

获取张北地震同震形变场的差分干涉测量技术

张红 王超 刘智

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要 基于合成孔径雷达差分干涉测量的基本原理, 利用地震前后的 ERS-1/2 的三景数据, 获取了 1998 年 1 月 10 日张北地震($M_s=6.2$ 级)的同震干涉纹图. 这种差分干涉纹图能表现地震断层和形变场的同震形变特征, 而且该方法无需任何的辅助信息, 适用于大范围的地震监测与研究. 研究表明, 通过合成孔径雷达差分干涉测量技术能够获取高精度的强震同震位移场数据, 这是传统的地面观测方法所无法做到的.

关键词 合成孔径 雷达 差分干涉测量 张北 同震形变

中图法分类号: P225.1 P227 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)06-0497-04

The Differential Radar Interferometry Technique to Achieve Coseismic Displacement Field of the Zhangbei Earthquake

ZHANG Hong, WANG Chao, LIU Zhi

(Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101)

Abstract It is possible to map a coseismic displacement field resulting from a major earthquake by differential SAR interferometry and to achieve results comparable in magnitude to those obtained by conventional field survey techniques. Here we use differential SAR interferometry to capture the movements produced by the 1998 earthquake ($M_s=6.2$) in Zhangbei, Hebei province. Three interferograms constructed from ERS-1/2 SAR data were used to analyze the earthquake mechanism by three-pass method. The differential interferogram reveals fine geometrical features and seismic fault. Since we require only remotely sensed satellite data with no additional requirements for ancillary information, the technique is well suited for wide range seismic monitoring and analysis.

Keywords Differential, SAR, Interferometry, Zhangbei, Coseismic displacement

0 概述

大量的研究表明 SAR 干涉测量技术(InSAR)可以监测地球陆地表面和冰雪表面的微小变化, 监测的时间间隔从几天到几年, 因而可以获取全球的、高精度的(毫米级)、高可靠性的(全天时/全天候)、空前丰富的地表变化信息^[1-3]. 1993 年 Massonnet 等利用间隔几个月的 ERS-1 图象测量了 Landers 地震的同震位移场^[1]. 1994 年 Zebker 等人的研究表明在没有基础地形数据的情况下, 间隔 14 个月的地表变化也是有可能被监测到的^[2]. 近年来许多科学家都利用 InSAR 技术开展了大量的地震形变研究工作^[4-7].

1998 年 1 月 10 日 03: 50: 42(UTC) 河北张北地区发生了 6.2 级地震, 震中位置为北纬 41.15° , 东经 114.47° , 震源深度 10km. 其构造上位于阴山地震带、燕山地震带和山西地震带的交汇部位^[8], 张家口—北票深断裂呈 EW 向展布. 本文利用河北张北地区三景 ERS-1/2 数据, 采用三轨(three pass)差分干涉测量方法成功地提取了 1998 年 1 月 10 日张北地震($M_s=6.2$)同震位移场.

