于 1.5 意味着自动聚焦将不能找到图像间的相关性。产生这种结果的一个原因是处理过程中使用了错误的多普勒模糊度，另一个原因是场景中没有特征，如格林兰的大冰原。在这种情况下，可以重新回到估计沿轨速度的那个步骤。

2.4.10方位压缩

程序 *az_proc* 使用标准的距离-多普勒（RD）算法方位压缩那些经过距离压缩后的数据。距离压缩后的数据沿着飞行轨道方向可以被分成一个个块，每块包含 4096 或 8192 个回波。由于图像中的每一点都会形成一个抛物线形式的距离轨道，因此，需要对距离压缩后的数据进行距离迁移的校正。RD 算法基于这样的思想：在特定的距离范围内，特定多普勒频率上的所有点都将迁移相同大小的距离。这也是为什么在

RD 算法中，距离迁移的校正是在方位 FFT 运算之后进行。插值方法中使用的是 9 点 sinc 插值核。距离迁移校正后，就进行方位向匹配滤波，使用的是从点目标的距离历史中得到的方位匹配滤波器。距离历史是精确计算出来的，对于每一个距离门都进行了更新。

方位处理过程中的相对定标考虑了距离向天线方向图，斜距向的变化，方位参考函数长度的变化，插值窗口函数，地面到水平面的投影，以及进行绝对辐射定标的其它因素。ERS-1, ERS-2 和 JERS 数据提供 Gamma 定标过程中所需的绝对定标因子，这对绝对定标这些传感器数据是一个帮助。考虑到场景中估计的信噪比，距离天线方向图进行了归一化处理。SAR 图像相对定标确保了噪声功率作为距离的函数是不变的。在 SAR 传感器文件中给出了天线方向图文件的名称。

输出的 SLC 数据支持 FCOMPLEX 格式(也就是 4 字节浮点型数对)和 SCOMPLEX 格式（也就是 2 字节短整型数对）。使用 SCOMPLEX 格式时，注意数据值的拉伸范围。通常，定标后的后向散射强度乘以 1’000’000（1.0e+6）的拉伸系数之后可以很好地将实部和虚部转换到短整型值的范围内。

2.4.11 多视处理和地距图像

方位处理后得到的单视复图像由程序 multi_SLC、multi_GRD_SLC 进行多视平均处理。这两个程序都生成一个新的处理参数文件，该文件包含了图像大小和多视强度图分辨率的信息。使用长方形窗口进行数据的平均。用户可以在命令行中指定用于平均的距离向和方位向样本的数目。每一个样本的值都经过了归一化。

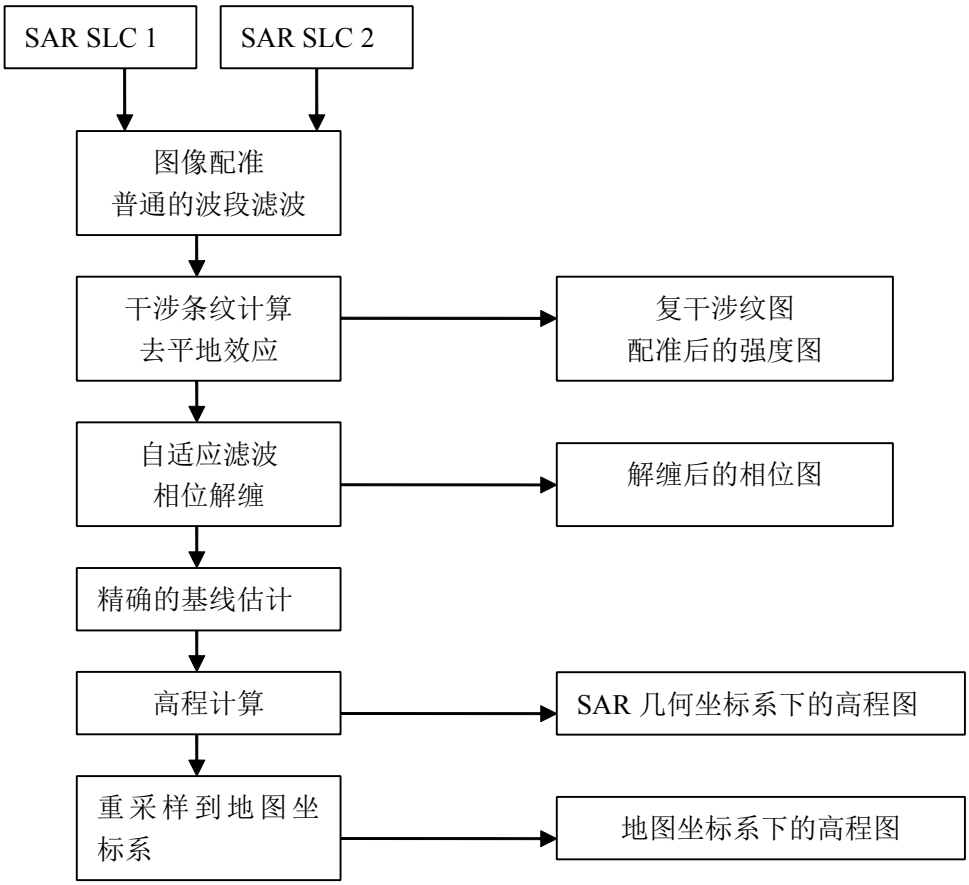
Multi_SLC 输出的图像是斜距坐标的，而 multi_GRD_SLC 将图像投影到地面距离坐标系中，该坐标系是地球曲面的圆柱投影。这样，在地面上象元是正方形的，而且，与雷达实际有关的一些因素也从图像中去除了。地距图像上并没有考虑由于地形影响而产生的入射角的变化，因此，该图像中存在着大量由于地形高程引起的变化。这些地区需要基于 DEM 或由干涉的方法得到的高程图来进行地理编码。

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

3 GAMMA 干涉 SAR 处理器（ISP）

Gamma 干涉 SAR 处理器（ISP）包含了一系列生成干涉纹图、高程图、相干系数图和差分干涉产品的算法。这些算法包括从轨道数据中进行基线估计、干涉图像对的精确配准、干涉条纹的生成（包括普通的光谱滤波）、干涉相干性的估计、平地相位的去除、干涉条纹的自适应滤波、使用枝切法或基于不规则三角网的最小代价优化算法进行的相位解缠，从地面控制点估计干涉基线的精度，生成高程图以及高程图的校正和插值。中间和最终结果可以用显示程序显示出来，也可以生成 SUN 栅格和 BMP 格式。与处理过程有关的参数和数据特征存储在文本文件中，可以通过商业绘图软件包打开。

下图描述了 ISP 的工作流程。



ISP 流程图

3.1 干涉纹图的计算

3.1.1 SLC 数据转录和处理参数的生成

一系列的 c 程序能够将单视复数据（SLC）从磁带中导入到硬盘中，这些磁带可以是不同的处理和存档设备生成的。这是进行进一步处理的前提条件。参数生成程序提取 CEOS 头文件或组件式 SAR 处理器（MSP）的参数文件，获取适当的参数，询问用户将要处理的图像范围，以及生成处理参数文件。

对于 ENVISAT ASAR SLC 数据，程序 par ASAR 支持 ESA 提供的单个数据文件的转录，生成的参数和图像数据文件用于 ISP 处理。该程序还支持不同 ASAR 模式的所有 ASAR PRI 产品的转录。

程序 ASAR XCA 支持 ASAR 外定标数据文件的解译。该文件包含了所有 ASAR 模式和产品的定标比例因子，以及所有条带的 ASAR 天线方向图。程序将定标因子写到屏幕上，同时生成所有模式或某一特定模式的天线方向图文件。

3.1.2 图像配准和普通的带通滤波

复数 SAR 数据的干涉处理是将两幅单视复数据图像 s1、s2 的信息结合到一幅干涉图上，这就要求这两幅图像必须具有子象元级的配准精度。为了使得干涉测量的相关性的损失不超过 5%，配准的精度必须达到 0.2 个象元以上的精度。ISP 支持两种不同的 SLC 配准及干涉图计算的方法。第一种方法分为两步，第一步是将其中一幅影像作为参考影像，第二幅 SLC 影像配准到参考影像上，第二步是利用这两幅配准好的 SLC 图像进行干涉图的计算。第二种方法与第一种方法的不同之处在于，它将配准和干涉图的计算合在了一步之中完成了。第一种方法为多幅 SLC 图像的配准提供了一种简便的方法。第二种方法的优点在于：对硬盘空间的要求比较低（因为没有多余的 SLC 文件产生）；它将插值和光谱滤波并作一步，从而大大提高了计算的效率。

图像配准的偏移量可以认为是在方位向和距离向上的双线性方程。偏移量多项式系数的决定是进行干涉处理的第一步。图像的配准是通过分布于整个图像中的、大约 1000 个小区域的局部空间相关函数的计算来完成的。那些使得局部相关系数达到最大的图像偏移量可以通过图像强度图的交叉相关得到，也可以通过条纹可见度（也就是基于复数信号特征）的优化得到。这些值用于在整幅图像中估计距离向和方位向偏移量的多项式系数。一旦偏移量方程知道了，那么 SLC 图像就可以进行配准了。由

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

于这是在子象元分辨率空间上进行的处理，所以必须对其中的一幅图像进行重采样。采用合适的插值算法可以最大程度上减少由于插值所带来的误差。

第二步是决定垂直基线的长度。知道了垂直基线长就可以决定进行距离谱带通滤波的滤波函数。关于这种滤波的讨论可见 Prati et al. (1992) and Gatelli et al. (1994)。方位谱和距离谱的不同在于，它的多普勒中心是不同的。方位谱也同样可以进行滤波以便只包括两个频谱中的共同部分。

3.1.3 干涉图的计算和平地相位的去除

接着两幅图像进行交叉相关，也就是计算归一化的复干涉图。为了提高干涉图的相位和相关性的估计，采用了多视处理的手段。为了使得后续的滤波、平均和相位解缠更容易计算，从干涉图中消除了由于平地所产生的方位向和距离向相位趋势。归一化的复干涉图的幅度值对应于干涉测量的相关系数。

3.2 相位解缠

从复干涉图上可知干涉相位是以 2&pi 为模的。为了能够将干涉相位和干涉图的成像几何关系关联起来，从而最终获得地形高程和实际的地面距离，需要加上正确的 2&pi 倍数。这在相位解缠这一步完成。由于不连续性（比如因为叠掩）和矛盾性（由于很高的相位噪声引起的残差），相位解缠是具有争议性的一个步骤。可以使用滤波和多视处理减少部分的相位噪声。中等相关到高相关的相对平坦的区域没有太大的问题，需要特别注意的是那些地势崎岖的区域和相关值低的区域。

干涉图滤波

相位解缠前的一个很可能的步骤就是多视处理和滤波，目的是减少相位噪声，从而使得相位解缠更容易、稳定和高效。ISP 支持复干涉图的多视处理和滤波。有两种不同的滤波方法，一种是统计本地相位梯度，另一种是 Werner 和 Goldstein（1997）提出的新的滤波方法。

相位解缠

ISP 使用两种相位解缠方法中的任何一种进行解缠。第一种相位解缠方法是枝切区域增长算法，和 Rosen（1994）描述的算法相似。它主要作用于滤波后的干涉图，并且找出那些关键区域，诸如低相干值区或有残点的区域，对这些关键区不做相位解缠。该相位解缠算法相当可靠，并且运行效率非常高。

第二种相位解缠方法使用最小成本流（MCF）技术和不规则三角网（TIN）。对于相位解缠问题该技术是一个全局优化的方法。该方法的其他优点有：能够考虑输入数据中的缺陷（如在低相干值区域）和三角网格的高密度性。使用掩模、自适应稀释和批处理从而保证了高效、稳定的相位解缠，即使是处理大数据量的干涉图也是如此。关于 ISP 支持的相位解缠方法的详细描述可见 Werner *et al*（2002）。

3.3 生成高程图

精确的基线估计

干涉基线的初步估计是从轨道数据或平均干涉条纹频率得到的。初步基线估计对于平地相位的去除，从而进行干涉纹图的滤波和相干系数的估计是足够的。但是，对于将解缠后的干涉相位转换到地形高程上，初步基线估计还是不够精确的，必须进行更精确的基线估计。ISP 中使用许多已知高程的地面控制点进行最小二乘法拟合得到更精确的基线估计。

高程的计算

基于 Madsen *et al*（1994）和 Small *et al*（1994）描述的几何关系，解缠后的干涉相位和精确的基线估计用于得到地形高程和真实的地面距离。

3.4 正射校正

知道了在 SAR 图像几何关系坐标系统上的地形高程，就可以将图像从 SAR 坐标（斜距向，方位向）转换到正射校正后的坐标系。除了高程外，其他产品，如后向散射强度图或相干系数图，也可以重采样到正射坐标系。将图像从提供的正射坐标系转换到一个实际的地图投影上需要特定的图像处理软件支持。SAR 地理编码软件作为 DIFF&GEO 的一部分，能够提供 SAR 距离－多普勒坐标和地图坐标之间的直接编码。

3.5 ISP 处理实例

介绍

以下将介绍 ISP 处理的一个实例，将使用以下的路径结构：

./8059　　存储第一幅图像（8059 轨道）的 SLC 数据和相关参数文件

./8560　　存储第二幅图像（8060 轨道）的 SLC 数据和相关参数文件

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

./8059_8560　　存储干涉数据和相关参数文件

干涉图的生成

1. 读取输入 SLC 数据

首先需要获得两幅单视复图像（SLC）。该数据可以用 Gamma MSP 模块生成，也可以从 ESA 或者其他地面站提供的 CDROM（或磁带）中读取。

（可选）从磁带中读取 SLC 数据

许多命令脚本支持从磁带中读取 SLC 数据。新建路径./8059(8059 是轨道号)，运行脚本 ERS_ESA_SLC(或者是处理其他地面站数据的脚本文件)：

```
ERS_ESA_SLC  8059 /dev/rmt/0mn
```

