

## InSAR 系列讲座 3

## InSAR 基本原理

刘国祥

(西南交通大学测量工程系, 四川成都, 610031)

[摘要] 作为 InSAR 系列讲座的第三篇, 本文首先介绍干涉相位信号及 InSAR 测高与探测形变的基本原理。最后比较并讨论其在地表高程和形变测量中的敏感程度。

[关键词] 合成孔径雷达干涉; 基本原理; 数学模型; 敏感性

[中图分类号] P237 [文献标识码] A [文章编号] 1001-8379(2004)04-0187-04

## Basic Principles of Synthetic Aperture Radar Interferometry

LIU Guo-xiang

(Dept. of Surveying Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** As the third part of the tutorial, the paper will introduce the interferometric phase signature and the basic principles of synthetic aperture radar interferometry (InSAR) when applied to measure topography and ground deformation. The sensitivities of InSAR to topography and displacement have also been compared and discussed.

**Key words:** InSAR; basic principles; mathematical models; sensitivities

## 1 引言

从历史上来看, 现代 InSAR 技术的发展源于 Thomas Young 于 1801 年所完成的“杨氏双狭缝光干涉实验”。从两条狭缝射出的波束具有不同的传播距离, 也就是波的相位不一致, 这样引起波的叠加或削减, 从而在白板上可观察到明暗相间的条纹, 也就是所谓的“干涉条纹”。InSAR 正是受这一实验启发而发展起来。

前已述及, 机载或星载 SAR 系统所获取的影像中每一像素既包含地面分辨元的雷达后向散射强度信息, 也包含与斜距(从雷达平台到成像点的距离)有关的相位信息。将覆盖同一地区的两幅雷达图像对应像素的相位值相减可得到一个相位差图, 即所谓干涉相位图(Interferogram)。这些相位差信息是地形起伏和地表形变(如果存在)等因素贡献和的体现<sup>[1]</sup>。InSAR 正是利用这些具有高敏感特性的干涉相位信号来提取和分离出有用信息(如地表高程或地表形变)的<sup>[2-9]</sup>, 这一点与摄影测量和可见光、近红外遥感主要利用影像灰度信息来重建三维或提取信息是完全不同的。

## 2 干涉相位信号与噪声测度

将在不同时间/位置获取的覆盖同一地区的两幅 SAR 图像进行干涉分析, 可理解为它们对应像素复数值的共扼相乘<sup>[3]</sup>, 即

$$IF(r, a) = M(r, a) \cdot S(r, a)^* \quad (1)$$

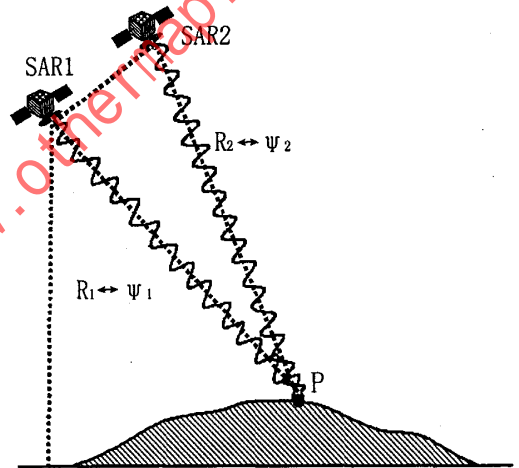


图 1 InSAR 系统干涉相位理解

这里,  $(r, a)$  为像素斜距、方位向坐标,  $M$ 、 $S$  分别为主、从 SAR 图像, 而  $IF$  为所得到的干涉图(复数)。如图 1, 共扼相乘实际上意味着对应像元的相位进行相减, 即

$$\phi_m = \Psi_1 - \Psi_2 \quad (2)$$

因此, 由式(1)所求干涉图中每一复数的相位主值即为主、从图像对应像素的相位差值, 即干涉相位。注意,  $\Psi_1$  和  $\Psi_2$  分别对应于斜距  $R_1$  和  $R_2$ , 与电磁波测距和 GPS 观测类似, 这里的干涉相位的整周数部分是未知的, 即存在整周模糊度问题<sup>[4]</sup>。

