

综 述

干涉测量合成孔径雷达技术原理及 其在测量地震形变场中的应用^{*}

单新建 叶 洪

(中国北京 100029 中国地震局地质研究所)

摘要 介绍了雷达遥感技术的发展、现状及应用前景；较详细地论述了干涉测量合成孔径雷达 INSAR(interferometric synthetic aperture radar, 简称：干涉雷达)技术的原理，并给出了在测量地震位错中的几个应用；最后指出，INSAR 在观测地表垂直形变中具有不可替代的应用潜力，它将为监测地震动态场的变化提供全新的手段和方法，对今后地震预测工作将起到极大的推动力作用。

关键词 雷达遥感 INSAR 技术 垂直形变

引言

遥感技术经过 30 多年的发展，已与全球定位系统(GPS)和地理信息系统(GIS)等学科相互渗透、相互融合，形成了新型的对地观测系统，是当代最具革命性的科学技术，为地学研究提供了全新的方法和技术手段，从而使地学的研究范围、内容和方法发生了重大变化(徐冠华等, 1996; 李德仁, 1996). 1978 年 L 波段星载雷达卫星 Seasat SAR 的发射，揭开了星载雷达遥感技术的新篇章. 之后，美国“哥伦比亚”号航天飞机于 1981 年载合成孔径雷达 SIR-A 升空；“挑战者”号航天飞机于 1984 年载 SIR-B 升空；“奋进”号航天飞机于 1994 年载 SIR-C 升空；1991 年欧空局发射试验性载 SAR 遥感卫星 ERS-1(C 波段, VV 极化, 分辨率为 30 m)；1992 年日本 JERS-1(L 波段, HH 极化, 分辨率为 18 m)发射；到 1995 年加拿大的商业雷达卫星 RADARSAT(C 波段, HH 极化, 最优分辨率 10 m, 重复周期 24 d)的发射，再一次将星载雷达推向高潮，使合成孔径雷达 SAR(synthetic aperture radar)技术得到了广阔的应用. 在所获取的 SAR 图像中，不但记录了地物的强度信息，而且还记录了相位信息，具有光学遥感无法相比的优势.

在众多的雷达遥感技术中，干涉测量合成孔径雷达(INSAR)技术取得了令世人瞩目的成绩，它与 GPS、VLBI 和 SLR 等空间技术一道，构成了空间测地技术的主体. INSAR 技术利用相位信息，通过干涉处理获得数字地面模型(Graham, 1974; Rogers, 1969)和地表

* 国家自然科学基金(49802027)资助项目.

1998-04-06 收到初稿, 1998-08-18 收到修改稿并决定采用.

形变信息(Kwok, Fahnestock, 1996). 虽然 INSAR 技术没有像 GPS 技术那样成熟, 还处于初步应用阶段, 但随着雷达遥感系统的飞速发展, 可以预计, 在近年内 INSAR 技术将起到与 GPS 同等重要的作用. INSAR 技术与 GPS 技术在内容上相互补充、相互依托. INSAR 技术可获取高精度的活动断层垂直形变信息, GPS 可获取高精度的活动断层水平形变信息, 利用两者都具备的准实时、动态、全天候的特点, 在时间轴上把水平位移与垂直位移作矢量叠加, 便可得出活动断层的三维动态形变场. 因此, INSAR 技术的应用, 将使我们重新认识地壳形变位移场和速率场的动态过程, 从孕震环境、活动构造和介质特性方面为地震的中期、短期和临震预报提供可靠的前兆信息, 从而推动地球动力学、运动学、地震预测等学科的发展.

1 合成孔径雷达 SAR 技术

我们知道, 卫星雷达天线越长, 对地物的观测分辨率就越高. SAR 技术正是利用这一原理, 靠有限的天线长度来提高分辨率. 它的基本原理是: 卫星在轨道飞行中, 在不同位置上定时地对同一地物发射电磁波脉冲信号, 然后接收回波信号, 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. SAR 的分辨率包括距离分辨率和方位分辨率. 距离分辨力是在脉冲发射的方向上, 能分辨出两个目标的最小距离, 与脉冲宽度有关, 目前是采用脉冲压缩技术实现的. 方位分辨率指相邻的两束脉冲之间, 能分辨两个目标的最小距离, 它是利用回波信号的多普勒频移实现的. 方位分辨率与波长 λ 、斜距 R 成正比, 与天线孔径 d 成反比, 目前经常使用的成像雷达卫星参数如表 1 所示.

