

用干涉合成孔径雷达技术获取地表三维信息

王 风^{1,2} Veronique PRINET^{1,2} 马颂德¹

¹ (中国科学院自动化研究所 北京 100080)

(E-mail: fwang@nlpr.ia.ac.cn)

² (中法信息、自动化与应用数学联合实验室 北京 100080)

摘 要 干涉合成孔径雷达已广泛应用于产生高精度的数字高度模型、测量地表形变等领域。文中介绍了干涉合成孔径雷达的基本原理和相关领域的历史发展, 并就干涉合成孔径雷达技术的处理过程总结了如何利用干涉合成孔径雷达技术获取地表三维信息。对处理过程中的关键技术-----干涉图像的相位展开处理做了详细讨论, 概括、分析、比较了近年来发表的大量相位展开算法, 总结了各方法的优缺点, 指出了问题所在。最后就国内、外在未来研究与应用方面的发展趋势及前景做了简要论述。

关键词 合成孔径雷达, 数字高度模型, 干涉图像, 相位展开

Topographic Information Acquisition Using Interferometric Synthetic Aperture Radar Technique

WANG Feng^{1,2} PRINET Veronique^{1,2} MA Songde¹

¹(*Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

(E-mail: fwang@nlpr.ia.ac.cn)

²(*Sino-French Joint Laboratory of Information, Automation and Applied Mathematics, Beijing 100080*)

Abstract Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) techniques have been widely used to generate accurate digital elevation model (DEM), and to measure displacement of the earth's surface. In this paper, main principle and development of InSAR are simply described. How to obtain the 3D terrain information using InSAR technique is summarized according to InSAR processing. Phase unwrapping for interferometric images is the most important and difficult step in the processing chain, different algorithms published recently are compared, their advantage and disadvantage are analyzed here. The potential development in theory research and application is discussed.

Key Words Interferometric Synthetic Aperture Radar(InSAR), digital elevation model (DEM), interferometric images, phase unwrapping

1 引言

遥感 (Remote Sensing) 是根据不同物体对电磁波的吸收和反射的不同特性来探测地表物体的信息, 完成远距离识别物体的。遥感的实现需要能发射和接收电磁波的传感器 (如航空摄影机、雷达等) 及运载传感器的遥感平台 (如卫星、飞机、气球等)。我们这里所说的合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, 简称 SAR) 是一种主动的机载或星载传感器。它的基本原理是: 卫星在轨道飞行中, 于不同位置定时地对同一地物发射电磁波脉冲信号, 同时接收回波信号, 在某种意义上, 可以认为是延伸了雷达天线的长度, 从而大大提高了分辨率。另外, 由于合成孔径雷达还具有全天时、全天候、不受大气传播和气候影响、穿透力强等优点, 因此在民事和军事方面的应用非常广泛。1978 年第一颗合成孔径雷达卫星 Seasat 成功地实施了合成孔径雷达对地观测, 之后美、日及欧洲各国相继利用星载合成孔径雷达技术进行以军事侦察、资源调查、环境监测为目的的对地观测。

将干涉技术 (Interferometry) 引入雷达信号处理最早出现于 60 年代末 70 年代初对金星和月球表面的观测。1974 年 Graham^[1]首次将干涉技术引入了合成孔径雷达信号处理。它的基本原理是: 合成孔径雷达卫星对同一地区进行两次 SAR 成像, 对两幅图像中的相位进行干涉处理, 得到它们的干涉图像, 再从干涉图像中的相位信息获取地形高程数据。之后这项技术得到了飞速发展。1986 年, H.A.Zebker 和 R.M.Goldstein^[2]将一个侧视合成孔径雷达系统安装在 NASA CV990 飞机上, 用一个传感器发射信号, 两个传感器同时接收地面回波信号, 从而同时获取美国加利福尼亚州的旧金山地区的两幅复数图像, 经过处理生成与地形有关的复干涉图, 并最终获得了具有较高分辨率的地形高度图。1988 年, R.M.Goldstein 又将这项技术应用到星载雷达, 从而大大拓宽了它的应用范围。欧空局(European Space Agency)于 1991 年 7 月发射了 C 波段 ERS-1 卫星, 随后有大量的文章发表, 主要集中在干涉 SAR 潜在的应用和干涉 SAR 的限制因素分析方面^[3]。1995 年 ERS-2 的发射使得同时利用 ERS-1 和 ERS-2 相隔 1 天的图像进行干涉处理成为可能, 并大大提高了处理的精度。2000 年底, 美、德、意联合研制的 SRTM 卫星发射成功, 采用双天线雷达干涉法, 在其 10 天的飞行中对地球近 80% 的陆地表面进行了干涉成像, 在 30 米的水平网络上, 高程测量精度可达 6 米, 获取的数据将产生前所未有的三维综合地形信息, 可用于武器制导、军事任务计划、飞行训练仿真和导航等。

