

InSAR 系列讲座 5

InSAR 系统中的误差传播*

刘国祥

(西南交通大学测量工程系, 四川 成都 610031)

[摘要] 作为 InSAR 系列讲座的第五篇, 本文介绍 InSAR 高程与形变测量中的误差来源, 对主要误差源(干涉相位、基线参数和地形数据)推导出误差传播模型。此外, 还将讨论地形数据误差对干涉形变测量的影响。

[关键词] 合成孔径雷达干涉; 误差来源; 误差传播; 误差模型

[中图分类号] P237 [文献标识码] A [文章编号] 1001-8379(2005)02-0092-04

ERROR PROPAGATION IN INSAR SYSTEM

LIU Guo-xiang

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

Abstract: As the fifth part of the tutorial, the paper introduces and discusses the sources of errors in elevation/deformation measurements derived with InSAR, and conducts modeling for the main error sources (i.e., interferometric phases, baseline parameters and topographic datasets) based on the error propagation law. Finally discussed is the influence of errors in topographic datasets used in differential interferometry for deformation mapping.

Key words: InSAR; error sources; error propagation; error models

1 引言

从前面 3、4 讲中我们已经知道, 利用一次差分干涉相位数据和卫星轨道数据可进行地表三维重建; 利用二次差分干涉处理可进行地表形变探测。这些干涉分析需要使用雷达系统参数、雷达平台姿态(基线)数据、相位观测量和地形数据(二次差分中用于地形相位的扣除)等, 显然, 这些数据的不确定性或误差会传播到干涉高程或形变结果中去。基于数理统计和测量误差基本理论, 本讲分析卫星雷达干涉系统中几个主要误差源(即相位观测量、基线数据和地形数据)的特性, 及其对高程和形变测量的影响, 并给出相应的误差传播模型, 进而分析干涉形变测量中地形数据误差的影响规律, 并且对地形数据的处理给出建议。

2 干涉相位误差

SAR 影像中的相位观测量是干涉处理中最为关键的数据源。联合沿不同轨道获取的两幅 SAR 图像, 干涉处理能提取对应像素的相位差图即(干涉相位图), 每一像素的干涉相位包含如下贡献: (1) 地形起伏, (2) 投影到雷达视线方向的地表位移, (3) 可能的大气影响, 和 (4) 噪声^[1]。前三者在一定程度上表现为空间自相关, 干涉相位噪声的理解需要从单幅 SAR 图像中相位信号的构成来展开讨论。

雷达成像时, 天线发射的微波信号要穿越大气层且与地表交互作用后被反射回去再由传感器记录

下来。对于单幅 SAR 图像的每一像素的相位来说, 主要包括三方面的贡献^[2]: (1) 传感器到地表分辨元的直线路径长度, (2) 非均匀大气介质引起的路径弯曲, 和 (3) 微波信号与地表分辨元内诸目标交互所引入的后向散射相位。散射附加相位主要与两个因素有关(见第 2 讲图 5), 首先, 地面分辨元内部可能随时间发生随机扰动(如植被生长或随风摆动)或化学特性改变(如与土壤湿度有关的电离常数改变), 其次, 对于同一分辨元, 轨道间隔(或称空间基线)会导致不同的雷达侧视角度, 也会引起不同的散射特性。对于不同时间获取的两幅 SAR 图像来说, 各自的随机附加相位分量(噪声)不同或者说不相关, 在相位差分时难以抵消(见第 3 讲公式 2), 可引起干涉图无明显的条纹或条纹不连续, 相位整周模糊度求解将非常困难, 而易变的大气条件(气压、温度和相对湿度)可能会导致不同的相位延迟, 这种不一致既表现在时间尺度上, 也表现在空间尺度上^[3]。

一般来说, 沿重复轨道获取两幅 SAR 图像的时间间隔越大, 干涉相位的噪声越严重, 即所谓的时间失相关, 从而致使高程和形变测量失败(特别是植被覆盖区), 尤其使长期累积形变(如地震震前和震后形变、火山运动)的监测变得非常困难。已有的研究表明, 在维持时间相关性方面, 长波段 SAR 系统(如 JERS-1 L 波段 SAR 系统, 波长为 23.5 cm)