表 1 几个星载 SAR 的参数

雷达	ERS-1 SAR	JERS-1 SAR	RADARSAT	EOS SAR	SIR-C/X-SAR
发射国家	欧空局	日本	加拿大	美国-欧空局-日本	美国
发射时间	1991	1992	1995	预计 1999	1996
飞行高度/km	785	568	792	620	215
轨道倾角/(°)	98	98	98.6	98	57
波段	C	L	C	L, C, X	L, C, X
极化方向	VV	HH	HH	Quad(L)	Quad(C, L)
				Dual(C, X)	VV(X)
入射角/(°)	23(中心区)	35	20~50	15~40	15~60
辐射宽度/km	100	75	50~500	30~500	10~150
距离分辨率/m	<33	18	10~100	20~250	25
方位分辨率/m	<30	18	10		25
记录方式	数字	数字	数字	数字	数字

2 SAR 图像的特点及在地质构造解释中的应用

微波遥感(或雷达遥感)主要用来观测地物对电磁波的辐射和散射效应, 分为被动遥感和主动遥感. 主动遥感由遥感平台发射电磁波, 然后接收辐射和散射回波信号, 主要探测地物的后向散射系数和介电常数; 被动遥感主要探测地物的发射率和温度(徐冠华等, 1996). 成像雷达发射波长较长的电磁波信号, 其波长在 1 mm 至 1 m 之间. SAR 不仅具有全天时、高分辨率和高灵敏度的成像能力, 而且接收信号的同时, 记录了振幅和相位两种信息, 为探测地物的动态变化提供了可能, 这是光学遥感无法获得的. 雷达遥感之所以具

有极强的吸引力, 是因为它还具有以下特点: ① 微波能穿透云、雾、雨、雪, 具有全天候工作能力; ② 微波对地表有一定的穿透能力. 对干沙可穿透几十米, 对冰可穿透 100 m 左右, 对潮湿的土壤也能穿透几厘米到几米; ③ 微波对地形及地表物质的粗糙度、地物内部结构和介电常数等都十分敏感(舒宁, 1997).

SAR 对地物的颗粒大小、地层含水量敏感, 而光学图像在对岩性分析、植被变化等光谱特征上有特长. 在应用中可以利用 SAR 图像和光学遥感图像在获取地表信息上的差异, 利用影像融合技术, 把这两种图像的信息进行融合, 可充分展示空间特征, 极大丰富影像图形所载信息量, 提高图像的解译能力.

由于这些显著的特点, SAR 不仅在地质构造、岩性、隐伏地质体等方面能提供丰富的信息, 而且在地质制图方面具有极大的优势(Gabriel *et al.*, 1989; Zebker, Goldstein, 1986). 雷达图像的侧视特点能精细地刻画出地形的微小变化, 无论是大尺度的河谷、盆地、山脉等地形地貌, 还是小尺度的水系、沟谷、断层破碎带、滑坡等微地貌, 在 SAR 图像纹理上都能较好地反映出来. 另外, SAR 图像对地表及地下粗糙度、介电常数反应敏感, 而岩石的介电常数与粗糙度又与岩石的物质成分、构造结构、含水量及抗风化性等有一定的对应关系, 造成不同的岩性分布, 在 SAR 图像上有不同的色调和纹理特征. 尽管经纹理分析得到的水系沟谷的形态和平面展布模式是长期地质时期内外力联合作用的结果, 但与新构造运动关系密切, 对它们起决定作用的仍是它们的载体及载体所经历的构造变动. 由此可知, 地层岩性与水系沟谷的平面展布模式有着密切的关系, 这种关系与岩石的矿物成分、物理化学性质、抗风化程度及岩石本身的地质演化历史是分不开的(邵芸等, 1992; 张满郎, 郑兰芬, 1996). 邵芸等利用 GIST 地理信息系统的实时屏幕解译和统计功能, 对张家口地区的机载 SAR 图像进行了分析. 在野外采集样品后, 给出了对应岩石的矿物成分和介电常数, 并发现尚义—赤城断裂两侧岩石的宏观纹理截然不同. 在断层特征不清楚的情况下, 可根据纹理特征来确定断层通过的位置. 一般的情况是, 断层破裂带一般为蓄水构造, 具有较高的介电常数, 在 SAR 图像上具有更加明显的浅色条带特征.