这一干涉相位反映了两次成像斜距的差异。进一步, 该差分相位  $\phi_m$  可分解为<sup>[5-8]</sup>

$$\phi_m = \phi_e + \phi_t + \phi_d + \phi_a + \phi_n \quad (3)$$

上式表明干涉相位可能包含几个因素的贡献, 即参考趋势面  $\phi_e$ 、地形起伏  $\phi_t$ 、地表位移  $\phi_d$ , 此外, 时空尺度上不同的大气成像条件也可以引起附加的相位延迟  $\phi_a$ <sup>[9]</sup>, 而噪声  $\phi_n$  可降低信噪比。

干涉相位的噪声程度一般采用相关性测度  $\gamma$  来衡量, 实用中利用一定大小的局部窗口内的多个 (设为  $N$  个) 复数来估计, 即

$$\gamma = \left| \frac{\sum_{i=1}^N M_i \cdot S_i^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^N M_i \cdot M_i^* \sum_{i=1}^N S_i \cdot S_i^*}} \right| \quad (4)$$

相关系数  $\gamma$  ( $\in [0, 1]$ ) 越大, 干涉相位的噪声越低<sup>[6]</sup>。

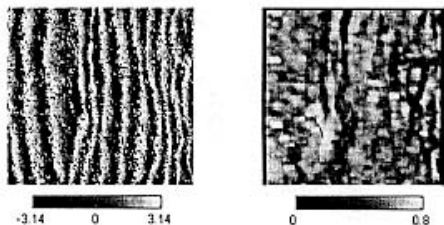


图 2 干涉相位 (左图)、干涉相关图 (右图) 实例

根据式 (1) 和 (4) 所计算的干涉图和相关图实例如图 2 所示。干涉相位图中的大致平行条纹反映了参考面贡献占主导地位, 而其它因素所贡献的相位相对较小。注意, 每一像元的干涉相位的整周数是未知的。干涉相关图反映了各成像分辨元上干涉相位的质量, 越亮的区域, 相位噪声越小, 而越暗的区域, 相位噪声越大。

### 3 InSAR 高程测量原理

图 3 显示了机载 InSAR 系统的一般观测几何原理。两个 SAR 以一定间距分开安装在飞机上, 两个传感器中心连线构成的空间向量称为基线且与飞机航线垂直, 基线长度  $B$  保持不变, 基线向量与水平线的夹角称为基线倾角  $a$ 。在星载情况下, 一般采用单天线操作模式, 卫星以一定的时间间隔和轻微的轨道偏离 (两个轨道几乎平行) 重复对某一局部地区成像, 同样可构成如图 3 所示的几何配置, 只是基线不再以物理形式存在<sup>[4]</sup>。一般来说, 机载基线长度为十米左右, 而卫星基线为几百米 ~ 1 公里左右。为讨论方便, 假设主从像对获取期间无地形形变, 且无大气影响, 下面将分析如何借助于干涉相位和基线参数来计算地表高程。

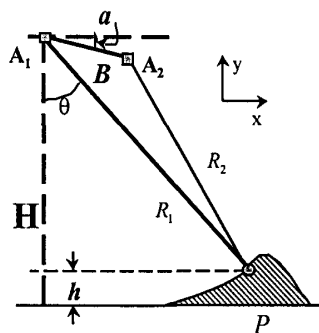


图 3 InSAR 系统的观测几何

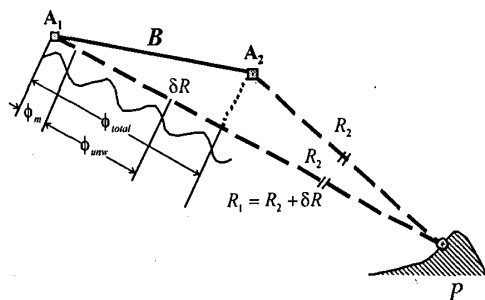


图 4 绝对相位差  $\phi_{total}$ 、解缠相位差  $\phi_{unw}$  和观测相位差  $\phi_m$  的关系

如图 4 所示 (为清晰起见, 相对于图 3, 基线被夸大了), 对于地面点  $P$ , 若沿  $A_1P$  和  $A_2P$  传播的两个雷达波的绝对相位差  $\phi_{total}$  已知, 则斜距差  $\delta R$  可以被求得, 其关系如下