文件	内容
8059.vdf	卷目录文件
8059.ldr	SAR 文件
8059.slc	SAR SLC 数据
8059.nvdf	卷目录文件
8059.slc.ras	使用 rasSLC 生成的 20 视的 SUN 栅格图像
8059.slc.par	用 par_ESA 生成的 ISP SLC 参数文件
8059.azspec	在多普勒中心计算过程中，使用 az_spec_ESA 生成的方位谱

对于第二幅影像（8560 轨道），重复相同的步骤。对于 Gamma MSP 处理得到的 SLC 数据可以使用 *par_MSP* 来生成 ISP SLC 参数文件。SLC 数据是一对 4 字节浮点数（*re, im*）或者是一对短整型整数。在 SLC 参数文件中参数 *image_format* 用来区分这两种数据格式。如果头文件中没有状态矢量，那么可以通过程序 PRC_vec 从 ESA 提供的精确轨道信息文件（PRC）中提取状态矢量信息。

2. 初始偏移量估计

以下认为工作目录为./8059_8560。使用 *create_offset* 创建 ISP 偏移量参数文件 8059_8060.off。ISP 偏移量参数文件包含了干涉处理过程中使用的信息，如文件的维数，几何参数和配准偏移量多项式**:**

```
create_offset 8059.slc.par 8560.slc.par 8059_8560.off 1
```

最后一个输入参数指出将要使用何种配准算法(1 表示基于图像强度交叉相关的方法，2 表示条纹可见度方法)。两幅 SLC 图像之间初始的距离和相位偏移量可以通过用户手工确定（需要有 SLC 图像显示程序 *disSLC*)，也可以使用 *init_offset* 自动估计。为了避免模糊问题，同时又取得精确的估计，可以在多视图像上先运行一遍 *init_offset*，再在单视图像上再运行一遍该程序:

init_offset 8059.slc 8560.slc 8059.slc.par 8560.slc.par 8059_8560.off 2 10

init_offset 8059.slc 8560.slc 8059.slc.par 8560.slc.par 8059_8560.off 1 1

初始的偏移量估计写到了文件 8059_8060.off 中。在第二遍运行 *init_offset* 程序的时候，第一遍运行的结果可以作为第二遍运行的初始值。还有一种方法是在创建 ISP 处理参数文件之前运行程序 *init_offset*。这时，*init_offset* 也创建 ISP 处理参数文件。这种方法的优点在于：考虑到已经获得的初始配准偏移量，可以决定用于精确配准的区域范围。

3. 偏移量多项式的精确估计

有两种方法用来精确估计（子象元精度）距离向和方位向的偏移量多项式。第一种方法基于图像的强度。这种方法并不依赖于两幅 SLC 强度图的相干水平，因而具有很高的计算效率。该方法需要最小的图像反差。注意，为了使用 *offset_pwr*，某些 ISP 处理参数值需要合理地设置一下。参数 *offset_estimation_starting_range* 等是为了将搜索局限在有效的 SLC 数据范围内，比较重要的搜索参数有：

ISP 处理参数	使用 *offset_pwr* 时应选择的合适的参数（举例说明）
offset_estimation_range_samples:	32
offset_estimation_azimuth_samples:	32
offset_estimation_window_width:	64
offset_estimation_window_height:	64

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108 邮编：100083 电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073 手机：13366576603 联系人:牛晓杰 email:niuxj@otitan.com http://www.otitan.com

offset_estimation_threshold::	7.0

offset_pwr 8059.slc 8560.slc 8059.slc.par 8560.slc.par 8059_8560.off 8059_8560.offs 8059_8560.snr 8059_8560.offsets

第二种方法基于复数数据。这种方法搜索距离和方位偏移量，使得许多图像块的相干性达到最大。该方法要求这两幅 SLC 数据中有大量的地方具有足够高的相干性，并且它也只能在很低的图像反差下工作。参数 offset_estimation_starting_range 等是为了将搜索局限在有效的 SLC 数据范围内，比较重要的搜索参数的值可以这样设置：

ISP 处理参数	使用 offset_SLC 时应使用的合适参数值（举例说明）
offset_estimation_range_samples:	16
offset_estimation_azimuth_samples:	16
offset_estimation_window_width:	16
offset_estimation_window_height:	16
offset_estimation_threshold::	3.0

offset_SLC 8059.slc 8560.slc 8059.slc.par 8560.slc.par 8059_8560.off 8059_8560.offs 8059_8560.snr

每一个偏移量估计的质量都计算出来了，如果没有高质量的偏移量估计，那么就没法完成配准工作。有几种原因会导致这样的结果：
－初始估计不好
—基线太大
—变化太大（水体，森林，高的植被，获取时间间隔太长）.

两种方法都计算了配准偏移量（文件*.offs）以及相应的质量评价（*.snr）。可以基于这些信息，使用最小二乘误差的方法计算配准偏移量多项式。距离和方位向偏移量的最终配准偏移量多项式写到 ISP 处理参数文件中:

offset_fit 8059_8560.offs 8059_8560.snr 8059_8560.off 8059_8560.coffs 8059_8560.coffsets 3.0 4 0

4. 计算归一化的干涉图和配准后的强度图

支持两种不同的方法。第一种方法是直接利用两幅未配准的 SLC 数据和 ISP 参数文件中（*.off）包含的配准函数计算归一化的干涉图和配准后的强度图，并没有将配准后的 SLC 数据写到一个文件中。因为插值和普通带通滤波可以在一步之中完成，所以这种方法需要较少的存储空间，并且速度很快:

interf_SLC 8059.slc 8560.slc 8059.slc.par 8560.slc.par 8059_8560.off 8059_8560.pwr1 8059_8560.pwr2 8059_8560.int 2 10

两幅 SLC 图像首先在距离和方位向进行滤波（普通带通滤波），然后一幅图像与另一幅图像的复共轭相乘，再归一化。干涉图计算的时候，距离向和方位向进行了多视处理（例子中距离向是 2 视，方位向是 10 视），得到的最终的干涉图是复数，它的幅度对应于 20 视干涉相关系数，它的相位就是干涉相位。而且，使用和干涉图相同的多视处理计算配准后的强度图。由于滤波函数的原因，图像的强度没有改变。

第二种方法首先将第二幅 SLC 图像重采样到一个参考坐标系中（也就是第一幅 SLC 图像的坐标系）:

SLC_interp 8560.slc 8059.slc.par 8560.slc.par 8059_8560.off 8560.rslc 8560.rslc.par

用这两幅配准后的 SLC 图像生成干涉图，生成干涉图时进行了普通的带通滤波:

SLC_intf 8059.slc 8560.rslc 8059.slc.par 8560.rslc.par 8059_8560.off 8059_8560.int 2 10

两幅 SLC 图像首先在距离和方位向进行滤波（普通带通滤波），然后一幅图像与另一幅图像的复共轭相乘，再归一化。干涉图计算的时候，距离向和方位向进行了多视处理（例子中距离向是 2 视，方位向是 10 视），得到的最终的干涉图是复数，它的幅度对应于 5 视干涉相关系数，它的相位就是干涉相位。用一个单独的步骤计算配准后的多视强度图，使用的是与干涉图相同的多视处理方法:

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108 邮编：100083 电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073 手机：13366576603 联系人:牛晓杰 email:niuxj@otitan.com http://www.otitan.com

multi_look 8059.slc 8059.slc.par 8059.mli 8059.mli.par 2 10
multi_look 8560.rslc 8560.rslc.par 8560.rmli 8560.rmli.par 2 10

为了与后面的一致，建议将多视强度图复制或者链接到第一种方法中使用的名字上:
ln -s 8059.mli 8059_8560.pwr1
ln -s 8560.rmli 8059_8560.pwr2

不管使用上述两种方法中的任何一种，都会产生以下的文件：

文 件	例子中的文件名
参考 SLC 图像的 SLC 参数文件	8059.slc.par
ISP 处理参数文件	8059_8560.off
归一化的复干涉图	8059_8560.int
文件 1 的强度图	8059_8560.pwr1
文件 2 的强度图	8059_8560.pwr2

5. 干涉基线的估计

这里有两种方法来估计干涉基线。第一种方法是从轨道信息（也就是 SLC 参数文件中给出的状态矢量）中计算基线：
base_orbit 8059.slc.par 8560.slc.par 8059_8560.base

第二种方法是使用 fft 方法从归一化干涉图的条纹频率中估计基线：
base_est_fft 8059_8560.int 8059.slc.par 8059_8560.off 8059_8560.base 512

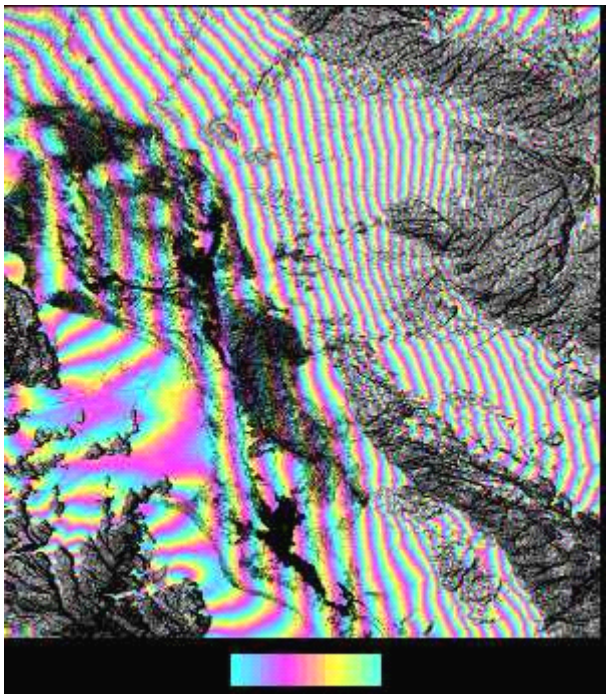
特别指出，如果没有状态矢量或者状态矢量质量不好，那么要使用第二种方法。在这两种情况下，估计的基线坐标和变化频率（TCN 坐标系统下的）写到基线文件的头两行中。

6. 去除平地相位

使用以下程序将地球平地相位（椭球体，高程恒定）从相位趋势中去除：

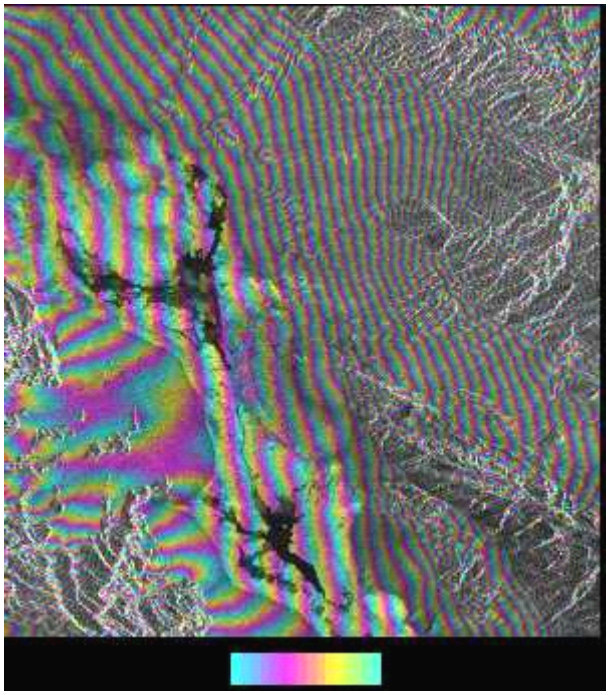
ph_slope_base 8059_8560.int 8059.slc.par 8059_8560.off 8059_8560.base 8059_8560.flt

与只经过滤波和平均处理后的干涉图的相位变化相比，去平地效应后的干涉图的相位变化没有那么快。下图是使用 *base_orbit* 程序获得的 Death Valley 地区去平地效应后的干涉图，用 *dismph* 程序显示的。



Death Valley 地区 ERS-1 去平地效应后的干涉图 8059_8060.flt，一个颜色周期对应于 2&pi 干涉相位。图像亮度表示干涉的幅度，对应于 5 视相干估计。由于状态矢量含有小的误差，去平地效应并不是很好。另一种显示干涉图的方法是用颜色表示干涉相位，图像 1 的后向散射强度图表示亮度（程序 *dismph_pwr*）

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com



Death Valley 地区 ERS-1 去平地效应后的干涉图 8059_8060.flt，
颜色对应于干涉相位，亮度对应于后向散射强度

7. 相干系数的估计

从去平地效应后的干涉图中计算相干系数。在该例中，使用 5×5 窗口、5 视，也就是说 75 视的象元来估计相干系数。使用程序 *cc_wave* 估计相干系数，可采用均匀、线性或高斯权重函数：

cc_wave 8059_8560.flt 8059_8560.pwr1 8059_8560.pwr2 8059_8560.cc 750 5.0 5.0 1

该例中，权重是随着与中心象元之间的距离的增加而线性降低的，可以使用非整数的窗口大小（程序中总是使用奇数大小的窗口，权重是按照非整数窗口大小进行设置的）。使用程序 dismph_cc 以颜色来显示相干值，以亮度来显示图像 1 的后向散射强度。