邵芸等(1996)通过对 JERS-1 SAR、ERS-1 SAR 和 SIR-C/X-SAR 影像的综合分析, 发现了胶东地区唐家泊陨击构造遗迹; 并通过两次野外实地调查, 对样品的显微镜分析等获得大量的宏观和微观证据支持了解译结果. 在对 ERS-1 和 JERS-1 SAR 图像中的断层构造进行探测时, 发现已知断层清晰可见, 还发现了未知断层.

利用雷达具有穿透能力的特点, McCauley(1982)等人利用 SIR-A 对埃及和苏丹交界处小沙漠的穿透能力, 确定了其下存在的古河道; 我国也利用 SIR-C/X-SAR 资料, 识别出位于宁夏-陕西一带的明、隋代长城, 特别是那些长期受风化剥蚀, 部分被沙丘覆盖的长城; 笔者也利用 Landsat 卫星 TM 图像和欧空局雷达卫星 ERS-1 卫星 SAR 图像对我国长白山火山进行了研究. 在预处理的基础上, 进行了 SAR 图像和 TM 图象的对比, 研究两种资料的互补优势, 并进行了 ISH 数据融合. 由于 SAR 图像的加入, 增强了线型构造的解译能力, 得出了长白山火山历次喷发中的熔岩分布格局, 并结合长白山天池火山及周围地质构造资料, 分析了火山岩性、岩浆性质和火山喷发的程度. 这些应用都说明 SAR 已在地质构造识别中显示出了优势.

3 INSAR 技术的原理

干涉雷达技术按工作原理可分为距离向、方位向和重轨 3 种。距离向和方位向方式一般适用于机载雷达；重轨方式适用于星载干涉雷达。其原理是利用同一卫星在相邻轨道上对同一地区进行两次 SAR 成像。在每一幅 SAR 图像中，每个像素既记录了强度值，又记录了绝对相位值。单纯对一幅 SAR 图像来讲，绝对相位信息没有被利用，而两幅独立的同一场景 SAR 图像之间的相对相位却含有该场景中重要的三维信息。利用两幅 SAR 图像的相对相位进行干涉处理，可得它们的干涉图像，从干涉图像中的相位差获取地形高程数据。然后，把此干涉图像与同一地区的另外一幅干涉图像进行差分干涉处理(differential INSAR)，得出该地区的垂直地形变(Goldstein *et al.*, 1987; 王超, 1997)。

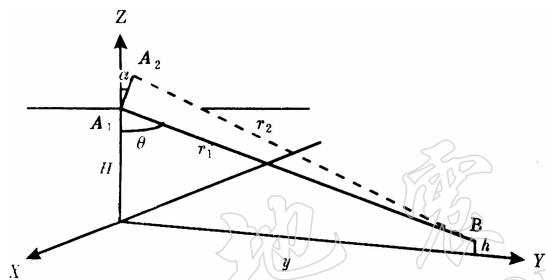


图 1 INSAR 参数的几何关系示意图

另一种情况是在 SAR 上载两幅天线，其中一幅发射雷达波，两幅天线同时接收回波，可获得高精度的形变信息。由于还没有两幅天线的星载 SAR 系统，目前星载 INSAR 技术的数据处理都采用前者。

图 1 中给出了 SAR 干涉中几何参数的关系。以双天线为例，其推导结果完全适用于单天线双成像的 SAR 应用。成像天线为 A_1 和 A_2 ，到地物 B 的斜距