目前有很多世界一流的科学家云集在德、美、法著名实验室进行干涉 SAR 技术及应用的研究, 主要有美国的 JPL(Jet Propulsion Laboratory)实验室, 加拿大的 CCRS(Canada Center for Remote Sensing), 法国的 CNES(Centre National d'Etudes Spatiales)。欧空局已经建立了 ERS-1 研究干涉 SAR 的小组, 被称为 ERS-1 FRINGE 小组, 每年都组织相关领域的国际研讨会。我国从事干涉合成孔径雷达的研究机构主要有中科院遥感应用研究所、中科院自动化所中法联合实验室、电子研究所、北京大学遥感中心等。我国也正在研制自己的合成孔径雷达卫星, 并有望在近几年发射升空, 到那时我们将会有大量的数据需要处理, 因而在此之前, 对这一技术的理论和应用领域进行深入的探索和研究, 对我国干涉 SAR 技术跟上并融入国际技术发展潮流, 有着非常重要的科学意义。

2 干涉合成孔径雷达的数据处理过程

SAR 复数图像数据中既包括强度信息又包括相位信息，其中相位信息中含有距离信息，干涉合成孔径雷达正是利用 SAR 复数图像数据中的相位信息获得地面目标的高度的。经过二十多年的研究，干涉合成孔径雷达技术的主要处理过程已基本形成^[4]，从预处理后的两幅复数图像出发，整个过程大致如图 1 所示：