1 差分干涉测量基本原理

图 1 是差分干涉测量的成像几何示意图^[2]. A_1 和 A_2 是卫星两次对同一地区成像的位置(即天线

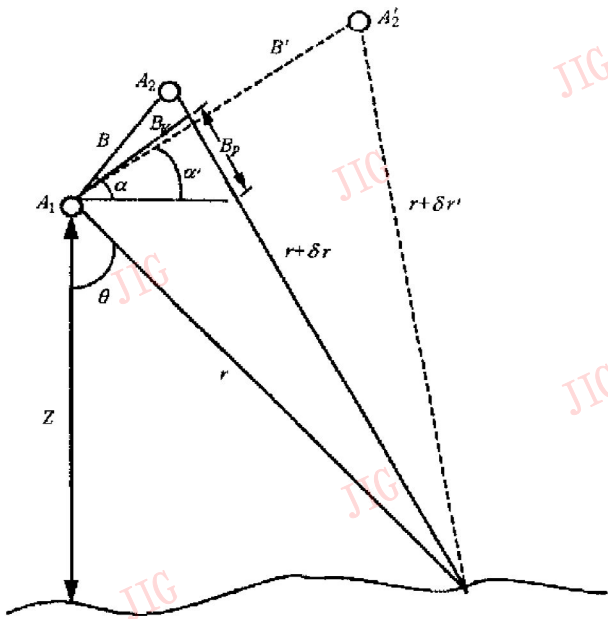


图1 差分干涉测量的成像几何示意图

的位置), 两副天线接收信号的路径分别为 r 和 $r + \delta r$, 则测量的相位差为

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \delta r \quad (1)$$

根据余弦定理, 有

$$(r + \delta r)^2 = r^2 + B^2 - 2rB \sin(\theta - \alpha) \quad (2)$$

基线距为 B , 视角为 θ , 基线距与水平方向的夹角为 α , 因为 $B \ll r$, 故 $(\delta r)^2$ 可忽略, 则有

$$\delta r \approx B \sin(\theta - \alpha) = B_p \quad (3)$$

B_p 是基线距的视线方向分量。

如果在同一地区获取第2幅干涉纹图, 该干涉纹图与前一幅干涉纹图的主图象相同(即 r 和 θ 不变), 那么这两幅干涉纹图的相位可相互比较. 第2幅干涉纹图的基线距为 B' , 基线距与水平方向的夹角为 α' , 由式(1)和(3)可得

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} B'_p \quad (4)$$

两幅干涉纹图相位的比值为 $\frac{\varphi}{\varphi'} = \frac{B'_p}{B_p}$, 即相位的比值等于基线距水平分量的比值, 而与地形无关。

如果在第3次观测期间, 地表发生形变, 假设这种形变与雷达分辨单元相比很小, 可认为雷达信号仍是相关的. 那么这时相位信息除了与地形有关外, 还包含雷达视线方向形变量 Δr , 第2幅干涉纹图的相位应表示为

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} (B'_p + \Delta r) \quad (5)$$

这时可以推导出视线向形变量 Δr 的表达式

$$\varphi - \frac{B'_p}{B_p} \varphi' = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (6)$$

上式左边的各量可由干涉纹图的相位和轨道参数计算得到, 进而可确定图象每点的视线方向形变量 Δr 。

$$\text{且, 基线距的比值 } \frac{B'_p}{B_p} = \frac{B' \sin(\theta - \alpha')}{B \sin(\theta - \alpha)} \quad (7)$$

是视角 θ 的函数, 它取决于成像参数和图象上每一点的地形. 为了利用式(7)来求解式(6), 必须由干涉数据获取研究区的地形图或利用其它的方法获取高程数据. 为了计算简便和确保计算结果的精度, 可以采用一种间接的方法——“去平地”方法。

该方法首先从干涉纹图移去一个相位量, 这个相位量是“曲面地球”造成的, 所得到的新相位值称为 φ_{flat}

$$\varphi_{\text{flat}} = \frac{4\pi}{\lambda} [B \sin(\theta - \alpha) - B' \sin(\theta - \alpha')] \quad (8)$$

式中, θ_0 是图象上高程值为0的点的视角. 经过“去平地”处理后, 干涉纹图上的相位表示的是相对球形地表的地形变化和地表位移所造成的形变. θ_0 与 θ 之间的差异很小, 对上式作数学近似得

$$\varphi_{\text{flat}} = \frac{4\pi}{\lambda} \delta \theta B \cos(\theta_0 - \alpha) \quad (9)$$

其中, $\delta \theta = \theta - \theta_0$. 在地表没有地形变化的情况下, φ_{flat} 等于基线距的垂直分量 B_v . 用“去平地”相位 φ_{flat} 重新表示式(6)得

$$\varphi_{\text{flat}} - \frac{B'_v}{B_v} \varphi_{\text{flat}} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (10)$$

在这个式子里, 无需精确的 θ 值和地形信息, 就可以求解视线方向形变量 Δr . 需要注意的是, 在“去平地”处理的过程中, 如果所用的基线距的值并不是真实的基线距值, 将会引入误差, 造成位移图的变形。

2 数据处理流程

本次实验利用震前 ERS-1/2 SAR 串行数据获取地形信息, 利用 ERS-2 SAR 数据对获取同震形变信息, 通过三轨法提取地震形变场. 表1给出了所用的数据及相应的参数。