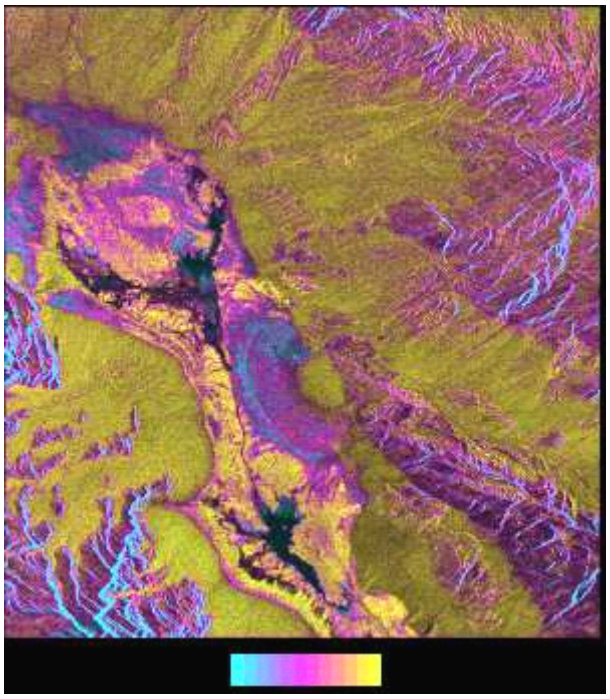


图 4　Death Valley 地区 ERS-1 的相干图 8059_8060.cc
颜色表示相干系数，亮度表示后向散射强度

8. MSP/ISP 图像的显示和 SUN/BMP 格式文件的生成

ISP 所生成的不同的图像文件可以用特殊的显示工具显示出来，还可以同时看到光标所在位置的坐标和数据值。该显示工具的使用实例如下：

（1）将干涉相位和后向散射强度图同时显示出来

dismph_pwr　8059_8560.flt 8059_8560.pwr1 750

（2）将干涉相关系数和后向散射强度图同时显示出来

discc 8059_8560.cc 8059_8560.pwr1 750

（3）交替显示两幅后向散射强度图

dis2pwr 8059_8560.pwr1 8059_8560.pwr2 750 750

而且，可以生成 SUN 栅格和 BMP 格式的文件以方便数据的移植（可以用其它很多的图像处理软件进行显示和处理）。示例如下：

（1）干涉相位和后向散射强度一起生成 SUN 栅格数据

rasmph_pwr 8059_8560.flt 8059_8560.pwr1 750

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083 电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

（2）干涉相关系数和后向散射强度图一起生成 SUN 栅格数据

rascc 8059_8560.cc 8059_8560.pwr1 750

（3）生成后向散射强度的 SUN 栅格图

raspwr 8059_8560.pwr1 750

图像显示程序以及 SUN、BMP 数据生成程序都可以选择图像的子区域和进行比例因子的调整。关于图像显示和 SUN/BMP 格式图像的详细说明请查看 ISP_display.这时，软件将生成以下文件：

文件	实例中的文件名
参考 SLC 数据的 SLC 参数文件	8059.slc.par
ISP 处理参数文件	8059_8560.off
ISP 基线文件	8059_8560.base
归一化的复干涉图	8059_8560.int
去平地效应后的干涉图	8059_8560.flt
图像 1 的强度图	8059_8560.pwr1
图像 2 的强度图	8059_8560.pwr2
相干系数图	8059_8560.cc

相位解缠

在归一化的干涉图中只知道干涉相位是 2&pi 的模，这样干涉相位的插值要在确定 2&pi 的正确倍数之前进行。这在相位解缠这个步骤中完成的。ISP 支持两种不同的相位解缠方法，一种是 Rosen *et al.*(1994)提出的使用枝切区域增长的方法，一种是使用最小成本流（MCF）和不规则三角网（TIN）的方法。因为后一种方法需要人工参与的成分很少，所以多数情况下都使用后者。ISP 中主要的相位解缠过程包含以下几个步骤：

枝切区域增长相位解缠法的步骤

处理步骤	相关程序
复干涉图的滤波	adapt_filt 或 adf
建立低相干值区域的掩模	corr_flag
建立中子区域的掩模（可选）	neutron
计算残点	residue
通过中子树连接残点	tree_cc 或 tree_gzw
干涉相位的解缠	grasses

在这里，由于低相干值区域（如水体）或者叠掩的原因，图像各部分不是相连的，为了使得相位解缠继续进行，需要在不相连区域建立所谓的桥。使用以下的处理步骤可以完成这项工作，该操作也许需要重复几次：

处理步骤	相关程序
显示未解缠/解缠后的区域	rastree
使用“桥”进行相位解缠	bridge

以下会有更详细的描述。

9. 干涉相位的自适应滤波

在干涉图的相位解缠过程中有两个核心的问题：

a）相位噪声

b）干涉相位的不连续性（由叠掩引起的）。

第一个问题可以通过滤波去除，但是，如果某区域的干涉相位不是常数时，进行滤波的时候要特别注意。ISP 包含了自适应的干涉相位滤波方法：

adapt_filt 8059_8560.flt 8059_8560.flt.sm 750 0.25 1.5

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108 邮编：100083 电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073 手机：13366576603 联系人:牛晓杰 email:niuxj@otitan.com http://www.otitan.com

或

adf 8059_8560.flt 8059_8560.flt.sm 8059_8560.cc 750 .3

滤波后的干涉图和滤波前的干涉图具有相同的格式。程序 *adf* 是对数据的强度谱进行线性滤波，*adf* 中典型的指数值位于 0.2 到 0.5 的范围内。对于相位解缠，估计滤波后的本地纹理质量是必须的。由于在整个图像范围内，滤波的程度是不同的，*adf* 在滤波完成后估计本地相位的标准方差，并将它转换成有效相关系数。相关系数文件通过命令行指定。

10. 低相干区域掩模

由于低干涉相干（低于用于设定的阈值）的区域含有很高的相位噪声，相位解缠并不包含这些区域。这些低相干区域使用以下命令寻找出来：

corr_flag 8059_8560.cc 8059_8560.flt.sm.flag 750 0.25

生成相位解缠标志文件，该文件中包含了低相干区的掩模和其他一些信息。

11. 中子的生成，不含叠掩区域（可选）

解缠代码将中子作为没有电荷的残点，所以，这些点包含在枝切中但对一棵树总的电荷没有贡献。因为只要存在任何没有电荷的残点，产生一个紧密的枝切网络，所以基于图像强度添加中子将会导致叠掩排除在解缠之外。叠掩的检测很简单，将那些后向散射超过平均后向散射某一个用户定义的倍数的区域都认为是叠掩区域：

neutron 8059_8560.pwr1 8059_8560.flt.sm.flag 750 6.0

中子会写到相位解缠标志文件中。

12. 残点的计算

残点是这样一些地方，围绕这些地方的相位差（假设相位差在区间[-&pi &pi]中）的封闭积分是一个非零的值。这些地方将导致相位解缠过程的不连续现象。ISP 使用以下程序标记这些地方：

residue 8059_8560.flt.sm 8059_8560.flt.sm.flag 750

残点也写入到相位解缠标志文件中。

13. 通过中子树连接残点

下一步是正负残点通过中子树相互抵消，使用以下任何程序都可以完成：

tree_cc　8059_8560.flt.sm.flag 750

或

tree_gzw　8059_8560.flt.sm.flag 750

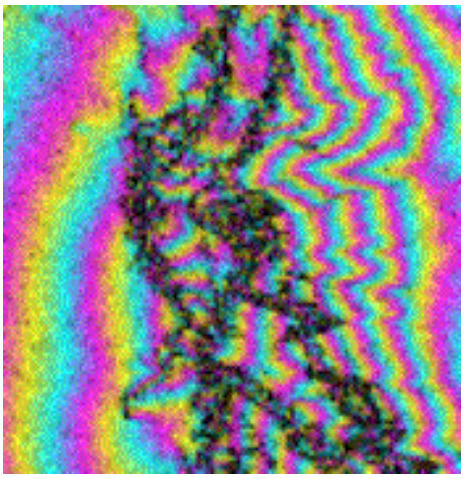
在相位解缠过程中，中子树不相交，所以计算的结果与解缠时所选择的路径有关。

14. 干涉相位解缠

相位解缠从一个用户指定的点开始（缺省的点是图像的中心），在与初始位置连通的整个区域范围内进行区域增长，区域增长的过程中，避免低相干值区域和中子树的交叉：

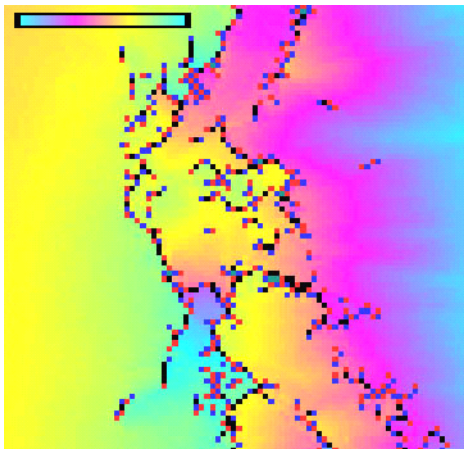
grasses　8059_8560.flt.sm 8059_8560.flt.sm.flag 8059_8560.flt.sm.unw 750

相位解缠标志文件中包含着哪些区域已经经过解缠的信息。解缠后的干涉相位写到一个实数文件中，可以用 *disrmg* 显示该文件。



未解缠的干涉相位图，强度根据干涉相关系数经过了加权处理。
叠掩的地方相干值很低，并且相位不连续现象严重。
每个颜色周期代表了 2PI 相位。

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com



解缠后的干涉相位图，一个颜色周期表示 2PI。残点（+:红色，-:蓝色）和枝切（黑色）也显示在图上。注意到大多数残点都是正负配对的，
残点链出现在叠掩区域

15.不连续区域间桥的建立

通过在解缠后的地点和未解缠的地点建立桥可以解缠哪些与已解缠区域不连通的区域。根据参考的解缠相位和这两个地方预期的 2&pi 倍数偏移量（如果这两个地方高度差不多，你们通常选 0）估计未解缠地点的 2&pi 倍数。为了在解缠和未解缠区域建立桥，使用下列程序生成干涉图相位的 SUN 栅格文件：

rastree 8059_8560.flt.sm 8059_8560.flt.sm.unw 8059_8560.flag 750 1 0 1.0 8059_8560.unw.ras

得到的 SUN 栅格图像可以用以下方法显示：

disrasz 8059_8560.flt.sm.unw.ras

使用这种显示方法可以看到哪些地方已经解缠了（颜色较亮），哪些地方没有（颜色较暗），也可以编辑 ASCII 文件 8059_8560.bridges,该文件的内容如下：

解缠点的列	解缠点的行	未解缠点的列	未解缠点的行	2&pi 内的相位偏移
640	45	600	48	0
100	630	80	630	0

16. 不连续地区的解缠

用桥来解缠不连续地区的相位:

bridge8059_8560.flt.sm 8059_8560.flt.sm.flag 8059_8560.flt.sm.unw 8059_8560.bridges 750

使用新桥解缠其他不连续区域可以重复同样的步骤。

最小成本流（MCF）相位解缠的步骤：

基本步骤非常短：

处理步骤	相关程序
复干涉图的滤波(可选)	adapt_filt 或 adf
生成有效相位解缠掩模（可选）	rascc_mask
使用 MCF 和 TIN 进行相位解缠	mcf

但是，通常情况下，为了使得计算结果更加稳定、高效和精确，使用下列流程：

处理步骤	相关算法
复干涉图的滤波和多视处理（可选）	adapt_filt, adf, 或 multi_cpx
生成有效相位解缠掩模（可选）	rascc_mask
自适应地减少有效相位解缠掩模的样本(可选)	rascc_mask_thinning
使用 MCF 和 TIN 进行相位解缠	mcf
权重插值以消除解缠后的相位图中的断裂	interp_ad
使用插值后的解缠相位去解缠初始干涉图	unw_model

下面将详细介绍这些步骤。

9.干涉相位图的自适应滤波

和用枝切法进行相位解缠一样，该方法中也使用滤波来减少复干涉相位图中的相

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083 电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

位噪声。多视处理是另外一种达到该目的的方法，它还具有另外一个优点，就是它能够大大减少样本的数目。当然，多视处理的最大的缺点就是取样数减少了。在低相干值区域，这是可以接受的，而在相位梯度很大的地方，这种处理方法是很有问题的：

adapt_filt 8059_8560.flt 8059_8560.flt.sm 750 0.25 1.5

或

adf 8059_8560.flt 8059_8560.flt.sm 8059_8560.cc .3

或

multi_cpx 8059_8560.flt 8059_8560.off 8059_8560.flt2 8059_8560.off2 2 2

10.有效相位解缠掩模的生成

有效相位解缠掩模是一个 SUN 或者 BMP 格式的文件，以 NULL(0,0,0)表示那些在 MCF 相位解缠中不予考虑的象元。可以使用程序 rascc_mask 生成该掩模。使用的是一个浮动类型的文件，如相干系数图，如果图中的值小于某一指定的阈值，那么在输出的栅格文件中设置成 NULL（0，0，0）。有效性掩模的使用是可选的，一般用于相位噪声非常高的数据，如长期差分干涉过程中：

rascc_mask 8059_8560.cc 8059_8560.pwr 750 1 1 0 1 1 0.25 0.1 0.9 1. .35 1 8059_8560.mask.ras

11.自适应地减少有效相位解缠掩模的采样

可以使用程序 rascc_mask_thinning 减少相位解缠有效性掩模的空间采样。在连续相位解缠中使用的点可以通过对相位变化（噪声，梯度）采用自适应的方法加以减少。在相位变化较低的地方，稀疏地进行采样，这样可以增加 MCF 相位解缠算法的效率。这一步是可选的：

rascc_mask_thinning 8059_8560.mask.ras 8059_8560.cc 750 8059_8560.mask_thinned.ras 5 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7