分别为 r_1 和 r_2 。地物位于地面距离 y ，高度为 h ； H 表示雷达的高度， d 为天线基线距。由简单的几何关系可得地物到两天线的斜距差

$$\Delta r = r_2 - r_1 \quad r_2 > r_1 \quad (1)$$

天线 A_2 比天线 A_1 接收信号的延时

$$t_d = \frac{\Delta r}{C} \quad (2)$$

其中， C 为光速。回波在 A_1 、 A_2 处的相位差为

$$\varphi = \frac{2\pi/\lambda}{r_2 - r_1} \quad (3)$$

上式可改写为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \sqrt{r_1^2 + d[d + 2r_1 \cos(\alpha + \theta)]} - r_1 \right\} \quad (4)$$

式中，已知的参数是： H ， d 和 r_1 。要获取地物的三维坐标还必须知道

$$h = H - r_1 \cos \theta \quad (5)$$

$$y = \sqrt{r_1^2 - (H - h)^2} \quad (6)$$

其中

$$r_2 = r_1 + \frac{\varphi \lambda}{2\pi} \quad (7)$$

具体的计算过程是准确地测量延时 t_d 。由式(2)可计算出 Δr ，根据式(3)进一步得到相位差 φ ，再由式(4)反推出 θ ，最后由式(5)和(6)计算出地物的高程及横向位置。纵向位置可由观

测平台的飞行速度确定。至此可给出每个目标点的三维空间坐标。相对相位差只能测定 $-\pi$ 到 $+\pi$ 之间的数，绝对相位差可由相对相位差加 2π 的整数倍得出。

上面式(7)中， φ 是解缠的(unwrapped)相位，而干涉雷达所测量的值是 2π 的模，是包缠的(wrapped)。为获取相位的值，包缠相位必须解缠。实际上，二维解缠问题是一个离散泊松方程的边界值问题，是INSAR技术算法的重要环节(Pritt, 1996; Takajo, Takahashi, 1988)。

在干涉处理前，还必须进行以下必要的图像预处理工作：

(1) 由于两幅SAR图像是在相邻轨道上获取的，造成入射角、星下平台方向和线采样距等卫星参数有微小差异。为了保证干涉处理的精度，必须统一成像处理参数，对原始信号数据重新进行成像处理。

(2) 对SAR图像进行几何精校正。SAR图像的几何精校正方法较多，归纳起来有多项式校正和数字微分校正。多项式校正适合平原地区，数字微分校正适合于山地。根据研究区域的特点选取不同的校正方法。

(3) 经几何精校正所得的图像进行配准，形成干涉相位图，进行相位解缠。如果没有噪声影响，相位解缠算法很简单，只需求相位数据X, Y方向的偏微分并求积即可得到结果。但在实际数据处理过程中，由于噪声和数据的不连续性，将产生的误差传播、累加，使相位解缠变得复杂化。目前有两类相位解缠法：枝切法和最小二乘法。在获得解缠相位图之后，利用平台参数、地面控制点等进行正射投影校正，可获取数字高程模型(DEM)(Ghiglia, Romero, 1994; Goldstein *et al.*, 1988)。

(4) 利用4幅SAR图像得出两张干涉图，运用差分干涉技术(differential INSAR)获取地表形变位移。

利用INSAR获取高精度的地面点高程数据，必须满足以下几个条件：①精确地知道平台的高程位置和干涉测量基线；②处理器必须保持相关信号相位；③应用三维定位算法；④采用能推导绝对相位的算法(梁家玲，1996；许小剑，1996)。对于这些条件，目前的ERS-1/2、JERS-1和RADARSET等成像雷达卫星都是满足的，而且许多研究人员都利用INSAR技术取得了很好的干涉测量结果(Vachon, Gray, 1995; Massonnet, Feigl, 1995)。

就INSAR技术本身来讲，无论是算法、软件处理和分析方法，还是硬件设备都已满足了实际应用，目前需要改善的只是资料的精度。由于目前采用的是同一卫星在相邻轨道上两次对同一地区的SAR图像进行干涉处理，所获图像受到卫星的漂移、飞行姿态的变化、两次轨道高程的变化、一个周期内地形的地形变化等影响，造成误差较大，测量形变的精度只达到cm精度。从理论模型、处理方法和结果分析上来讲，单天线星载雷达系统和双天线星载雷达系统是完全一样的。随着双天线星载雷达系统的发射，将很快改善其测量精度。美国明年将发射双天线雷达卫星系统(即在同一颗卫星上安装两个天线，一个发射雷达波，两个天线同时接收)，预计将大幅提高干涉测量精度。