$$\delta R = R_1 - R_2 = \frac{\lambda}{P \cdot 2\pi} \cdot \phi_{total} \quad (5)$$

其中,  $\lambda$  是雷达波长,  $R_1$ 、 $R_2$  分别为两个成像传感器中心到地面目标的斜距; 对于机载系统,  $P = 1$ , 对于星载系统,  $P = 2$ 。因  $B \ll R_1$ , 斜距差可近似为基线  $B$  在斜距  $R_1$  方向上的投影分量 (平行基线分量), 即

$$\delta R \approx B_{\parallel} = B \sin(\theta + a) \quad (6)$$

这里,  $\theta$  为雷达侧视角, 可联合式 (5) 和 (6) 求得, 即

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{\lambda \cdot \phi_{total}}{P \cdot 2\pi B} \right) - a \quad (7)$$

当  $\theta$  被确定后, 地表高程可经如下公式计算得出:

$$h = H - R_1 \cos \theta \quad (8)$$

其中,  $H$  为雷达平台高度, 即雷达中心到参考面的垂直距离。  $B$ 、 $a$  和  $H$  可从轨道姿态数据推求得到, 而  $R_1$  可根据 SAR 图像头文件中有关雷达参

数推算出来。

必须指出的是，基于式 (1) 求得的干涉相位图中每一像元的整周相位是未知的，因此，必须采用一定的方法即所谓的相位解缠 (Phase unwrapping) 算法来确定整周相位，以得到上述绝对相位差  $\phi_{total}$ ，这是 InSAR 数据处理的关键环节之一，具体算法将在后续讲座中讨论。图 4 清晰地说明了 InSAR 直接相位差分观测值  $\phi_m$ 、模糊相位  $\phi_{unw}$  ( $\phi_{unw} = 2\pi k_{unw}$ ) 和绝对相位差  $\phi_{total}$  之间的关系，即有

$$\phi_{total} = \phi_m + 2\pi k_{unw} + 2\pi k_0 \quad (9)$$

这里， $2\pi k_0$  为整体相位偏差，可通过一个高程已知的地面控制点来确定<sup>[4]</sup>。

#### 4 InSAR 形变测量原理

目前，机载 InSAR 系统鲜有应用于探测地表形变，而卫星 InSAR 系统在地表形变探测中应用较多，下面的分析仅限于卫星系统，为讨论方便，仍忽略大气影响。

为分离出形变信息，具有显著影响的参考趋势面和地形因素贡献必须从初始干涉相位中去除，也就是所谓的二次差分。已有的研究已经提出了三种方法进行二次差分<sup>[1]</sup>：

- 使用两个雷达图像和一个外部数字高程模型，称为“两轨”方法。

- 使用三个雷达图像形成两个干涉对，一个为地形对，另一个为地形—形变对，称为“三轨”方法。

- 使用四个雷达图像形成两个干涉对，称为“四轨”方法。

实质上，“两轨”和“四轨”方法是相似的，只不过是后者使用干涉的方法产生去除地形影响所需的数字高程模型，而“三轨”方法无须产生高程模型，直接使用地形干涉对的相位从地形—形变对中去掉地形影响。