表1 张北地区 ERS-1/2 数据及相应的参数

数据产品	轨道	景	时间	B_p (m)	B_v (m)	时间间隔 (d)
ERS-2 SLCI	12 683	2 781	1997-09-23	0	0	0
ERS-1 SLCI	32 356	2 781	1997-09-22	- 231	- 269	- 1
ERS-2 SLCI	16 190	2 781	1998-05-26	49	- 88	245

主要的工作步骤如下(流程图见图 2):

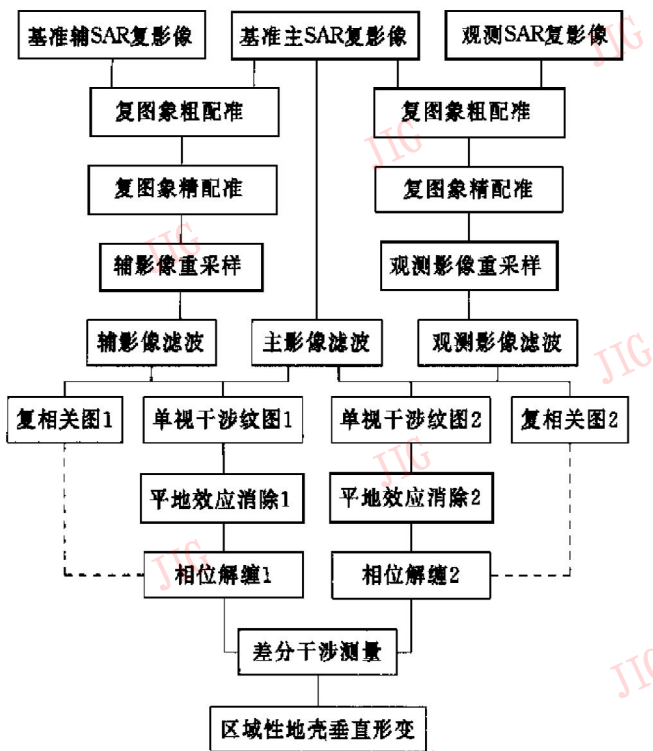


图2 差分干涉测量流程图

(1) SAR 图象对的配准

以 1997-09-23 的图象为主图象, 另外两幅图象分别与它配准. 配准是基于星上轨道参数(无需任何地面控制点)的亚象元级的自动配准, 配准精度为 0.1 个 pixel.

(2) 生成干涉纹图

对配准后的图象做多视处理, 然后共轭相乘生成两幅干涉纹图.

(3) “去平地”效应

“平地效应”是高度不变的平地在干涉纹图中所表示出来的干涉条纹随距离向和方位向的变化而呈周期性变化的现象. “平地效应”可通过对干涉纹乘以复相位函数来去除. 对干涉纹图进行“去平地”处理是基于两个原因: ① “去平地”后的相位近似地表示了真实相位与参考面之间的相位差; ② 进行“去平地”处理后相位梯度变化降低, 有利于进行相位解缠.

(4) 计算相关度

采用最大似然估算器计算相关度. 一般情况下, 相关度存在一定的偏差, 通过对相关估算值进行空间平均可纠正这种偏差.

(5) 干涉纹图的滤波和二次采样(subsample)

通常需要对干涉纹图进行滤波和二次采样: ① 利用 halfband 滤波消除顶底位移对相位数

据的影响; ② 方位向滤波增加干涉纹图的信噪比; ③ 二次采样减少后期数据处理的数据量.

(6) 相位解缠

相位解缠就是从相位差图象中恢复真实相位差的过程. 本文采用 L^p -norm 相位解缠方法.

(7) 干涉测量几何参数校正

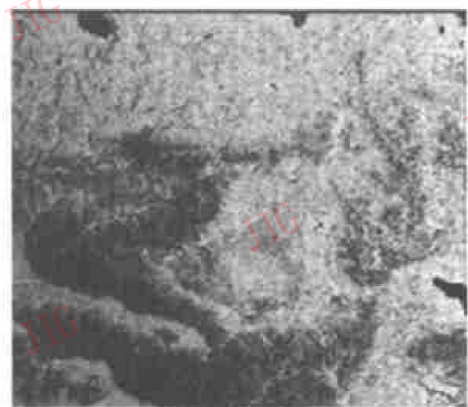
为了进行差分干涉测量, 需要有精确的基线知识, 所以必须精确估算进行干涉测量几何参数的精确估算.