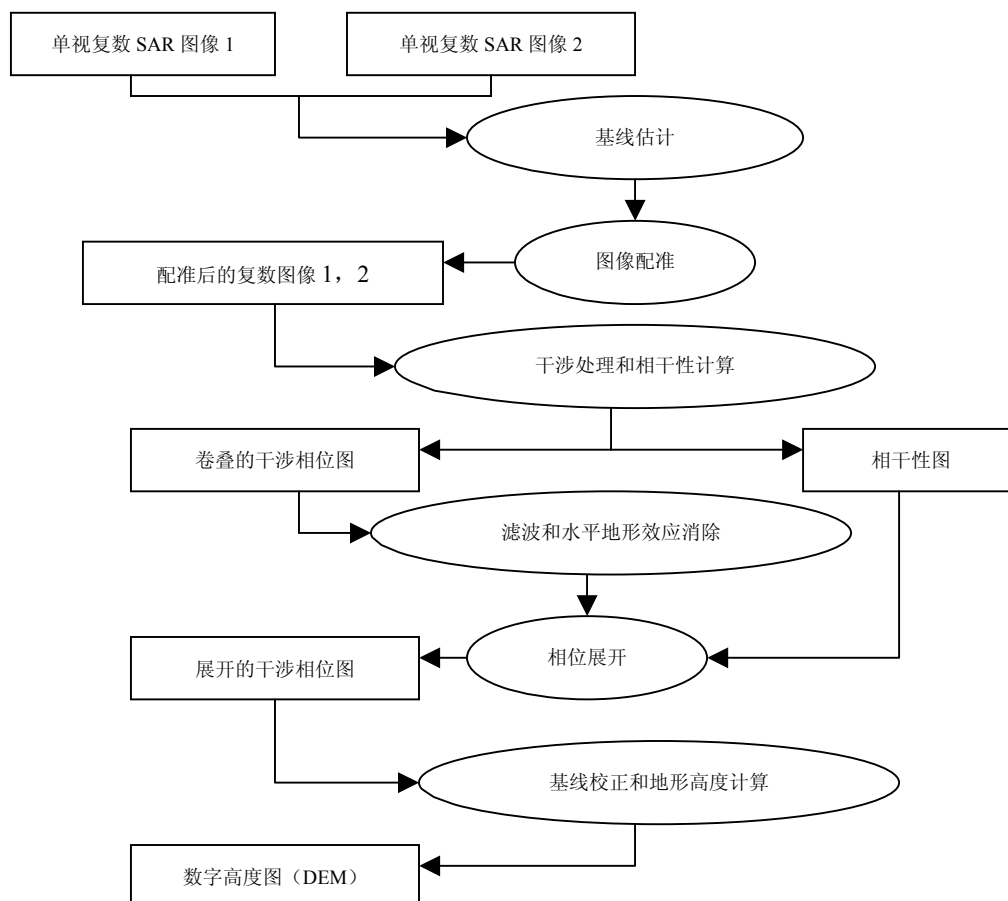


图 1 干涉合成孔径雷达的处理过程

注意，本文提到的干涉 SAR 数据处理技术均指星载 SAR。

2.1 图像选择

从干涉合成孔径雷达的处理过程可以看出，要得到某一地区的三维地形图，第一步便是需要两幅同一地区的复数 SAR 图像。要正确选择到合适的图像对，需要对干涉 SAR 图像的获取方式有所了解。

干涉 SAR 卫星的工作方式主要有两种：一种是单轨方式，卫星上安装有两个传感器，其中一个发射信号，两个同时接受信号，即它们同时获得同一区域的两幅图像，SRTM 卫星就是这种工作方式。另一种是双轨方式(或称重复轨道方式)，卫星上只安装有一个传感器，这同一个传感器相隔若干天获得同一区域的两幅图像，如日本 1992 年发射的

JERS-1 卫星、加拿大 95 年发射的 RADARSAT-1 卫星分别相隔 44 天和 24 天可重复扫描同一地区；或两颗卫星联合工作，相隔一天获得同一区域的两幅图像，如 ERS-1 和 ERS-2 卫星。

由于 SRTM 卫星的数据尚未公开出售，所以理论和应用研究用的最多的还是 ERS-1/2 和 RADARSAT 图像。我们可以通过中科院遥感卫星地面站的网站查询库存数据，也可以用欧空局提供的数据库软件查询，这个数据库软件名为 DESCW，该数据库被定期更新，可随时从网上下载 (<http://earthnet.esrin.esa.it>)。

根据研究地点查到图像后，还要根据目的的不同进行选择。若要生成三维的数字高度图 (Digital Elevation Model, 简称 DEM)，以下几个方面须引起注意：① 针对我国的气候特点，最好选择秋后和早春期间的图像，因为这期间地面植被的干扰最小；② 要注意地面的状况，最好无强风和冰雪，因为它们会减弱图像间的相关性；③ 时间间隔不能太大，太大会减弱图像间的时间相关性；④ 为尽量减小大气的影响，最好选择晚上获取的图像；⑤ 两幅图像间的垂直基线（基线是两遥感平台间的矢量距离）最好在 100 米到 300 米之间。而监测地表变化，垂直基线最好在 50 米到 100 米之间，检测如海浪运动等的微小变化，最好小于 5 米。在 DESCW 软件中有一项功能可对图像对的基线做粗略估计。

2.2 图像配准与干涉图的生成

目前大多数星载干涉 SAR 系统是采用双轨方式工作的。由于两次成像之间天线的相对位置随着两个轨道之间的相对位置的变化而变化，由此得到的两幅复数图像之间的位置关系也是复杂多变的。干涉 SAR 系统是以信号的相干性为基础的，用于形成干涉图的两复数图像的像素必须是相互匹配的，以保证形成干涉的回波来自相同的回波反射单元。配准精度要能达到至少八分之一像素级 (sub-pixel)，否则当图像间偏差到一个像素时，图像的相干性降为零，就无法获得干涉图像。相关系数法是图像匹配的基本算法，这是一种统计算法，可实现图像间整体匹配，但匹配精度较差^[5]。点投影法是一种精度较高，使用普遍的算法，该方法根据已选择的控制点参数确定图像的投影参数，从而进行匹配处理。可用两图像的复相关系数衡量配准的质量：