图 5a 说明了“两轨”/“四轨”的基本思想，而图 5b 说明了“三轨”的基本思想，下面公式表达了一些基本的几何关系 (注：式 (10a)、(11a)、(12a) 为“两轨”/“四轨”情况，式 (10b)、(11b)、(12b)、(13) 为“三轨”情况)：

$$\phi_d = \phi_m - \phi_e - \phi_t \quad (10a)$$

$$\phi_d = \phi_{m2} - \phi_{e2} - \phi_{t2} \quad (10b)$$

$$\phi_e = \frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel}^0 \quad (11a)$$

$$\phi_{e2} = \frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel}^0 \quad (11b)$$

$$\phi_t = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}^0 h}{R_1 \sin \theta_0} \quad (12a)$$

$$\phi_{t2} = \frac{B_{\perp}^0}{B_{\perp 1}^0} \phi_{t1} \quad (12b)$$

$$\phi_{t1} = \phi_{m1} - \phi_{e1} = \phi_{m1} - \frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel 1}^0 \quad (13)$$

其中， $B_{\parallel}^0$  和  $B_{\perp}^0$  分别代表基线 (轨道偏移) 在雷达参考视线方向上的平行和垂直投影分量， $\theta_0$  为雷达参考视线的侧视角度， $\lambda$  为雷达波长， $R_*$  为雷达斜距， $h$  为地表相对于参考面的高程。

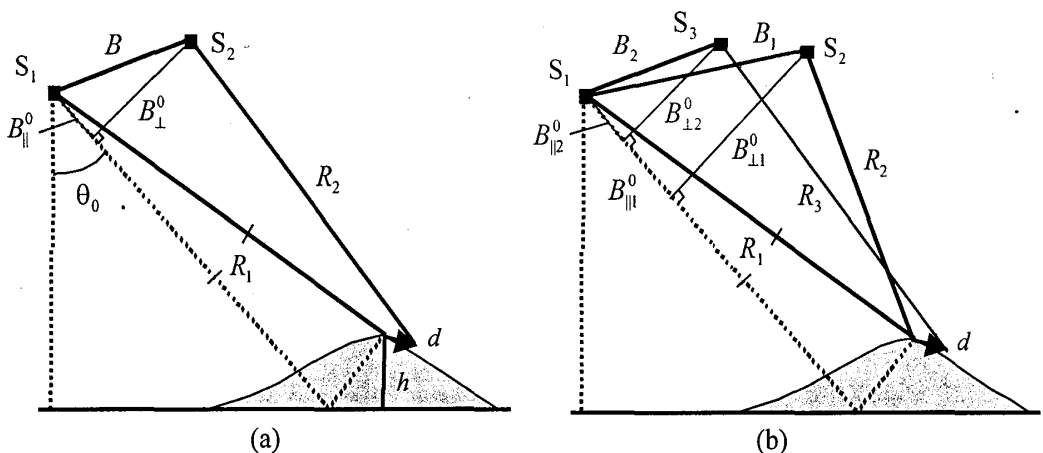


图 5 形变信息提取的差分干涉方法：(a) “两轨/四轨”方法，(b) “三轨”方法。

对二次差分干涉图进行相位解缠且得到绝对相位差  $\phi_{abs}$  后, 反映地表形变的斜距变化量  $\Delta R$  可如下计算得到

$$\Delta R = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \phi_{abs} \quad (14)$$

## 5 InSAR 对地形和形变的敏感度对比

由式 (5)、(6)、(7) 和 (8) 可以导出干涉相位相对于高程变化的敏感度方程为

$$\frac{\partial h}{\partial \phi} = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{R_1 \sin \theta}{B_{\perp}} \quad (15)$$

其中,  $B_{\perp} = B \cos(\theta + \alpha)$ , 为基线  $B$  在垂直于斜距  $R_1$  方向上的投影分量 (垂直基线, 见图 5a)。显然, 一个整周干涉相位变化  $2\pi$  对应于大小为  $\lambda R_1 \sin \theta / (PB_{\perp})$  的高差变化, 这就是所谓的“模糊高”, 是 InSAR 系统中的一个重要参数, 模糊高越小, 干涉相位误差对估计高程的影响就越小。由式 (15) 可知, 通过增加垂直基线可降低模糊高, 即增加干涉系统对地形高程变化的敏感程度。然而, 过大的垂直基线会导致干涉相位的几何失相关, 即引起严重相位噪声。因此, 在应用 InSAR 测高时, 必须折衷选择基线长度, 如对于 ERS-1/2 C 波段 SAR 系统来说, 推荐使用 ~200 米的基线。