4 INSAR技术的应用

从1969年Rogers和Ingalls最早把干涉雷达技术用于探测金星和月球表面之后，1974年Graham又把干涉雷达技术用在地形制图上，直到1986年Zebker和Goldstein(1986)对干涉技术进行了改进，才使得数字化干涉雷达技术得以真正实现。1988年Gabriel和Gold-

stein 用航天飞机 SIR-B 数据资料, 运用 INSAR 技术, 研究了落基山脉地貌情况. 由于当时航天飞机飞行轨道不平行, 他们提出的算法计算量大, 且需要精确的轨道参数(Gabriel, Goldstein, 1988); 1990 年 Li 和 Goldstein(1990)用 Seasat 的 SAR 数据, 展示了用单天线的近轨道数据做干涉测量的结果; NASA/JPL(Jet Propulsion Laboratory)于 1991 年采用带有 GPS 的机载干涉 SAR 系统(TOPSAR), 对 $6.5 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ 的地区进行了测试. 在确定绝对相位时, 采用了多视技术(距离向因素为 4, 方位向因素为 32), 最后获得了该地区水平误差为 10 m 的地形图. 把所获地形结果与 DEM 进行比较, 结果表明: 在平坦地区有 2 m 的均方根测量偏差, 山区有 5~6 m 的偏差, 其中包括在决定雷达高程时所引起的-12 m 和 +25 m 的高程偏差. 总体精度水平已与标准 DEM 相一致(Zebker *et al.*, 1992).

NASA 的 JPL(Jet Propulsion Laboratory)在 5 年一度的 IEEE 国际雷达会议(1995 年 5 月 8~11 日, 加利福尼亚)上, 展示了 1994“奋进号”航天飞机上 SIR-C/X-SAR 合成孔径雷达的成像结果, 给出了将 1994 年 SIR-C L 波段获得的普通二维 SAR 图像与 1994 年 4 月和 1994 年 10 月两次的 SAR 图像的干涉图像导出的高程数据叠加, 得到的加利福尼亚 Long Valley 地区的三维成像结果(许小剑, 1996). 在试验中, 观测精度可达到 cm 级.

1992 年 6 月 28 日美国加州 Landers 地区发生了 7.3 级地震, 法国空间局和欧空局使用 ERS-1 SAR 1992 年 4 月 24 日、7 月 3 日、8 月 7 日和 9 月 11 日 4 个时相的 SAR 数据, 用 4 月和 8 月、7 月和 8 月的数据进行干涉处理, 得到两幅干涉图(Massonnet *et al.*, 1993). 第 1 幅干涉图跨越了 6 月底的地震, 包含了地震区内活动断层系附近的垂直形变信息, 再减去第 2 幅干涉图消除地形影响, 得出的第 3 幅干涉图即反映了活动断层形变情况. 使用该方法, 他们成功地测量了该地震造成的同震位错形变, 把测得的垂直形变量的分布情况与地震前后的大地形变测量结果进行比较, 发现两结果的确非常接近. 图 2 给出用