$$\gamma = \frac{E(A * B)}{\sqrt{E(|A|^2) \cdot E(|B|^2)}} \quad (1)$$

式中 A 和 B 为两个配准后的复图像， E 为数学期望， $*$ 是共轭相乘。 $\gamma \in (0,1)$ 为复相关系数，值越大说明匹配的越好。

两复图像 A 、 B 经精确配准后，可进行如下的复相关运算产生复相关图：

$$\rho e^{j\phi} = \frac{\sum_F \rho_A e^{j\phi_A} \cdot \rho_B e^{-j\phi_B}}{\sqrt{\sum_F \rho_A^2} \cdot \sqrt{\sum_F \rho_B^2}} \quad (2)$$

这里 F 为多视窗口（一般选择为 3×3 ）， ρ_A 、 ρ_B 、 ϕ_A 、 ϕ_B 分别为复图像 A 、 B 的幅度和相位部分。复相关图的相位部分 ϕ 便是干涉纹图，幅度 ρ 为相干性图，其值的大小说明了干涉图数据质量的高低，一般要求大于 0.5，低于 0.3 部分的数据便不可靠了。

2.3 水平地形效应的消除和干涉图的滤波

形成干涉图之后和相位展开之前，还有很多工作要做，其中主要包括水平地形效应去除和干涉图像滤波。

干涉 SAR 系统主要是利用信号的相位信息获取目标的高度，在干涉图像处理过程中应当保证相位的关系不变，但干涉 SAR 系统和轨道的几何关系使得干涉相位图中本应保持不变的相位差产生了变化，此类变化并不反映目标的高度变化，象这样相位图中高度相同而干涉相位差不同的现象称为水平地形效应。在对干涉图进行滤波和相位展开之前应该消除水平地形效应。水平地形效应主要受到 SAR 系统的几何关系，如平台高度、天线的下视角、基线长度等因素的影响^[6]，消除水平地形效应一般采用相位补偿法。

干涉图像的噪声来源主要有系统热噪声，由叠掩、遮挡和时相变化引起的去相关噪声，局部匹配失准引起的噪声等^[7]。目前消除干涉纹图中的噪声主要有三种方法：一是像素平均法，该方法用一个窗口在图像上扫描，取窗口内包含的图像像元的平均值为窗口中心像元的值；二是中值滤波，即用一个窗口在图像上扫描，把窗口内包含的图像像元值按升序排列，取居中的像元值为窗口中心像元的值；三是方向滤波法^[8]，由于干涉纹图中的条纹具有明显的方向性，分为 16 个方向窗口来平滑，首先在 16 个方向上计算像元值变化的方差，找出一个变化最小的方向，把这个方向作为该处的平滑方向，以该方向上若干像元的平均值来取代窗口中心像元的值。其中前两种方法程序运行简单，但处理后，图像的分辨率有所降低，后一种方法能较好的保持干涉图中的条纹信息，但执行起来计算复杂，当图像较大时，对计算机内存要求过高，耗时过长。

文献[9]中介绍了一种新的除噪方法——向量滤波法，能很好的克服上述各算法的不足之处。首先通过取像素值的正弦、余弦值将图像的像素值映射到一向量空间，然后再分别对正弦、余弦图进行平均滤波，最后再通过逆变换将向量值变换回像素值。这一方法操作简单，运行速度快，而且效果很好。

2.4 基线估计

两复数图像的获取瞬间，两个接收天线之间的矢量距离为干涉 SAR 系统的基线。基线是干涉合成孔径雷达的基础，它决定着干涉系统的特性。以重复轨道工作的干涉系统基线在不同位置 and 不同图像对之间的变化非常大，在处理过程中必须注意对基线的最优估计问题，因为最终的地形高度误差主要来源于平台高度误差和基线估计误差，从本文第四部分干涉 SAR 系统的几何关系中也可以看出这一点。基线太大，会减弱图像间的相关性，太小又不利于减弱大气影响^[10]，因而寻求最优基线也是一个研究的热点和难点。一般方法分为基于轨道几何关系的基线估计^[11]和基于参考点的基线校正^[12]。