12.使用最小成本流（MCF）和 TIN 进行相位解缠

使用程序 *mcf* 解缠滤波后的干涉图。程序中使用了有效性掩模，并且该掩模经过了样本缩减，每一个小块都经过了这些处理步骤。程序会提示该小块所需的内存空间，如果所需的内存空间比计算机可用的内存大，建议减少块的大小，否则优化过程将会非常费时（如果使用交换空间的话）。解缠后的干涉图只在有效掩模非零值的地方才是非零的，因此，该文件命名为 8059_8560.unw_thinned。以下将详细说明这些步骤。

mcf 8059_8560.flt.sm 8059_8560.cc 8059_8560.mask_thinned.ras 8059_8560.unw_thinned 750 1 0 0 - - 1 1 - 325 300 0

13. 使用自适应窗口大小的权重插值以消除解缠后的相位图中的断裂

解缠后的相位图中的断裂可以通过插值的方法填充。使用自适应窗口的插值算法，也就是说，对于小的断裂使用小的窗口，对于大的断裂使用大的窗口。这样可以避免使用单一大小的窗口所引起的不必要的滤波。这些插值的相位可以认为很接近于实际解缠后的相位，至少在（-PI,PI）之间是这样的，因此，对于程序 *unw_model* 来说，它们是可以使用的相位模型：

interp_ad 8059_8560.unw_thinned 8059_8560.unw_interp 750 32 8 16 2

掩模和自适应样本缩减将会导致在 MCF 优化过程中考虑的样本数的大大减少。这样，除效率增益以外，对于相对大一些的干涉图来说，也可以使用全局优化的方法（也就是说不用分块进行处理）。

14. 使用解缠相位模型进行相位解缠

假设在区间（-PI,PI）内相位模型中的相位值与实际的相位值是一致的，那么可以从复干涉图（可以使用滤波或者未滤波的干涉图）计算出解缠后的相位图。获得的解缠后的相位图满足以下条件：解缠相位的重新缠绕将会得到复干涉图中的相位，除了通过参考相位值（这里是 0.0）定义的常数偏移量外，参考相位值表明参考地点的位置（这里是象元 148，213）。

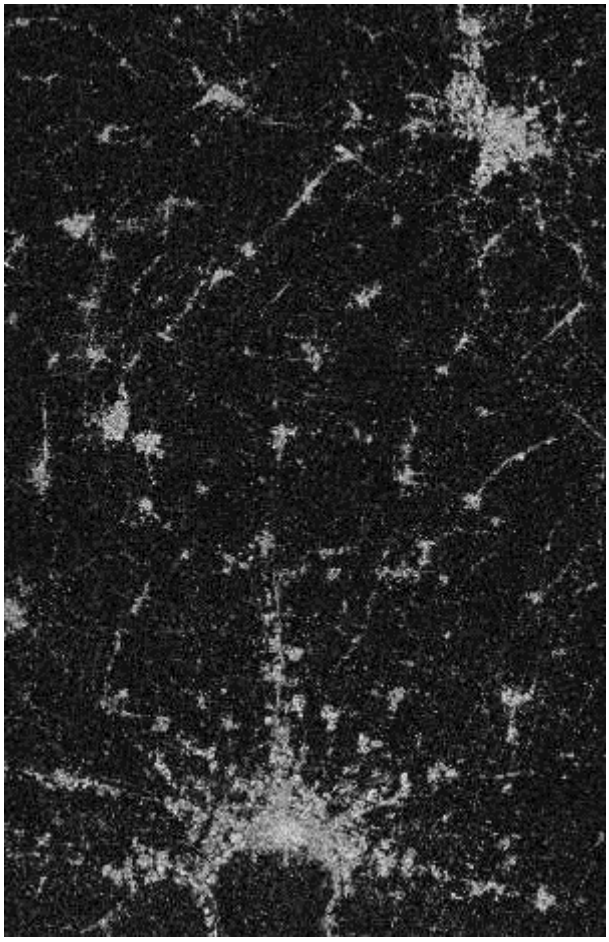
unw_model 8059_8560.flt.sm 8059_8560.unw_interp 8059_8560.flt.sm.unw 750 148 213 0.0

或

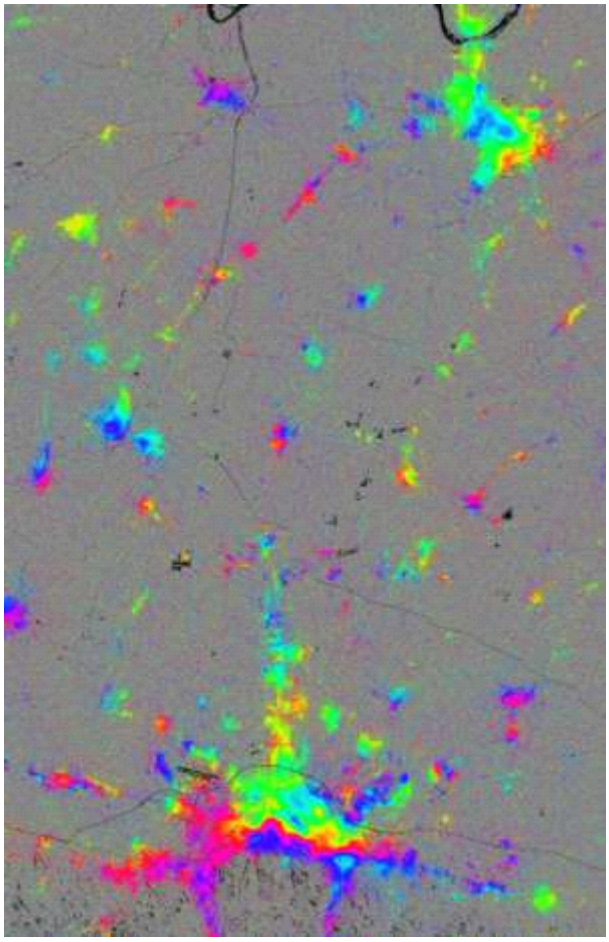
unw_model 8059_8560.flt 8059_8560.unw_interp 8059_8560.flt.unw 750 148 213 0.0

这个过程也适用于拥有极低相干值的长期差分干涉图的解缠，除了人造区域外。以下有一个例子显示以上的过程。

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

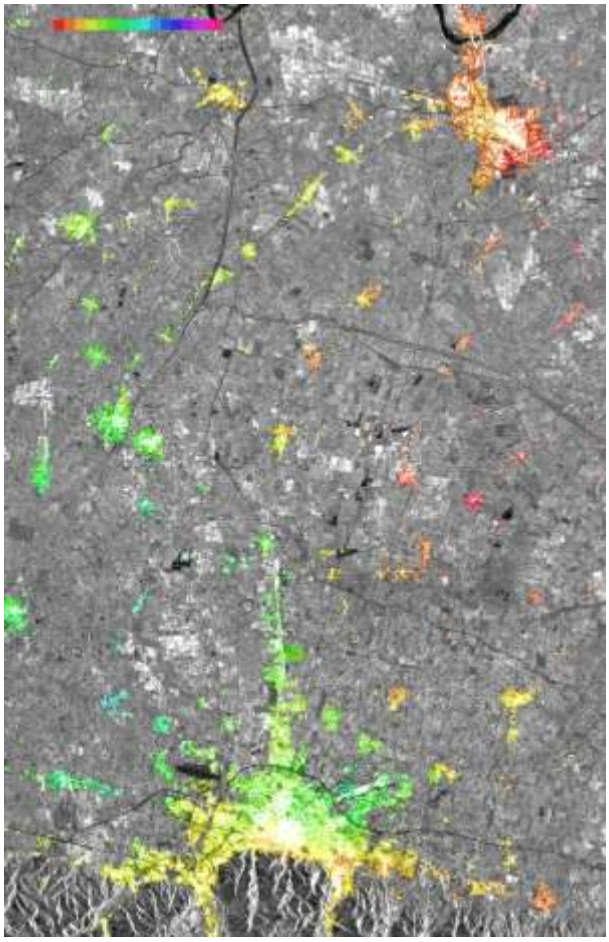


长期差分干涉图的相关系数图（*adf*滤波后），线性灰阶显示



长期差分干涉图的未解缠相位图（*adf* 滤波后），一个颜色周期表示 2PI

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com



长期差分干涉图解缠后的相位（*mcf*程序，用了有效性掩模，没有采用样本缩减步骤），一个颜色周期表示 10PI，图像亮度反映了后向散射的强度。MCF 和基于三角网的技术可以在全局优化中提供高效、自动的相位解缠方法。

高程图

17.干涉基线的最小二乘估计

前面我们从状态矢量或者条纹频率中得到了干涉基线的初始估计。通常，初始的基线估计对于高程的计算是不够的，需要从许多地面控制点中得到更为精确的基线估计，完成这件工作需要 3 步：

a) 生成 SUN 栅格或者 BMP 格式的图像
b) 使用上面生成的图像作为参考选择地面控制点
c) 干涉基线的最小二乘估计

试验区任何 8 位 SUN 栅格或者 BMP 格式的图像都可以用来选择地面控制点。一个有用的例子是是将解缠后的干涉相位和后向散射强度图一起显示出来，可以使用以下的程序实现：

rasrmg 8059_8560.flt.sm.unw 8059_8560.pwr1 750 1 1 0 1 1 0.333 1.0 0.35 0.0 -1 8059_8560.flt.sm.unw.ras

在这个例子中，为了使得图像和地图相匹配，图像显示是左右反转过的，然后，使用下列程序进行地面控制点选择：

gcp_ras 8059_8560.flt.sm.unw.ras -1 > 8059_8560.gcp

这里显示的是 SUN 栅格影像。使用选择鼠标键可以选择地面控制点，相应的高程（从地图中得到）可以写到数据输出窗口。最好选择平地上的地面控制点，而且控制点应均匀分布于整幅图像中，建议选择至少 12 个地面控制点。退出显示窗口意味着将控制点分别写入到标准输出或所指的文件中去。

控制点一旦确定了，相应的解缠后的干涉相位可以从解缠后的干涉图中提取出来，可以使用程序 gcp_phase 将它们和 GCP 坐标一起写入到 GCP 数据文件中：

gcp_phase 8059_8560.flt.sm.unw 8059_8560.off 8059_8560.gcp 8059_8560.gcp_data 5

然后使用下列程序得到干涉基线的最小二乘估计：

base_ls 8059.slc.par 8059_8560.off 8059_8560.gcp_data 8059_8560.base 1 4

最小二乘估计的要求非常高的，并不总是能够得到想要的结果，所以，建议观察写到屏幕上的质量控制信息。不能得到结果的原因有：

－基线的初始估计不好
－控制点选择的不好
－最小二乘拟合时定义了太多的自由参数
－相位平均只在很小的一个区域内进行

以上提到的所有四个问题在 ISP 的不同应用中都会遇到。

18. 高程和地面范围的相干估计

高程和地面范围的相干估计，需要解缠后的干涉相位和一个好的基线估计，使用以下程序完成估计：

hgt_map 8059_8560.flt.sm.unw 8059.slc.par 8059_8560.off 8059_8560.base 8059_8560.hgt 8059_8560.gr

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108 邮编：100083 电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073 手机：13366576603 联系人:牛晓杰 email:niuxj@otitan.com http://www.otitan.com

得到的斜距/方位向坐标系下的高程图可以用以下程序显示出来：
dishgt 8059_8560.hgt 8059_8560.pwr1 750。

正射校正

19.将干涉高程图重采样到正射坐标下

使用干涉高程和地面范围的几何信息，可以将以 SAR 坐标（斜距/方位向）给出的高程和地面范围重采样到正射坐标系下（沿轨，交轨）。另一数据集，通常是两幅后向散射强度图中的一幅，也重采样到正射坐标系下：
res_map 8059_8560.hgt 8059_8560.gr 8059_8560.pwr1 8059.slc.par 8059_8560.off 8059_8560.rhgt 8059_8560.rpwr1

使用下列程序生成重采样后的高程图的 SUN 栅格文件：
rashgt 8059_8560.rhgt 8059_8560.rpwr1 750。

使用下列程序可以生成 SUN 栅格格式文件的晕渲图：
rasshd 8059_8560.rhgt 750 20. 20.
或
rashgt_shd 8059_8560.rhgt 8059_8560.rhgt 750 20. 20.