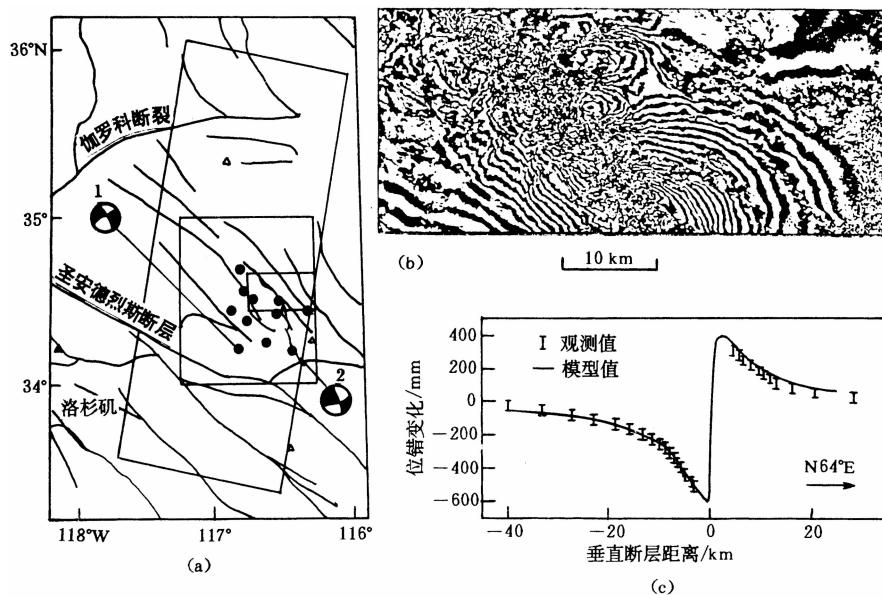


图 2 美国加州 Landers 地震的干涉处理系列图(据 Massonnet 等, 1993).

(a) 加州地区活动断层分布图; 图中●和▲是测震台站, 1 是 Big Bear, 2 是 Landers; (b) 1992 年 4 月 24 日和 8 月 7 日两幅 SAR 图像的干涉条纹图(覆盖面积 $64 \text{ km} \times 33 \text{ km}$, 一个灰度条纹代表 28 mm 的位移变化);
(c) 观测结果与弹性半球空间模型合成结果的垂直形变范围比较图

INSAR 所获取的干涉条纹及结果。

在 1993 年日本召开的现代地壳运动国际讨论会(CRCM'93)上, 法国学者 Massonnet 展示了利用 INSAR 技术测量 1992 年 6 月 28 日美国加州 Landers 地震的活动断层垂直形变动态变化的测量结果, 引起了美国、加拿大、德国和日本等发达国家的高度重视。目前, 国外在地震、火山监测(Mouginis-Mark, 1995)、活动构造(East, Li, 1991)等领域中, INSAR 技术应用都取得了可喜的成绩。

Peltzer 等(1996)又收集了 Landers 地震后 3 年内的 ERS-1 SAR 资料, 进行干涉处理, 从结果中发现, 原地震造成地表破裂的隆起区有约 2 cm 的下降回弹, 地表破裂的拉张沉降区有约 6 cm 的上升回弹现象。

Meyer 等(1996)采用干涉雷达技术, 对 1995 年 5 月 13 日在希腊北部地区 Grevena 发生的 $M_s=6.6$ 地震进行了测量, 得出了活动断层地带两侧的垂直升降量分别为下降盘下沉 30 cm, 上升盘隆起 5 cm。图 3 给出了 Peltzer 所得的 Grevena 地震干涉结果。可以看出, 观测处理条纹与模型计算条纹的分布极为相似。

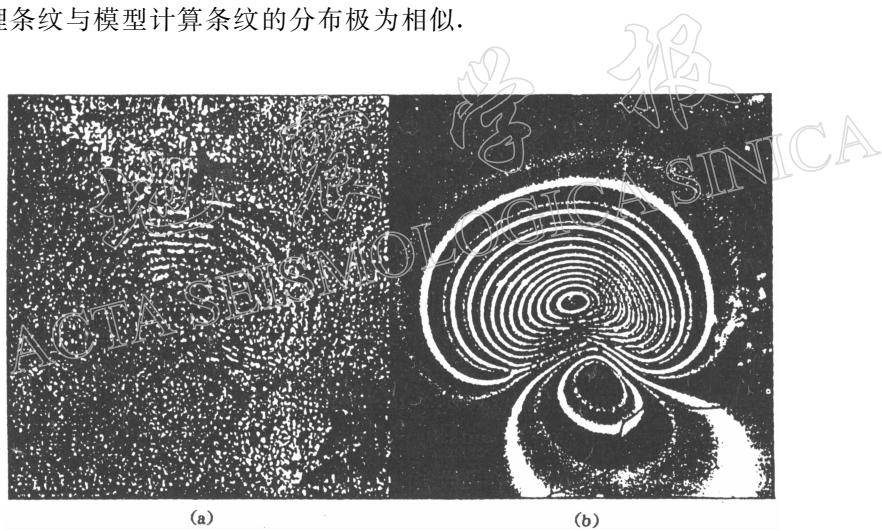


图 3 希腊 Grevena 地震干涉处理结果图。

(a) 1993 年 11 月 16 日和 1995 年 10 月 5 日两幅 SAR 图像干涉处理结果;