(8) 差分干涉处理

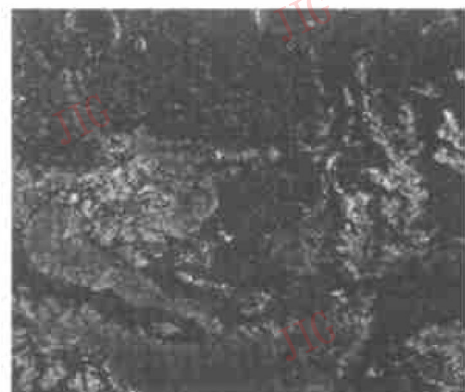
利用公式(10) 计算视线向位移图, 对视线向位移图进行再缠绕, 得到同震干涉位移图.

3 结果与讨论

彩色图版I 图 1 是进行“去平地”效应处理后的干涉纹图, (a) 是 1997-09-23 与 1997-09-22 的串行图象对生成的干涉纹图; (b) 是 1997-09-23 与 1998-05-26 两幅图象之间生成的干涉纹图(在此期间发生地震), 对应的相关系数图见下面的图 3.



(a) 震前一震前相关图
(1997-09-23 与 1997-09-22)



(b) 震后一震后相关图
(1997-09-23 与 1998-05-26)

图 3

彩色图版I 图2是同震干涉位移图.从图象上可以看出:以断层为中心,干涉条纹向外逐步变宽,反映形变在断层部位最强,向外变弱.根据象元数计算,形变区的范围大约为 $10\text{km} \times 10\text{km}$,在形变区内共有9条条纹,即在视线向形变量为 25.2cm ($2.8\text{cm} \times 9$).

由上面分析可知,若能选择合适的数据集与处理方法,差分干涉测量技术能够提供厘米~毫米级的同震位移形变信息,地壳形变图上表示的是沿视线向的位移,但这种位移存在多解性,需要结合地表实测数据建立形变模型来模拟,才能确定形变机制.

致谢 ERS-1/2SAR数据由欧洲空间局(ESA)欧洲遥感卫星研究计划(ERS AO3-374)提供,在此表示感谢.

参 考 文 献

- 1 Massonnet D, Rossi M, Carmona C *et al.* The displacement field of the landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 1992, 364: 138~ 142.
- 2 Zebker H A, Rosen P A, Goldstein R M *et al.* On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar intereferometry: The Lander earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(B10): 19617~ 19634.
- 3 Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential Radar Intereferometry. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94(B7): 9183~ 9191.
- 4 Massonnet D, Feigl K. Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, 22: 1537~ 1540.

- 5 Feigl K, Sergeant A, Jacq D. Estimation of an earthquake focal mechanism from a satellite radar interferogram: Application to the December 4, 1992 Landers aftershock, 1995, 22: 1037 ~ 1040.
- 6 Carnec C, Massonnet D, King C. Two examples of the use of SAR interferometry on displacement fields of small spatial extent, *Geophys. Res. Lett.*, 1996, 23: 3579~ 3582.
- 7 Baer G, Sandwell D, Williams S *et al.* Coseismic deformation associated with the November 1995, $M_w = 7.1$ Nuweiba earthquake, Gulf of Elat (Aqaba) detected by synthetic aperture radar interferometry. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104(B11): 25221 ~ 25232.
- 8 张国民等. 张北 6.2 级地震与强震成组活动. *地震*, 1999, 19 (2): 107~ 117.



张 红 1994年和1997年分别在北京师范大学物理学系和资源与环境科学系获理学学士和硕士学位.现为中国科学院遥感应用研究所博士生.主要研究方向为SAR干涉测量.

王 超 1989年获南京大学地球科学系博士学位.现为中国科学院遥感应用研究所研究员,博士生导师,主要研究领域为微波遥感及其应用.

刘 智 1996年和1999年在郑州测绘学院摄影测量与遥感系获工学硕士和博士学位.现为中国科学院遥感应用研究所博士后.主要研究方向为SAR干涉测量.