4 GAMMA 差分干涉和地理编码软件（DIFF&GEO）

GAMMA 差分干涉和地理编码软件（DIFF&GEO）是一系列程序的集合，这些程序主要用于 SAR 数据差分干涉处理，和距离－多普勒坐标系、地图投影坐标系之间的地理编码。之所以将这两个如此不同的处理模块放在一个软件包中是考虑到在进行 2 轨差分干涉的时候需要用到地理编码的功能。利用 DIFF/GEO 中的程序可以完成：DEM 数据到 SAR 距离－多普勒坐标系的转换，SAR 坐标系到地图坐标系的转换，强度图像之间偏移量的精确测定和这些偏移量的多项式模型的计算，干涉相位的模拟，干涉图的线性组合，干涉图的叠加，生成一幅图像投影到另一幅图像的查找表，以及使用该查找表将一幅图像重采样到另外一幅图像的几何坐标系内。

4.1 地理编码

地理编码是图像坐标系统之间的转换，在这里是指 SAR 距离－多普勒坐标系和正射地图坐标系之间的转换。将成像系统获得的信息(如从成像系统得到的 SAR 图像和产品)和地图坐标系信息（如数字高程模型、土地利用清单、从光学遥感中获得的地理编码信息，等等）结合起来是地理编码过程必须要完成的工作。SAR 图像点（象元）的位置是围绕传感器速度矢量的一个特定的圆形区域，该区域与多普勒圆锥球体具有恒定的交叉范围。考虑到该 SAR 系统是右侧视还是左侧视，以及该圆形区域与地面之间的交叉部分，可以决定目标的位置和观测矢量。

在这里，我们区分椭球体校正的地理编码和地形校正的地理编码，相对应地，从 SAR 转换到地图坐标系下的产品分为地理编码椭球校正产品（GEC）和地理编码地形校正产品（GTC）。GEC 产品的生成不需要数字高程模型（DEM），而生成 GTC 产品必须有 DEM 的支持。DEM 或是地图投影坐标系，或是 SAR 坐标系。地表形态对观测矢量确实有一定的影响。

地理编码过程中涉及到的三个步骤为：（i）几何变换的初始假设，（ii）几何变换的改进，（iii）将一个坐标系统重采样到另一个坐标系统。

我们使用查找表来描述几何变换。对于一个坐标系统中的每一个图像点来说，查找表中包含了它在另外一个坐标系中的坐标。为了优化地理编码的精度，这里使用的是实数而不是整数。对于每一个象素来说，查找表中存储了一个复数数字（fcomplex 格式），其中实部对应于 x 坐标（分别表示列/距离向/东/经度），虚部对应于 y 坐标（分别表示行/方位向/北/纬度）。

这里使用了两种类型的查找表。一种查找表与 SAR 坐标系下的图像的维数一致。

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

对于 SAR 图像中的每一个象素，查找表中存储着对应于地图坐标系的一对实数数字，也就是说，对应于地图投影下的目标位置的行列数。第二种查找表与地图坐标系的维数相同。对于地图坐标系下的每一个象素而言，查找表存储了 SAR 距离－多普勒坐标系下的一对实数数值，也就是说，对应于目标位置的 SAR 图像中的行列数。

一个坐标系的查找表已给定，将这个坐标系转换到查找表值的坐标系统，这样的几何转换称为前向转换。在前向转换中，输入数据和查找表具有相同的维数，亦即具有相同的行列数。在决定输出象元位置上的转换值时需要用到插值运算，该运算是基于不规则间隔数据的。程序 geocode 支持前向转换。

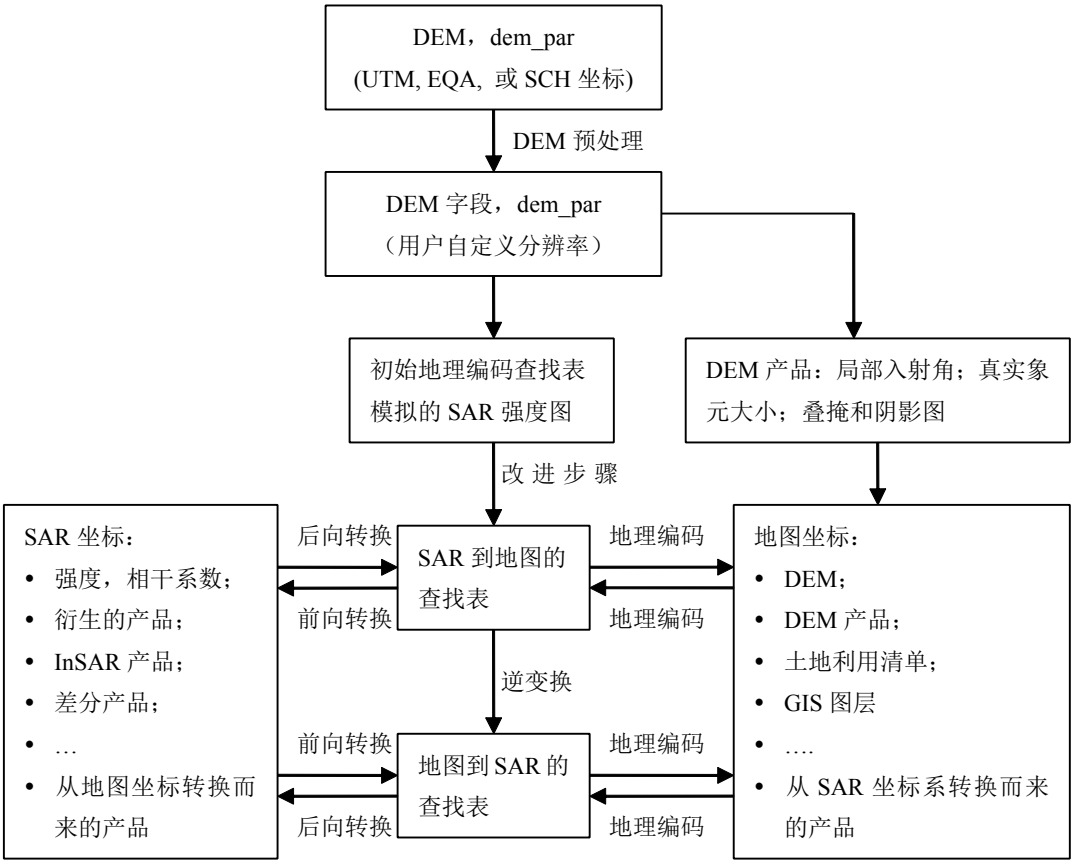
从查找表值的坐标系转换到另一坐标系统，该系统的查找表已知，这样的几何转换方法叫做后向转换。在这里，输出数据和查找表具有相同的行列数。在决定输出象元位置上的转换值的时候用到插值运算，该运算是基于不规则间隔数据的。后向转换比前向转换更加高效。后向转换更加容易，所以也就更好控制，从而效率更高。程序 geocode_back 支持后向转换。

重采样步骤中，建议不要改变图像的空间采样分辨率。这样做是为了确保充分取样。当然也有其他的因素在里面。将 SAR 图像从高分辨率重采样到低分辨率的时候，信号噪声水平非常的高。最好先进行多视处理或者滤波，从而将空间分辨率降低到与采样后的输出图像的分辨率相同水平上。如果输出的空间分辨率比输入的空间分辨率高很多，那么在没有其他信息的情况下地理编码的效率将会大大减少。在这种情况下可以先采样到一个低的分辨率，然后再过采样到所要求的高分辨率上。

由于 SAR 特殊的程序几何关系，会发生诸如叠掩和阴影之类的效应。在叠掩的情况下，地面和可能的目标位置之间的交叉不止一次，也就是说，几个位置都对一个信号产生贡献。有几个不同的方法来处理这个问题。在 GAMMA 软件中，用户可以选择以下的任意一项：（a）将叠掩和阴影区域设置成无值；（b）保留实际的值，亦即假设地图上不同的位置都具有相同的 SAR 值；（c）在叠掩和阴影区域插值。

4.1.1 地理编码的流程

下图是典型的地理编码的流程图。



地理编码的流程

4.1.2 地图投影和 DEM 的格式

绘图部门使用很多不同的投影坐标系。GAMMA 为了能兼容现有的地图投影，支持以下列出的不同投影：

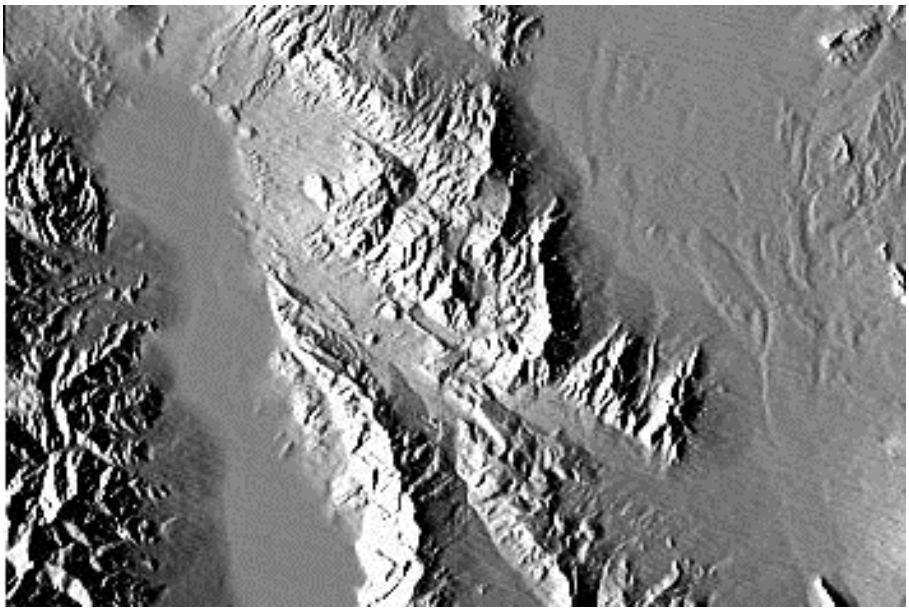
EQA	等角坐标系（纬度/经度）
UTM	通用横轴墨卡托投影
TM	横轴墨卡托投影
OMCH	斜轴墨卡托投影（瑞士）
LCC	Lambert 正形圆锥投影（法国）

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

PS	Polar Stereographic 投影
SCH	JPL SAR 坐标系统
PC	多圆锥投影
AEAC	Albers 等积圆锥投影
LCC2	Lambert 正形圆锥投影，正切方案（法国）
OM	斜轴墨卡托投影
HOM	Hotine 斜轴墨卡托投影

应用中使用的特定的坐标系统是由所谓的 DEM/MAP 参数文件定义的，不同的投影需要不同的参数。dem_par 中给出了每个参数准确的定义和格式。
DEM 的支持格式有（4 字节）浮点型和（2 字节/短整型）整数。

包含了将 DEM 插值到一个用户定义的空间分辨率上的程序（dem_trans）和将该 DEM 显示成晕渲图的程序（disshd，disdem_par, rasshd）。可以使用晕渲图来显示 DEM 和进行质量评价。以下例子显示的是 Death Valley 地区的 UTM DEM（晕渲图）。



Death Valley 地区的 DEM

4.1.3 GEC（椭球体校正）地理编码

椭球体校正地理编码不需要数字高程模型。在创建相应的 DEM/MAP 参数文件（使用程序 create_dem_par），定义了地图几何坐标系后，就可以使用程序 gec_map 确定某一特定地形高程下的地理编码查找表（*.map_to-rdc）。得到的查找表用于 SAR

坐标系统到地图坐标系统的后向地理编码（geocode_back）和从地图坐标系统到 SAR 坐标系统的前向地理编码（geocode）。

可以通过手工选择一些控制点来改进地理编码查找表。通常情况下，在 SAR 图像和地图上使用程序 gcp_ras 来选择控制点。这些控制点可以用来得到一个偏移量配准多项式，然后将该多项式用于改进地理编码查找表（程序 create_diff_par，offset_list_fitm 和 gc_map_fine）。

程序 gec_map_grd 支持地距/方位向坐标系统下的 SAR 图像的椭球体校正地理编码。

4.1.4 提供地图坐标 DEM 的 GTC（地形校正）地理编码

地形校正地理编码必须有 DEM 的支持。如果提供地图坐标系统下的 DEM，那么地理编码需要有以下几个步骤：

（1）使用 create_dem_par 程序生成 DEM/MAP 参数文件。得到初始的地理编码查找表（地图坐标系到距离－多普勒坐标系，*.map_to_rdc），以及基于 DEM 和 SAR 成像几何关系、使用程序 gc_map 模拟地图坐标系下的 SAR 强度图。

（2）使用程序 geocode 将模拟的 SAR 强度图从地图坐标重采样到距离－多普勒 SAR 坐标系下，以便进行基于初始地理编码查找表的前向转换。

（3）模拟的强度图和实际的 SAR 图像强度图之间的精确配准（create_diff_par, init_offsetm, 和 offset_fitm）。然后，DIFF 参数文件中的偏移量配准多项式将用于改进地理编码查找表（gc_map_fine）。

（4）该步骤可选。使用程序 gcp_ras 从 SAR 图像和地图中手工选择一些控制点，用于决定 DIFF 参数文件中的偏移量配准多项式（create_diff_par, offset_list_fitm）。

（5）最终改进的查找表（*.map_to_RDC）用于 SAR 坐标系到地图坐标系之间的后向地理编码（geocode_back），和地图坐标系到 SAR 坐标系之间的前向地理编码（geocode）。

（6）程序 gc_map_grd 支持地距/方位向坐标系下的 SAR 图像的地形校正地理编码。

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

4.1.5 基于干涉高程估计（SAR 坐标系下）的 GTC（地形校正）地理编码

基于 SAR 距离－多普勒坐标系下的高程信息（该高程可以是从 SAR 干涉测量获得的）进行地形校正地理编码需要以下几个步骤：

（1） 使用 create_dem_par 创建 DEM 参数文件来定义地图坐标系下的几何关系。

（2） 基于 SAR 坐标系下的高程信息得到地理编码查找表（距离－多普勒坐标系到地图坐标系，*.rdc_to_map,使用程序 gc_insar）。最终的查找表用于 SAR 坐标系到地图坐标系的前向地理编码（geocode）和地图坐标系到 SAR 坐标系的后向地理编码（geocode_back）。注意，该查找表（*.rdc_to_map）和用地图坐标系下的 DEM 进行地理编码得到的查找表(*.map_to_rdc)是不同的。

4.1.6 地理编码查找表

初始的地理编码查找表是基于地图坐标系下的高程信息和 SAR 成像几何关系下的参数计算得到的。去偏或没有去偏的多普勒几何坐标系下的数据都可以进行地理编码。查找表是复数形式的，它的维数和地图坐标系的数据文件的维数相同，每一个值都对应着相应的 SAR 坐标系（实部＝列数，虚部＝行数）。

由于 SAR 成像几何上认识的局限（轨道位置的精确定位只能达到一定的精度），初始的查找表并不是完全准确的，结果是，根据轨道数据的精度不同，使用初始查找表进行地理编码会导致几个象素的误差。在改进步骤中，可以决定原始数据和与该原始数据位于同样坐标系统下的另一数据集相对应位置之间的配准偏移量。一种决定该配准偏移量（初始查找表的地理编码误差）的方法是将地理编码的 SAR 图像和地形图一起进行目视解译。