3 相位展开

从干涉条纹图中，我们只能得到相位的主值，或称卷叠相位值（wrapped phase），而真实的相位差值中 2π 的整数倍部分不能由信号中得到，要计算目标的三维高度值，必须知道实际的相位差值，即展开后的相位值（unwrapped phase）。在干涉合成孔径雷达理论研究中相位展开是必不可少也是最困难的一步，展开的结果直接影响着最终 DEM 的精度，因而许多文献都对此进行了研究和讨论。

大部分的相位展开的算法都是将相位展开问题转化为优化问题，即在某种度量意义下使目标函数达到最小的问题。依目标函数的选取和度量意义的不同，这些算法主要可归纳为四类：

第一类是分枝截断(Branch-cut)算法。分枝截断算法是 Goldstein^[7]于 1988 年提出的，该方法首先将那些由噪音或地形不连续引起相位不一致的点标记为“残差点”，然后再选择适当的分枝将这些点连接起来，在接下来的逐点积分时，可选择绕过而不是跨过这些分枝的积分路径。选择分枝的标准是使所有分枝长度的和达到最小。该方法最大的优点是计算速度快，在信噪比高的地方，精确度非常高，但当“残差点”较多时，该算法效率不高，且容易产生孤立的区域。但由于该方法的速度优势，自 Goldstein 提出此算法以来，已经得到不断的改进^[13-16]，其中最小覆盖树算法^[13]是较成功的一种改进，区域增长算法^[15]提供了一个很好的思路。到目前为止，这类算法不能很好解决的问题还是如何设置分枝的问题。

第二类是 L_1 -模算法。这类算法的典型代表是 Costantini^[17]在 1998 年提出的最小价值流(Minimum Cost Flow)算法，是使象素梯度差的加权和达到最小：

$$\text{Min}\left\{\sum_{i,j} w_{i,j}^{(x)} \left| \Delta\phi_{i,j}^{(x)} - \Delta\Phi_{i,j}^{(x)} \right| + \sum_{i,j} w_{i,j}^{(y)} \left| \Delta\phi_{i,j}^{(y)} - \Delta\Phi_{i,j}^{(y)} \right| \right\} \quad (3)$$

这里 $\Delta\phi_{i,j}^{(x)}$ 和 $\Delta\Phi_{i,j}^{(x)}$ 分别是卷叠和展开后的相位梯度的 x 方向的分量， $\Delta\phi_{i,j}^{(y)}$ 和 $\Delta\Phi_{i,j}^{(y)}$ 是 y 方向的分量， w 是权值。事实上 Flynn^[18]的最小加权跳度和(Minimum Weighted Discontinuity)算法也属于这一类。

第三类是 L_2 -模算法，也就是最小二乘(Least-Square)算法^[19]。该算法使卷叠和展开后的相位梯度差的平方和达到最小：

$$\text{Min}\left\{\sum_{i,j} (\Delta\phi_{i,j}^{(x)} - \Delta\Phi_{i,j}^{(x)})^2 + \sum_{i,j} (\Delta\phi_{i,j}^{(y)} - \Delta\Phi_{i,j}^{(y)})^2 \right\} \quad (4)$$

用快速傅氏变换方法^[20]对上述方程求解，运行效率很高，但在遇到“残差点”时，该算法是穿过而不是绕过这些点，从而造成误差传播。为此，Ghiglia^[21] and Pritt^[22]又引入了加权最小二乘方法，加权算法在提高准确性的同时，又降低了求解速度。最小二乘算法是一种全局算法，并且得到的是连续解，稳定性强，易于实现，不存在死区，因而后来有人对这一算法进行了改进，如分块最小二乘算法^[23]，多分辨率法^[24]，快速相位展开算法^[25]等，也有人引入不同的求解最小二乘方程的方法，如 LS-FFT 并行算法^[26]，格林函数法^[27]，有限元方法^[28]等。但仍然不能解决解的精度和速度之间的矛盾，另外还