从式 (14) 不难发现, 一个整周差分干涉相位变化  $2\pi$  所对应的地表形变量 (沿雷达视线方向) 为  $\lambda/2$ , 即雷达波长的一半。如对于 ERS C 波段 (5.6 cm) 系统来说, 形变敏感度为 2.8 cm。从式 (10) ~ (13) 可以看出, 如果基线长度为零, 即两次成像卫星轨道完全重合, 由式 (1) 所计算的直接差分干涉相位中将不包含参考面和地形起伏的相位贡献, 无需作二次差分, 直接差分干涉相位图就反映了地表形变情况。因此, 对于 InSAR 形变测量来说, 基线越短越有利。

一般来说, InSAR 系统对地形的敏感程度远远低于对形变的敏感程度。例如, 一个垂直基线为 100 米的 ERS 干涉对, 1 米的高差变化仅仅对应着约  $4.5^\circ$  的干涉相位变化, 远小于 ERS 干涉系统的约  $40^\circ$  噪声水平, 因此使得这样的高差不可测。然而, 对于二次差分干涉来说, 沿雷达视线方向 1 厘米的

形变量变化对应着  $127^\circ$  的干涉相位变化。因此, InSAR 对地表位移是相当敏感的, 从理论上来说, InSAR 具有毫米级形变测量精度的潜力。

### 参考文献

- [1] 刘国祥, 丁晓利, 陈永奇, 等. 极具潜力的空间对地观测新技术—合成孔径雷达干涉 [J]. 地球科学进展, 2000.
- [2] 刘国祥, 丁晓利, 李志林, 等. InSAR DEM 的质量评价 [J]. 遥感信息, 2000, (4).
- [3] 刘国祥, 丁晓利, 李志林, 等. 卫星 SAR 复数图像的空间配准 [J]. 测绘学报, 2001.
- [4] 刘国祥, 丁晓利, 李志林, 等. 使用 InSAR 建立 DEM 的试验研究 [J]. 测绘学报, 2001.
- [5] 刘国祥, 丁晓利, 李志伟, 等. ERS 卫星雷达干涉测量: 1999 年台湾集集大地震震前和同震地表位移 [J]. 地球物理学报, 2002.
- [6] Liu, G. X., X. L. Ding, Y. Q. Chen, Z. L. Li and Z. W. Li, Settlement field of Chek Lap Kok Airport, Hong Kong, detected by satellite synthetic aperture radar interferometry [J]. Chinese Science Bulletin, Vol. 46, pp. 1778 - 1782, 2001.
- [7] Ding, X. L., G. X. Liu, Z. W. Li, and Y. Q. Chen, Ground subsidence monitoring in Hong Kong with satellite SAR interferometry [J]. Photogrammetry Engineering & Remote Sensing, Vol. 70, No. 10, pp. 1131 - 1137, 2004.
- [8] Liu, G. X., X. L. Ding, Z. L. Li, Z. W. Li, Y. Q. Chen, SB Yu, Pre- and co-seismic ground deformations of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, measured with SAR interferometry [J]. Computers and Geoscience, Vol. 30, pp. 333 - 343, 2004.
- [9] Li, Z. W., X. L. Ding and G. X. Liu, Modeling atmospheric effects on InSAR with meteorological and continuous GPS observations: algorithms and some test results [J]. Journal of Atmospheric and Solar - Terrestrial Physics, Vol. 66, pp. 907 - 917, 2004.

[收稿日期] 2004-11-03

[作者简介] 刘国祥 (1968-), 男, 博士, 现为西南交通大学测量工程系教授, 主要从事遥感及 GIS 研究。

本讲座得到了国家自然科学基金项目的资助 (批准号: 40374003)