为了避免用户进行冗长和大量的地面控制点选取工作，软件中使用了以下更为有效和精确的方法。基于 DEM 和 SAR 成像几何关系，模拟了 SAR 强度图。该强度图和真实 SAR 图像之间的配准偏移量可以使用交叉相关分析的方法自动得到。

任何一种方法（手工选择控制点或者自动的交叉相关分析方法）所得到的配准偏移量用在距离和方位向的双线性函数模型中，再应用于初始的地理编码查找表，从而改进地理编码查找表（代表了完整的几何变换，亦即初始地理编码和精确配准）。改进后的地理编码查找表用于一次性地将一个坐标系统的数据编码到另一个坐标系统中，优点在于只需要进行一次重采样和插值。这时就再也不需要初始查找表了。

如果没有 DEM，可以使用常数高程值来代替 DEM，也就是说，生成的是地理编

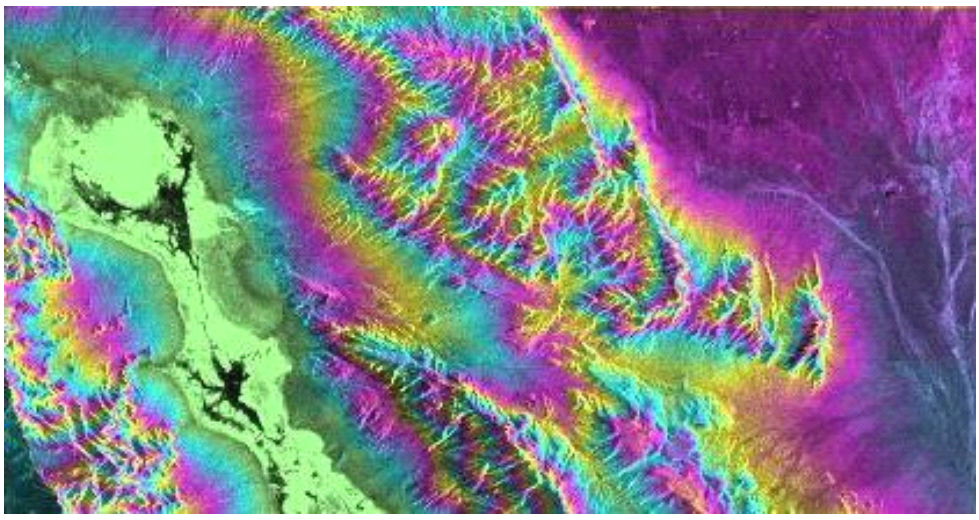
码椭球体校正（GEC）产品。

4.1.7 前向转换

前向转换是从已知查找表的坐标系转换到查找表值下的坐标系。在这种情况下，输入数据和查找表具有相同的维数，亦即行列数。在决定输出象元位置转换后的值的时候需要进行插值运算，该插值运算是基于不规则间隔数据的。最近邻或者其他插值算法都可以用作数据的重采样。

前向转换支持实数数据（4 字节浮点型，如强度图、相干系数图和高程图等等），复数数据（4 字节浮点型的数据对，如复干涉图和复差分干涉图），无符号字符型数据（如相位解缠标志文件和叠掩、阴影图），以及 SUN 栅格格式的图像数据（如视图产品、分类结果等）。

前向转换实例：从 UTM 坐标系到 SAR 坐标系的 DEM 重采样（Death Valley）。一个颜色周期对应于高度是 512 米。



前向转换实例

4.1.8 后向转换

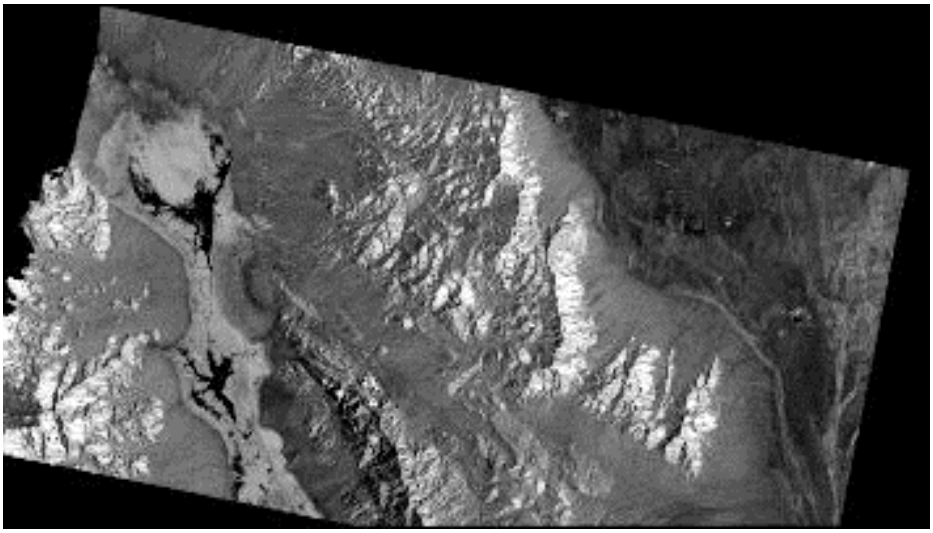
后向转换是从查找表值所在的坐标系转换到查找表给定的坐标系中。在这里，输出数据的维数和查找表的维数相同。在决定输出象元位置转换后的值的时候需要进行

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

插值运算，该插值运算是基于不规则间隔数据的。因此，后向转换比前向转换更快。可以选择最近邻、样条、双线性插值算法进行数据的重采样。

后向转换支持实数数据（4 字节浮点型，如强度图、相干系数图和高程图等等），复数数据（4 字节浮点型的数据对，如复干涉图和复差分干涉图），无符号字符型数据（如相位解缠标志文件和叠掩、阴影图），以及 SUN 栅格格式的图像数据（如视图产品、分类结果等）。

后向转换实例：Death Valley 地区的 ERS SAR 强度图的地理编码（UTM 坐标）。



后向转换实例

4.1.9 地理编码查找表的逆变换

为了提供更大的灵活性，软件中包含了一个进行地理编码查找表逆变换的程序。逆变换后的查找表和目标坐标系具有相同的维数。如果使用地图坐标系下的 DEM 生成一个查找表*.MAP_to_SAR, 那么逆查找表 SAR_to_UTM 和 SAR 数据文件具有相同的维数，每一个复数值包含着相对应的地图坐标。

逆变换程序在地理编码中具有很大的灵活性。后向转换比前向转换更加快速，因此，查找表的逆变换可以帮助节省更多的处理时间。因为查找表逆变换过程中所必需的重采样和插值方法可以去除噪声，所以使用逆变换查找表进行最近邻重采样（强制用于 SUN 栅格文件和无符号字符型格式文件），效果会更好。

4.1.10DEM 相关的产品

列在下表中的 DEM 产品是从地图坐标下的 DEM 和 SAR 成像坐标系下的参数中计算得来的。

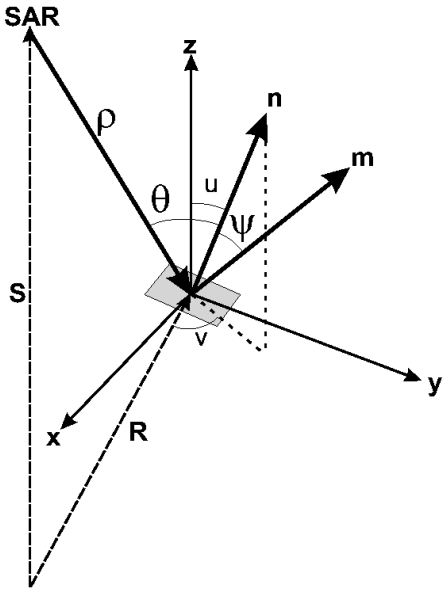
sim_sar	地图坐标系下的模拟 SAR 强度图
u,v	本地地面法线的球面坐标
Theta	本地入射角
Psi	投影角
Pix	象元大小归一化因子
Ls_map	叠掩和阴影图

将本地地面法线 n 与雷达观测矢量&rho 的反方向之间所夹的角度定义维本地入射角&theta。将本地地面法线 n 和图像平面的法线 m（见后面的定义）之间所夹的角度定义为投影角&psi。图像上的一个象元所接收到的信号是由地面上一定区域贡献的。由于地形的影响，该区域的大小并不是恒定的。

由于地形引起象元大小的变化，从而导致后向散射的变化，象元大小归一化因子就是用来归一化后向散射系数。本地地面法线的球面角 u 和 v 描述了本地法线矢量的方向。在这里，我们区分真实叠掩和包含真实叠掩的叠掩。真实叠掩是指&psi>90.0 的区域。包含真实叠掩的叠掩中不仅有真实叠掩，还含有那些斜距在真实叠掩的斜距间隔范围（在相同的方位向）的区域。

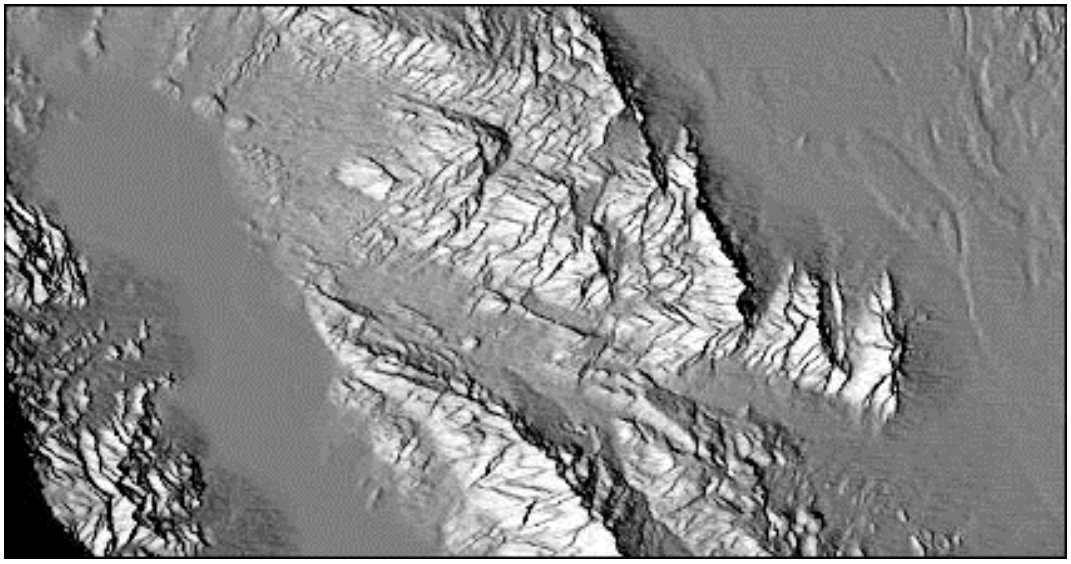
成像过程中的不同角度和矢量的几何关系如下图显示：

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com



成像几何关系图

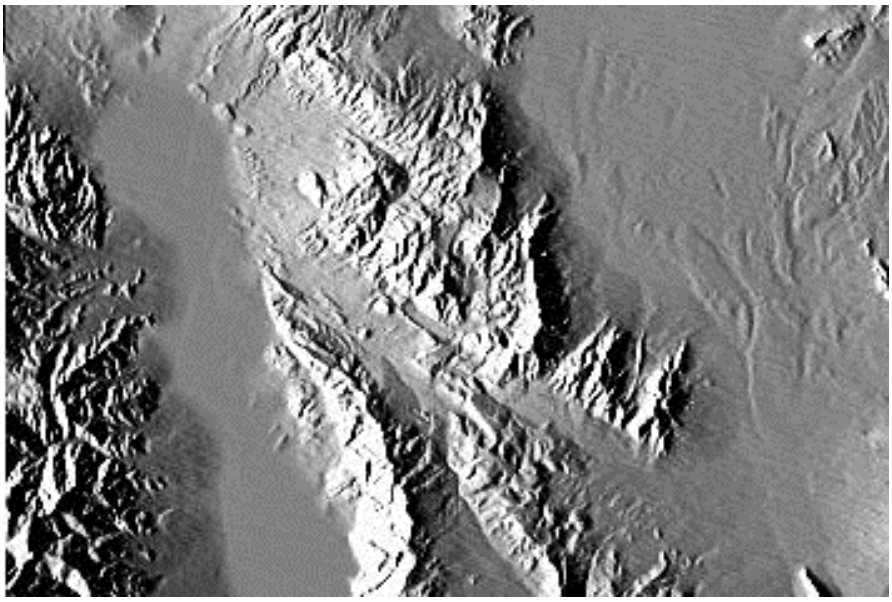
以下显示的是 Death Valley 试验区象元大小归一化的例子（在 SAR 坐标系下）。



SAR 坐标系下的象元大小归一化（Death Valley 地区）

4.1.11 从 DEM 中模拟 SAR 强度图

可以从地图坐标系下的 DEM 中模拟 SAR 强度图，以用于上述的自动精确配准。



从 DEM 中模拟的 SAR 强度图（Death Valley 地区）

4.2 多源图像配准

两个数据集的配准使得联合解译该数据变得更容易。作为软件的一部分，软件中包含了两个将两个相似但不同的坐标系配准到同一个坐标系中的工具。能够处理的 SAR 数据可以是来自不同的频率、入射角和轨道，可以是地理编码的星载 SAR 数据和具有相似分辨率的光学影像（如 Landsat TM， ASTER）。软件支持基于实数或复数数据的自动精确配准和基于用户选择的同名点的手工精确配准。