有权的设置问题也未能很好的解决。

第四类是合成算法。多数是考虑到分枝截断算法和最小二乘方法各自的优点，将它们结合起来。Zebker 在文献[29]中就是利用分枝截断算法快速选取最小二乘方程的权值，再用加权的最小二乘算法进行展开的。更有人将这两种方法做了仔细的比较^[30,31]。

一般的文献中只提及第一、三类算法，往往将第二类算法也归到第一类算法中，本文将它单独列出是出于对该方法发展前景的考虑，尤其是将它和神经网络结合起来的处理方法^[32]。

4 三维数字地形图的产生

真实的相位差反映了不同位置的天线与同一地面反射单元的距离差，根据干涉 SAR 系统的几何关系可以计算出地面目标的高度值^[33]。干涉 SAR 系统的几何关系如图 2 所示：

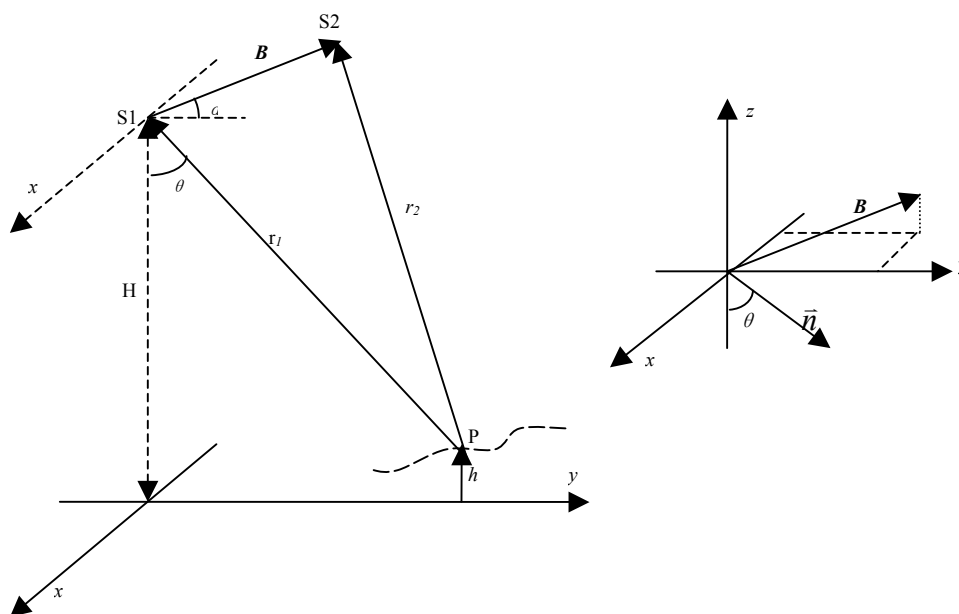


图 2 干涉 SAR 系统的几何关系示意图

这里 S1 和 S2 分别是两部雷达天线，其空间距离为系统基线 B ， α 为基线与水平线的夹角， θ 是天线 S1 的下视角， H 为天线 S1 距水平面的高度。 x 为平台的飞行方向， y 为地面水平方向。那么目标点 P 到两天线的真实相位差 Φ 与两天线到地面目标 P 的距离 r_1 、 r_2 有如下关系：

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) \quad (5)$$

其中 λ 是雷达发射波的波长。设 \vec{r}_1 、 \vec{r}_2 分别为由 P 点指向 S1 和 S2 的向量， \vec{b} 为 S1 指向 S2 的向量， \vec{n} 为 S1 指向 P 的单位方向矢量，则有

$$r_2 - r_1 = |\bar{r}_2| - |\bar{r}_1| \approx \frac{\bar{r}_1}{|\bar{r}_1|} \cdot (\bar{r}_2 - \bar{r}_1) = -\bar{n} \cdot \bar{b} \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (5) 式, 便得

$$\Phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} (B_z \cos \theta - B_y \sin \theta) \quad (7)$$