(b) 采用弹性半球空间模型合成的干涉条纹

中国科学院遥感研究所利用美国 SIR-C/X-SAR 所提供的资料, 对新疆昆仑山地区, 进行了三维信息提取的研究。实验和具体应用表明, 运用星载 INSAR 技术, 通过相邻轨道上观测同一地区的两幅 SAR 图像的相位差, 可获取地形高程数据(王超, 1997)。

5 结语

中国大陆处于印度板块、欧亚板块和太平洋板块相互作用的交汇处, 形成了中国板块内部现今活动构造的格局。在对活动构造的研究中, 对活动断层的研究又是其主要的内容。目前, 大量的地质、地形变和震源机制解资料表明, 浅源地震总伴随着断裂活动而产生; 反之, 也证实了破坏性较大的浅源地震都发生在活动断裂附近(马宗晋, 1982)。因此, 我们可以认为, 活动断裂与地震有着密切的关系。地震是构造过程中, 在某一构造部位应

变能积累到一定程度时,由闭锁断面突然破裂、失稳而导致能量快速释放的一种构造运动现象。能量在特定的构造部位积累过程中,必然会导致一定尺度的地壳运动与构造变形,有水平方向上的变形,也有垂直方向上的变形。在根据地形变和位移判断应变积累异常区时,水平方向和垂直方向的位移处于同等重要的位置;地震发生时,会形成一定程度的同震位错;而在地震发生之后,一段时间内又会出现地表形变的微量回弹,这是研究地震复发的重要信息。因此,对活动断层几何学和运动学的观测研究是活动断层研究的基础工作,它可使我们直接获取活动断层位移和运动速率等量化基础数据,为更深层次地认识地震重复间隔、潜在震源区等问题,从而认清地震应变的积累与释放过程,为结合其它资料建立断层运动与地震发生的理论模型做准备(王一鹏,方仲景,1989)。由于我国幅员辽阔、自然条件复杂,目前的观测技术条件和能力非常有限,采用常规的大范围连续水准重复测量、三角网测量获取活动断层形变数据十分困难,从而限制了我们对环境恶劣地区内的活动断层变形的动态认识。而 INSAR 测量将不受这些因素的限制,其应用前景相当乐观。

GPS 目前可获取高精度的地形变水平位移,而利用 INSAR 技术可以获取极为经济便宜的高精度的地形变垂直位移信息,构成了优势互补的特点。利用两者都具备的高精度、准实时、动态、全天候的特点,把 INSAR 获取高精度的地表垂直位移与 GPS 获取的高精度的地壳水平位移,在时间轴上作矢量叠加,可得到区域地表的三维动态位移场、速度场和应变场。这对于监测震前的微量形变、震时的同震位错和震后的变形回弹等地形变过程,有着极重要的意义,可为地震预测提供丰富可靠的定量信息。

目前,许多国家已看好该项技术的实用性,投入大量的资金进行应用领域的研究。众多的试验和具体应用表明,运用星载 INSAR 技术获取地壳垂直形变场,无论从算法、图像处理还是结果分析上是完全可行的,该方法必将成为地壳运动测量、地形变测量、地震位错测量等研究中不可缺少的手段。