在地理编码过程中，由于轨道数据的不完善，经过初始查找表地理编码后的图像仍然存在着微小的偏差，在进行精确配准时，这一配准步骤是必要的。

在差分干涉中，这个配准步骤要求：

－模拟的多视 SAR 强度图与真实的多视 SAR 强度图之间的配准（2 轨差分干涉）；

－两幅解缠后的相位图之间的配准（4 轨差分干涉）。

将实数或复数数据配准到同样的坐标系上包含了两个注意步骤。第一步是决定配准函数，第二步是应用配准函数将数据重采样到一个共同的坐标系上。在自动精确配准方法中，配准函数是在初始偏差估计的时候决定的，然后对大量的图像块进行交叉相关分析，从而决定双线性配准偏移量多项式。手工精确配准方法更加灵活，它使用了相似参考数据集，如地形图。在第一步中，用户选择同名点，决定这些同名点配准的偏移量。这些值用于计算双线性配准偏移量多项式。

一旦知道了配准方程，实数或复数的数据集就可以重采样到参考坐标系上去了。

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108 邮编：100083 电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073 手机：13366576603 联系人:牛晓杰 email:niuxj@otitan.com http://www.otitan.com

对于实数数据的插值，用户可以选择 sinc 插值算法或者最近邻算法。对于实数数据集，更偏向于使用最近邻方法，因为实数数据集中可能含有一些空值，如解缠后的相位图，由于在相位解缠过程中，没有得到解缠后的相位，有些区域就被设置成了 NULL 值。对于绝大多数其他情况，使用 sinc 插值算法会更好。对于复数数据，最近邻、sinc 和双二次样条插值算法都可以。

4.3 差分干涉

用来进行差分干涉的两幅图像之间所产生位移变化，以及地形情况都对干涉相位产生很大的影响。差分干涉处理的基本思想是分离出这两个因素，尤其是获得相对位移图，可以通过减去地形相关的相位达到这一目标。地形相关的相位可以从传统的 DEM 中计算出来，也可以从独立的干涉像对中得到，该像对中不能含有由于相对位移而引起的相位分量。

根据观测区 SAR 数据和数字高程模型（DEM）能否获取的情况，可以有几种不同的解决方法。以下列出了 DIFF 模块支持的差分干涉处理方法以及相应所需要的输入数据情况。

差分干涉方法	要求的数据集
2 轨差分干涉	INSAR 图像对和 DEM
3 轨差分干涉	三幅 INSAR 图像
4 轨差分干涉	2 个 INSAR 像对
复干涉图的联合分析	2 个 INSAR 像对

实际应用中，某一方法是否需要进行地理编码和相位解缠是很重要的。下表列出了 DIFF 支持的差分干涉处理方法是否需要进行地理编码和相位解缠的情况。

差分干涉方法	地理编码	相位解缠
2 轨差分干涉	需要	不需要
3 轨差分干涉	不需要	需要
4 轨差分干涉	不需要	需要
复干涉图的联合分析	不需要	不需要

DIFF/GEO 软件包中提供了灵活的程序完成的特定任务。所提供的命令脚本文件支持 2 轨、3 轨和 4 轨差分干涉的处理。对于特定的处理步骤，软件提供了多种选择：图像的配准多项式可以从实数图像对中估计，也可以从复数图像对中估计；不管是实数数据集还是复数数据集都可以进行配准，也就是说，重采样到一个共同的参考坐标系上去；实数数据集的重采样可以用最近邻方法，也可以使用 sinc 插值算法；包含差分位移相位效应（与地形引起的相位重叠在一起）的干涉纹图可以在生成差分干涉纹图之前进行解缠，也可以在这之后解缠, (前一种方法得到的结果就是解缠后的差分相位，后一种方法得到复差分干涉纹图，减去地形相位后，再进行滤波和解缠)；由于基线估计的不准确，差分干涉图中会显示一些整体的相位趋势，该相位趋势可以通过最小二乘法调整参考相位图的缩放因子去除，也可以使用快速傅立叶变换的方法估计整体相位趋势，从而从复差分干涉图上消除掉该相位趋势。

4.3.1 2 轨差分干涉

2 轨差分干涉需要的数据有干涉像对和 DEM。DEM 的坐标可以是地图投影坐标系，也可以是 SAR 图像的斜距－方位坐标系。

2 轨差分干涉的基本思想是从 DEM 中模拟参考干涉图（该干涉图的相位信息来源于地面地形）。为了达到这个目的，首先需要将 DEM 从原始的坐标系统转换到参考 SAR 图像坐标系。该过程分为两步：第一步，根据已有的 DEM 和 SAR 图像坐标系信息进行几何转换，同时，在这一步中，基于本地象元分辨率和入射角模拟了 SAR 强度图。由于 DEM 坐标、轨道数据和几何转换过程中的微小误差所产生的不准确性，会导致模拟的 SAR 影像和实际的 SAR 图像之间产生小的偏差。第二步中，估计模拟 SAR 影像和真实的 SAR 影像之间的偏移量，然后，利用该偏移量将转换后的 DEM 配准到 SAR 图像坐标系下。

基于参考 SAR 坐标系，可以计算干涉基线模型、高程图，以及由于地形效应产生的、解缠后的干涉相位图。后面，将由地形产生的相位称为地形相位。地形相位可以从复干涉图中减去（得到复差分干涉图），也可以从解缠后的相位图中减去（得到解缠后的差分相位图）。注意，地形相位中并没有消除地球椭球相位，所以在去除地形相位的时候，必须使用干涉图。如果使用的是解缠后的相位，那么可以不去除地球椭球相位进行干涉处理（推荐在小基线处理时使用），也可以将去除的相位趋势加回到解缠后的相位上来。ISP 程序 ph_slope_base 支持后一种方法。

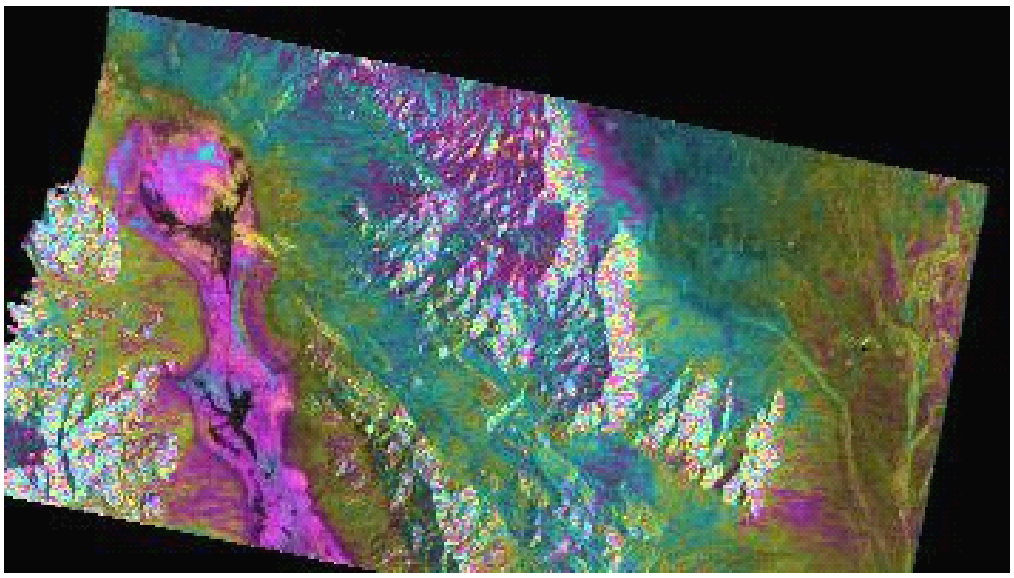
我们的经验显示已有的基线信息，尤其是从轨道数据中计算出来的信息，精度并

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

不是足够的高。可以通过最小二乘法拟合模拟的和真实的解缠后相位图，从而提高模拟的解缠后的相位图的拉伸精度。注意，对于消除了地球椭球体相位趋势的数据，这种方法也许并不合适。这时，利用最小二乘法决定增强后的相位拉伸函数的这种技术只对那些基于解缠后相位的进行处理的方法有效。不管怎样，基于复干涉图进行处理的方法所得到的复差分干涉图的去平地效应是符合双线性相位拉伸关系的。

使用 2 轨差分干涉生成复差分干涉图是非常稳定的。解缠后的差分相位图的好坏主要还是依靠是在参考相位去除之前还是之后进行解缠。特别地，在地势崎岖的地方，差分相位的解缠要比解缠那些既包含地形相位也包含差分效应相位的图像更加容易。

下面是 Death Vellay 地区 2 轨差分干涉的一个例子，一个颜色周期对应 2&pi 差分相位。



4.3.2 3 轨差分干涉

3 轨差分干涉需要三幅 SAR 图像，将其中一幅图像的坐标系统作为参考坐标系，那么在参考图像和另外两幅图像之间将形成两幅干涉图。选择相同图像作为的参考影像确保了生成的干涉产品都具有相同的坐标系，而不需要进行额外的配准和重采样的步骤。

差分干涉的思想在于：在这两幅干涉图中，只有一幅干涉图包含了差分干涉的相位信息，另外一幅是作为参考消除由于地形所引起的相位变化。当然，对于特定的地表形变事件，并不总是能够找到三幅理想的 SAR 图像进行差分干涉处理。除了数据获取这方面的原因以外，电离层和对流层中电磁波的传播延迟性的不同也会对差分干

涉产生影响。

为了优化数据选择，应该记住的是，相对于地形来说，干涉相位的敏感度与 1/B 成正比，其中 B 是视线方向垂直基线的长度。对于视线方向的地表形变来说，干涉相位的敏感度是独立于基线的。结果，地形和形变（包括传播延迟的不同）的相对重要性取决于干涉基线的长度（与视线方向垂直的分量）。如果需要提取地形相位，那么选择图像对时应选择基线长的像对。还有一点需要注意的是，随着基线长度的增加，相位解缠变得越来越困难。所以，为了获得最优的差分敏感度，最小化地形因素的影响，差分干涉时应该选择小的基线。另外，在选择图像时，应选择相干性高的图像。

3 轨差分干涉处理时，根据解缠数据的能力不同，可以使用不同的方法进行处理，主要有以下四种可能性：

情况	差分效应干涉图	参考干涉图（由于地形原因所产生的相位）
1	解缠后相位	解缠后相位
2	解缠后相位	复干涉图
3	复干涉图	解缠后相位
4	复干涉图	复干涉图

在目前的软件版本中，可以完成第 1、3 两种情况的处理。1、3 两种情况主要基于解缠后的参考相位进行处理的，所以需要成功地对参考干涉图进行相位解缠。第 4 种情况下考虑的是复干涉图的联合分析。未解缠的相位必须进行拉伸处理，并且拉伸的比例严格控制在一个很小的整数范围内。拉伸作用主要是为了调整地形和位移两个因素对联合干涉图相位的相对重要性，所以，它在差分干涉处理时具有很大的潜能，特别是在相位解缠失败的情况下。

情况 1：两个干涉图都是经过相位解缠的

情况 1 假设两幅干涉图，亦即由地表形变引起的干涉图和由地形因素引起的参考干涉图都是经过成功解缠的。以下称由于地形所引起的相位未地形相位。如果在干涉处理过程中去除了地球椭球相位趋势（为了使得滤波、平均和相位解缠更容易），这时，需要将地球椭球相位趋势加回到解缠后的相位上去。为了补偿不同基线之间的差异，必须进行相位的拉伸，而这一步是进行正确拉伸所必须的。ISP 中程序 ph_slope_phase 能够完成这一工作。

由于基线的不同（以及由此而产生的、相对于地形的干涉相位敏感性的不同），

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

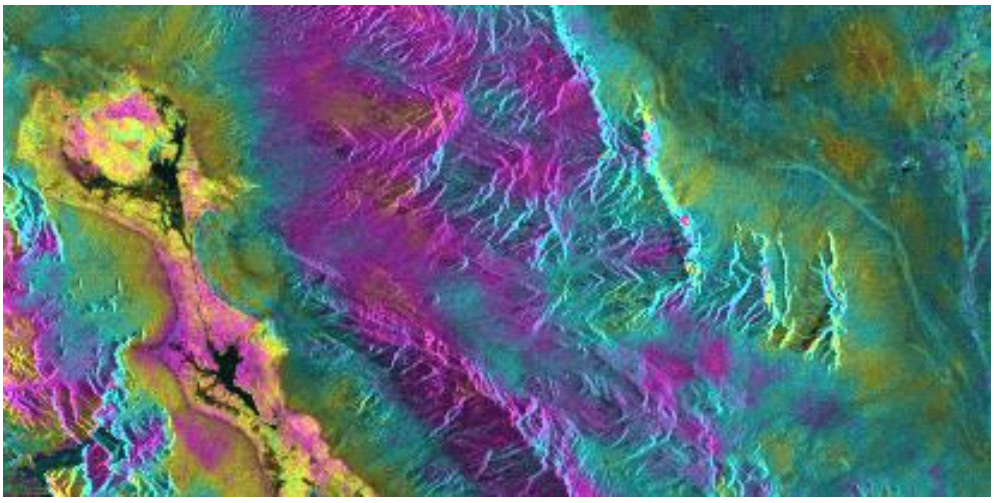
地形相位必须进行拉伸。拉伸因子可以从已有的基线信息中计算获得。我们的经验显示，已有的基线信息，尤其是从轨道数据中计算出来的信息，精度并不是足够的高，所以，可以通过最小二乘法拟合地形相位和形变相位，从而提高地形相位的拉伸精度。注意，这种方法对于那些消除了地球椭球相位的数据也许是无效的。利用最小二乘法决定了拉伸因子之后，要从解缠后的相位图中减去拉伸后的地形相位，所得到的相位差图像对应于解缠后的差分相位。