B_y 和 B_z 分别为基线 B 在 y 和 z 方向上的分量。计算时 B_y 和 B_z 可由基线估计值得到, 真实相位差 Φ 从相位展开中得到, 波长 λ 是已知量, 根据 (7) 式便可计算出天线视角 θ , 从而可利用下式获得目标的高度 h 的值:

$$h = H - r_1 \cos \theta \quad (8)$$

注意根据 SAR 系统的几何关系计算出的地面目标的高度值是斜距方向上的投影值, 还必须经过投影变换即地理编码过程才能成为与地图匹配的数字地形图^[34,35]。

在 DEM 的形成过程中另一个值得考虑的问题是大气对数据结果的影响^[36], 为了减弱大气的影响, 选择图像对时, 基线要稍大一些。

5 结论与展望

虽然干涉 SAR 的理论技术研究尚未成熟, 但对它的应用研究已经非常活跃了。干涉 SAR 的最重要的应用领域是获得地表三维信息, 现在用干涉 SAR 的技术生成大范围 DEM 仍然是应用热点^[35,36]。监测地表高度变化是干涉 SAR 技术的另一重要应用, 其精度已能达到毫米量级。为了获得更准确 DEM, 可考虑多基线, 多分辨率图像的联合, 另外, 多传感器数据融合也是一个新的可探究的方向。

美国哈佛大学的 Howard Zebker 领导的干涉 SAR 小组正在研究干涉 SAR 技术在地面沉降、冰山移动、火山喷发等方面的应用。法国国家空间研究中心正在 Didier Massonnet 博士的领导下开发一个适于操作的干涉 SAR 处理工具, 名为 DIAPASON。

中国科学院遥感信息开放实验室研制了重复轨道复雷达图像生成高程数据软件模块, 并成功地生成了西昆仑地区的数字高程模型, 另外, 该实验室将干涉 SAR 技术应用在地震方面的研究也取得了阶段性的成果。中国科学院自动化所的模式识别国家重点实验室正在研究将干涉合成孔径雷达技术应用于水灾监测和场景模型的更新。研究结果将对长江流域的堤防建设提供有效和生动的数字和图形描述, 这样的数字数据库或数字场景很容易进行更新、修改, 这是一种在低成本、高效率的基础上进行水灾预防研究的新方法。

参 考 文 献

- 1 L.C.Graham. Synthetic interferometer radar for topography mapping. Proc. IEEE, 1974, 62: 763~768
- 2 H.A.Zebker, R.M.Goldstein. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. J. Geophysical Research, 1986,91(B5): 4993~4999
- 3 D.Massonnet, T. Rabaute. Radar interferometry: limits and potential. IEEE Tran.on Geoscience and Remote Sensing, 1993,