参 考 文 献

- 李德仁, 1996. 论三 S 集成的定义、理论与关键技术. 见: 中国地理信息协会(编), 中国地理信息系统协会第二届年会论文集. 北京: 测绘出版社. 548~555
- 梁家玲, 1996. 国外干涉合成孔径雷达在地形测图上的应用. 测绘科技通讯, 19(3): 5~8
- 马宗晋, 1982. 地震与断裂关系的讨论. 中国活动断裂. 北京: 地震出版社. 14~18
- 邵芸, 郭华东, 石火生, 等, 1996. 星载 SAR 在胶东地区的地质探测与应用. 见: 郭华东, 徐冠华(主编), 星载雷达应用研究. 北京: 中国科学技术出版社. 122~129
- 邵芸, 郭华东, 魏秀萍, 等, 1992. 雷达图像的宏观纹理分析和地质应用效果. 见: 郭华东(主编), 机载雷达遥感应用试验研究. 北京: 中国科学技术出版社. 103~111
- 舒宁(编著), 1997. 雷达遥感原理. 北京: 测绘出版社. 1~10
- 王超, 1997. 利用航天飞机成像雷达干涉数据提取数字地面高程模型. 遥感学报, 1(1): 46~49
- 王一鹏, 方仲景, 1989. 活动构造的深入研究. 见: 国家地震局地质研究所(编), 国家地震局地质研究所十年. 北京: 地震出版社. 40~48
- 徐冠华, 田国良, 王超, 1996. 遥感信息科学的进展和展望. 地理学报, 51(5): 385~397
- 许小剑, 1996. 雷达正在向民用和高新技术发展. 出国考察技术报告, 1: 101~108
- 张满郎, 郑兰芬, 1996. Landsat TM 和 JERS-1 SAR 数据在金矿探测中的应用研究. 环境遥感, 11(4): 260~266
- East J, Li N, Ulaby F, et al, 1991. Backscattering Properties on Simulated Geological Surfaces. IGARSS'91. Helsinki, Fin-

- land. 1 281~1 286
- Gabriel A K, Goldstein R M, 1988. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B. *Int J Remote Sens*, **9**(5): 857~872
- Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A, 1989. Mapping small elevation changes over a large areas: differential radar interferometry. *J Geophys Res*, **94**(B7): 9 183~9 191
- Ghiglia D C, Romero L A, 1994. Robust two-dimensional weighted and unweighted phased unwrapping that uses fast transforms and iterative methods. *J Opt Soc Amer A*, **11**(1): 107~117
- Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L, 1988. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping. *Radar Science*, **23**(4): 713~720
- Graham L C, 1974. Synthetic interferometry radar for topographic mapping. *Proc. IEEE*, **62**: 763~768
- Kwok R, Fahnestock M A, 1996. Ice sheet motion and topography from radar interferometry. *IEEE, Trans Geosci Remote Sens*, **34**(1): 189~200
- Li F K, Goldstein R M, 1990. Studies of multi-baseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars. *IEEE, Trans Geosci Remote Sens*, **28**(1): 88~96
- Massonnet D, Feigl K L, 1995. Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms. *Geophys Res Lett*, **22**(13): 1 541~1 544
- Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al, 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, **364**: 138~142
- McCauley J F, 1982. Subsurface valleys and gearcheology of eastern Sahara revealed by shuttle radar. *Science*, **218**: 1 004~1 020
- Meyer B, Armijo R, Massonnet D, et al, 1996. The 1995 Grevena (Northern Greece) earthquake: fault model constrained with tectonic observation and SAR interferometry. *Geophys Res Lett*, **23**(19): 2 677~2 680
- Mouginis-Mark P J, 1995. Preliminary observations of volcanoes with the SIR-C radar. *IEEE, Trans Geosci Remote Sens*, **33**(4): 934~941
- Peltzer G, Rosen P, Rogez F, et al, 1996. Postseismic rebound in fault step-overs caused by pore fluid flow. *Science*, **273**: 1 202~1 204
- Pritt M, 1996. Phase unwrapping by means of multigrid techniques for interferometric SAR. *IEEE, Trans Geosci Remote Sens*, **34**(3): 728~738
- Rogers A E E, 1969. Ingalls R P, Venus: mapping the surface reflectivity by radar interferometry. *Science*, **165**: 797~799
- Takajo H, Takahashi T, 1988. Least-squares phase estimation from differences. *J Opt Soc Amer*, **5**: 416~425
- Vachon P W, Gray A L, 1995. ERS-1 SAR repeat-pass interferometry: temporal coherence and implications for RADAR-SAT. *Proceedings of the Seventeenth Canadian Symposium on Remote Sensing*. Ottawa: Canadian Center for Remote Sensing Press. 803~808
- Zebker H A, Madsen S N, Martin T, 1992. The TOPSAR interferometric radar topographic mapping instrument. *IEEE, Trans Geosci Remote Sens*, **30**(5): 933~940
- Zebker H A, Goldstein R M, 1986. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *J Geophys Res*, **91**(B5): 4 993~4 999