情况 3：只有参考干涉图进行了相位解缠

情况 3 假设只有参考干涉图（由地形引起的相位图）进行了相位解缠。如果在干涉处理过程中去除了地球椭球相位趋势（为了使得滤波、平均和相位解缠更容易），这时，需要将地球椭球相位趋势加回到解缠后的相位上去。为了补偿不同基线之间的差异，必须进行相位的拉伸，而这一步是进行正确拉伸所必须的。ISP 中程序 ph_slope_phase 能够完成这一工作。

由于基线的不同（以及由此而产生的、相对于地形的干涉相位敏感性的不同），地形相位必须进行拉伸。拉伸因子可以从已有的基线信息中计算获得。我们的经验显示，已有的基线信息，尤其是从轨道数据中计算出来的信息，精度并不是足够的高，结果，在减去拉伸后的地形相位后得到的复差分干涉图仍然表现出整体相位趋势。可以通过二维 FFT 变换可以获得这个整体相位趋势，然后将它去除掉。

情况 3 中所描述的方法要去情况 1 中的方法更稳定，因为只有参考干涉图需要进行相位解缠。下图显示的是 Death Valley 地区的 3 轨差分干涉图，一个颜色周期表示 2PI 干涉相位。



4.3.3 4 轨差分干涉

4 轨差分干涉是基于两个相互独立的干涉图像对（4 幅 SAR 图像）来完成的。4 轨差分干涉与 3 轨差分干涉的方法很相似，唯一的不同点在于，4 轨差分干涉时，两幅干涉图使用了不同的参考坐标系（没有共同的图像）。结果是从参考干涉图（地形因素引起的干涉图）生成的干涉产品（包括复数和实数数据）都需要转换到另一幅干涉图（包含形变信息的干涉图）的参考坐标系上。

差分干涉的思想在于：在这两幅干涉图中，只有一幅干涉图包含了差分干涉的相位信息，另外一幅是作为参考消除由于地形所引起的相位变化。当然，对于特定的地表形变事件，并不总是能够找到四幅理想的 SAR 图像进行差分干涉处理。除了数据获取这方面的原因以外，电离层和对流层中电磁波的传播延迟性的不同也会对差分干涉产生影响。

为了优化数据选择，应该记住的是，相对于地形来说，干涉相位的敏感度与 1/B 成正比，其中 B 是视线方向垂直基线的长度。对于视线方向的地表形变来说，干涉相位的敏感度是独立于基线的。结果，地形和形变（包括传播延迟的不同）的相对重要性取决于干涉基线的长度（与视线方向垂直的分量）。如果需要提取地形相位，那么选择图像对时应选择基线长的像对。还有一点需要注意的是，随着基线长度的增加，相位解缠变得越来越困难。所以，为了获得最优的差分敏感度，最小化地形因素的影响，差分干涉时应该选择小的基线。另外，在选择图像时，应选择相干性高的图像。

将参考干涉图几何转换到另一幅干涉图的坐标系中这一过程包含了两个主要步骤。第一步是决定配准偏移量多项式（将两幅干涉图之间的坐标系在距离和方位向上描述成距离和方位的线性函数），可以先给出偏移量的初步估计，然后给出偏移量多项式的精确估计。这两种估计方法都是基于 SAR 强度图进行运算的。复数交叉相关配准的方法只在两个数据集之间具有很高的相干性的时候可以使用，而基于强度图的配准方法就没有这种限制，因此，基于强度图的配准方法具有很广的应用性和很高的稳定性。一旦配准函数知道了，那么就可以将实数或者复数的数据集重采样到参考坐标系上。对于实数数据的插值，用户可以选择 sinc 插值算法或者最近邻算法。对于实数数据集，更偏向于使用最近邻方法，因为实数数据集中可能含有一些空值，如解缠后的相位图，由于在相位解缠过程中，没有得到解缠后的相位，有些区域就被设置成了 NULL 值。

完成以上步骤以后，就可以按照 3 轨干涉的方法进行处理。根据解缠数据的能力不同，可以使用不同的方法进行处理，主要有四种可能性，这一点也和 3 轨干涉方法相同，详细的处理方法可以参考 3 轨干涉处理步骤。

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

4.3.4 2 轨、3 轨、4 轨差分干涉的优缺点

3 轨差分干涉相较于 2 轨差分干涉的优点是不需要提供 DEM，但是，另一方面，使用 DEM 获得地形相位可以避免相位解缠的问题和由于对流层和电离层造成的地形相位的误差。3 轨差分干涉中两幅干涉图使用了同一个参考坐标系，从而避免了多做一次额外的配准和重采样的工作，这是它相对于 4 轨差分干涉的优点。另一方面，因为 4 轨差分干涉中使用的是两对完全独立的像对，所以在数据选择上具有更多的自由。

4.3.5 复干涉图的联合分析

未解缠的干涉相位，亦即从未进行相位解缠的干涉图中获得的相位信息，可以认为是解缠后相位的 2&pi 模：

$$\phi_{unw} \bmod 2\pi = \phi$$

。

在模拟另一基线情况下得到的干涉图时，需要拉伸干涉相位，我们应该知道原则上解缠后的干涉相位都需要进行拉伸。在拉伸一个正整数或者负整数时，未解缠的相位可以直接拉伸为 2&pi 的 i 倍（i 是未知数），拉伸之后仍然是一个整数。

$$\left(x\phi_{unw}\right) \bmod 2\pi = x\phi + (x \cdot i \cdot 2\pi) \bmod 2\pi \begin{cases} = x\phi & x \in integers \\ \neq x\phi & x \notin integers \end{cases}$$

将未解缠的干涉相位拉伸整数倍之后得到复干涉图，组合分析这些复干涉图有以下几个原因：

－为了在不进行相位解缠和地理编码的情况下进行差分干涉处理；

－为了提高地形的敏感度。

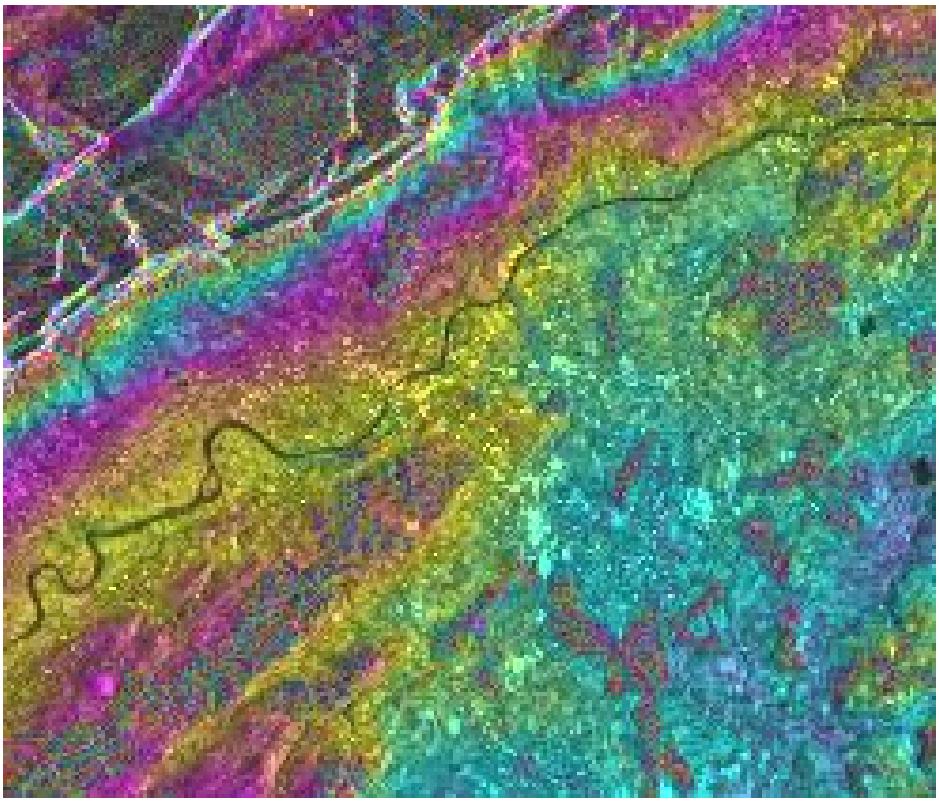
第一种情况下，为了使得组合的复干涉图的相位只包含形变效应，地形的敏感度应尽量降至最低。可以通过将组合的复干涉图的模拟基线减小到某一个非常小的值，从而达到降低敏感度的目的。例如，要使组合干涉图的垂直基线达到 10 米，那么可以通过将垂直基线是 50 米和 160 米的两幅干涉图进行组合得到，此时，未解缠相位的拉伸因子分别是 3 和－1。在这个例子中，组合干涉图解缠后的相位对应于基线是10 米（地形敏感度很小）的地形相位，也就是 3 倍第一幅干涉图的差分相位减去 1 倍第二幅干涉图的差分相位。

第二种情况减少了差分效应中的相位噪声和敏感度，同时增加了地形的敏感度。

减小差分效应的敏感度可以简单地通过增加独立干涉图达到。假设两幅干涉图中不想要的差分效应（主要是大气失真造成的）是独立的，那么这样做就降低这些差分效应。同时，与初始的干涉图相比，增加了组合干涉图的基线。因为每个干涉图的相位噪声都和一个拉伸因子相乘，所以应该选择小一点的拉伸因子。例如，两个具有相同垂直基线的独立干涉图的组合（使用的拉伸因子都是 1），使得组合后的干涉图的模拟基线增加到单个干涉图基线的两倍，而组合干涉图的相位噪声只有单个干涉图相位噪声的 1.4 倍。

Massonnet D., H. Vadaon 和 M. Rossi 在 Reduction of the need for phase unwrapping in radar interferometry, IEEE TGRS, 34-2 pp.489-497,1996 中阐述了相同的技术，但是用途不同。他们的思想是：为了减小相位解缠的需要，生成一个相对较小基线的组合干涉图。

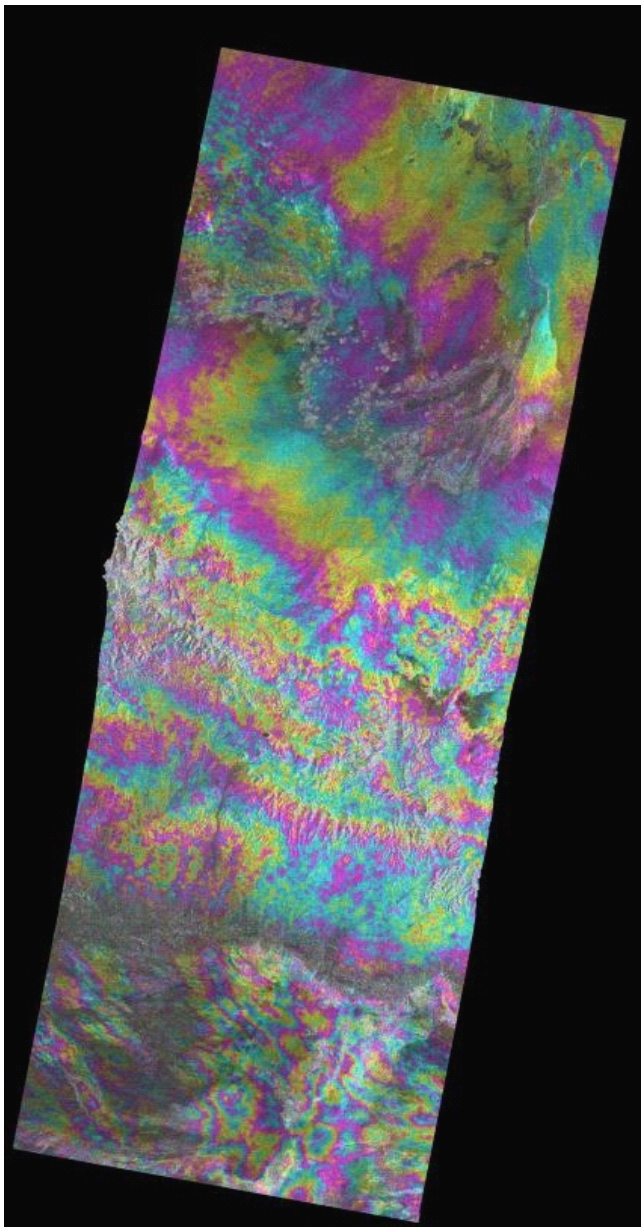
下图是瑞士 Solothurn 地区的组合干涉图，是通过垂直基线是 58 米和 95 米的两幅配准的复干涉图组合得到，使用的拉伸因子分别是 2 和－1。



地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083　电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

4.3.6 ASAR SCANSAR 干涉

因为在同一个地区覆盖次数较多，SCANSAR 数据的干涉在很多干涉应用中都具有很大的潜力。理想情况下，获取同轨 SCANSAR 数据时传感器应在同一个几何位置上，以便使得共同的相位谱不受损失。ESA 现在提供标准的 ASAR 宽幅 SLC 数据。GAMMA 软件能够读取 ESA 的宽幅 SLC 数据，可以将它们整流到 5 个子带数据集。GAMMA 提供了一系列程序，可以完成：从 SLC 数据中生成多视强度图（MLI），将 WSS 数据集重采样到参考 WSS 数据集上，生成多视干涉图。由于单视图像的距离向和方位向的空间采样分辨率相差很大（分别是 20 米和 80 米），将结果进行地形地理编码有助于解译。下图是 SCANSAR 差分干涉图，从 20030921_20040208（IS2，UTM 投影）中得到，图像覆盖范围是方位向 300km，距离向 100km。



地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083 电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com

地址：北京市海淀区北四环中路 229 号海泰大厦 1107-1108　邮编：100083 电话：010-82884071/81/82/83/84/85
传真：86-10-82884073　手机：13366576603　联系人:牛晓杰　email:niuxj@otitan.com　http://www.otitan.com