31(2): 455-464

- 4 R.Gens, J.L.Van Genderen. Review article: SAR interferometry - issues, techniques, applications. *Int.J.Remote Sensing*, 1996, 17(10): 1803~1835
- 5 杨清友, 王超. 干涉雷达复图像配准与干涉纹图的增强. *遥感学报*, 1999, 3(2): 122~127
- 6 胡庆东. 干涉 SAR 图像系统相干性和相位展开算法研究[博士论文]. 北京: 北京航空航天大学, 1998
- 7 R.M.Goldstein, H.A.Zebker, C.L.Werner. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713~720
- 8 J. Lee, K.P.Papathanassiou, T.L.Ainsworth, M.R.Grunes, A.Reigber. A new technique for noise filtering of SAR interferometric phase images. *IEEE Tran.on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1456~1465
- 9 Wang Feng, V. Prinnet, MA Songde. A vector filtering technique for SAR interferometric phase images. *Proc. IASTED International Symposia, AI'2001*: 566~570
- 10 E.Sansosti, R.Lanari, G.Fornaro, G.Franceschetti. Digital elevation model generation using ascending and descending ERS-1/ERS-2 tandem data. *Int.J.Remote Sensing*, 1999, 20(8): 1527~1547
- 11 G.Rufino, A.Moccia, S.Esposito. DEM generation by means of ERA tandem data. *IEEE Tran.on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(6): 1905~1912
- 12 R.Guritz, M.Ayers, T.Logan, S.Li. Automated DEM production using ESA tandem mission data for the Caribou-Poker Creek LTER Watershed, Alaska. *Fringe99 Workshop on ERS SAR interferometry*, ESA, 1999
- 13 E. Trouve, JM Nicolas, H.Maitre. Improving phase unwrapping techniques by use of local frequency estimates. *IEEE Tran.on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(6): 1963~1973
- 14 C.W.Chen, H.A.Zebker. Network approached to two-dimensional phase unwrapping intractability and two new algorithms. *J.Opt.Soc.Am.A*, 2000, 17: 401~414
- 15 W.Xu, I.Cumming. A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping. *IEEE Tran.on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(1): 124~134
- 16 Q.Lin, J.F.Vesecky, H.A.Zebker. Phase unwrapping through fringe-line detection in synthetic aperture radar interferometry. *Applied Optics*, 1994, 33(2): 201~208
- 17 M.Costantini. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Tran.on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 813~821
- 18 T.J.Flynn. Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity. *J.Opt.Soc.Am.A*, 1997, 14(10): 2692~2701
- 19 D.C.Ghiglia, L.A.Romero. Direct phase estimation from phase differences using fast elliptic partial differential equation solvers. *Optic Letters*, 1989, 14(20): 1107~1109
- 20 M.D.Pritt, J.S.Shipman. Least-squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's. *IEEE Tran.on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(3): 706~708
- 21 D.C.Ghiglia, L.A.Romero. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods. *J.Opt.Soc.Am.A*, 1994, 11(1): 107~117
- 22 M.D.Pritt. Phase unwrapping by means of Multigrid techniques for interferometric SAR. *IEEE Tran.on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(3): 728~738
- 23 J.Strand, T.Taxt, A.K.Jain. Two-dimensional phase unwrapping using a block least-squares method. *IEEE Tran.on Image Processing*, 1999, 8(3): 375~386
- 24 G.W.Davidson, R.Bamler. Multiresolution phase unwrapping for SAR interferometry *IEEE Tran.on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(1): 163~174

- 25 M.Costantini, A.Farina, F.Zirilli. A fast phase unwrapping algorithm for SAR interferometry. IEEE Tran.on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(1): 425~460
- 26 唐健, 王贞松. 干涉 SAR 的二维相位展开算法研究. 遥感学报, 1997, 1(3): 172~177
- 27 G.Fornaro, G.Franceschetti, R.Lanari. Interferometric SAR phase unwrapping using green's formulation. IEEE Tran.on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(3): 720~727
- 28 G.Fornaro, G.Franceschetti, R.Lanari, D.Rossi, M.Tesauro. Interferometric SAR phase unwrapping using the finite element method. IEE Proc.-Radar,Sonar Navig., 1997, 144(5): 266~274
- 29 H.A.Zebker, Y.Lu. Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least-squares, and synthesis algorithms. J.Opt.Soc.Am.A, 1998, 15(3): 586~598
- 30 G.Fornaro, G.Franceschetti, R.Lanari, E.Sansosti, M.Tesauro. Global and local phase-unwrapping techniques: a comparison. J.Opt.Soc.Am.A, 1997, 14(10): 2702~2708
- 31 D.Just, N.Adam, M.Schwabisch, R.Bamler. Comparison of phase unwrapping algorithms for SAR interferograms. Proc.Int.Geosci.Remote Sensing Symp., 1995: 767~769
- 32 Gabriel F. Carballo, Paul W. Fieguth. Probabilistic Cost Functions for Network Flow Phase unwrapping. IEEE Tran.on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2192~2201
- 33 S.N.Madsen, H.A.Zebker, J.Martin. Topographic mapping using radar interferometry : processing techniques. IEEE Tran.on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 246~256
- 34 L.Kucera. Using ERS SAR interferometry for DEM creation in the Czech Republic. Fringe99 Workshop on ERS SAR interferometry, ESA ,1999
- 35 L.Castellano. ERS tandem data quality check for DEM generation. Fringe99 Workshop on ERS SAR interferometry, ESA, 1999
- 36 M.V.D.Kooij. Operational production of DEMs from ERS tandem data. Fringe99 Workshop on ERS SAR interferometry, ESA, 1999

王 风 1971 年生, 博士生, 主要研究方向为遥感图像处理。

Veronique PRINET 1969 年生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为医学和遥感图像处理。

马颂德 1946 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究领域为计算机视觉、图象处理、模式识别与人工智能等。