比短波段 SAR 系统（如 ERS-1/2 C 波段 SAR 系统，波长为 5.7cm）更有优势^[1]。获取两幅 SAR 图像的轨道空间间隔越大，干涉相位噪声水平也会越高，即空间失相关，这限制了有效干涉像对的可用数量。因缺乏与 SAR 成像时间同步的高分辨率地面气象数据，从干涉结果中完全扣除大气的影响也相当困难（稀疏 GPS 永久跟踪站的大气延迟解可用于去除大气低频分量）。目前，失相关和大气影响这两类棘手问题都没有得到很好的解决，这无疑制约了 InSAR 在地表三维重建和区域地表形变探测方面的普及应用。但同时也应看到，在地形和形变先验信息已知的情况下，使用干涉方法提取大气参数甚至大气建模也是可能的，也就是干涉雷达可应用于气象观测和研究^[4]。

如第 4 讲所述，干涉相位的噪声水平在一定程度上可通过相关系数来衡量（见第 4 讲式 3），而其信噪比可通过空间滤波（即多视处理，见第 4 讲式 4）来提高。统计分析表明^[1]：尽管单一 SAR 图像上的相位信号服从 $[-\pi, \pi]$ 的均匀分布，但从两幅 SAR 图像所提取的干涉相位信号则服从似高斯分布，其概率密度可表达为以雷达干涉相关系数和多视数作为

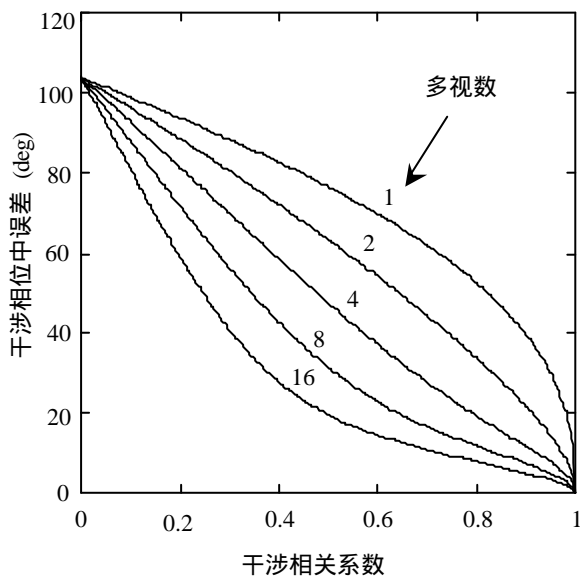


图 1 干涉相位中误差与相关系数及多视数的关系

参数的函数形式，干涉相位中误差与相关系数及多视数间的理论关系如图 1 所示，其数学描述及相应计算见文献 1。雷达相关性可通过增加多视数来提高，即通过加大局部空间平滑的程度以牺牲空间分辨率来提高信噪比，从图 1 可以发现，多视数越大且相关系数越高，干涉相位的中误差越小。

3 基线误差

由第 3、4 讲可知，为了从干涉相位中提取地表

形变信息，我们必须利用基线参数来扣除参考趋势面相位和地形相位的贡献。此外，在由干涉相位计算地表高程时，也需要使用基线参数。显然，基线参数在 InSAR 数据处理与分析中起着不可或缺的作用。

尽管雷达干涉所需的基线参数可从卫星轨道数据直接计算得到，但现有定轨技术所确定的轨道数据的精度有限，因而基线参数含有误差且会传播到干涉结果中去。在携带有 SAR 传感器的卫星系列中，欧洲空间局 ERS 卫星的定轨数据精度最好，但径向精度也只能达到 5-10 cm，其它卫星如 JERS-1 和 RADARSAT 的定轨数据精度更低。我们将在随后的误差传播分析中可以看出，基线参数绝对精度要求达到毫米级，但必须注意的是，前面述及的干涉相位误差呈现随机性，而基线参数的不确定性对干涉结果的影响呈现系统性的趋势，根据 Zebker 等人的研究^[5]，基线误差在干涉研究区域内呈现弱二次曲面的影响。

国际上有关学者已发展了一些求解或精化基线参数的方法，以此来降低基线误差对干涉结果的影响。这些方法大多基于地面控制点，对含有基线参数的干涉几何模型采用最小二乘方法来求解。众所周知，获取地面控制点数据有时是较困难或者昂贵的，如何合理地布置地面控制点也是必须考虑的问题。根据文献 1 的理论分析与实验结果可以得出如下结论：基于地面控制点和最小二乘估计方法可以用来精确地估计基线参数，而基线参数的精度明显受到地面控制点个数、地面控制点覆盖范围和控制点上观测数据的精度等因素的影响。控制点数据的精度越低，基线参数的精度就越低，其误差与控制点数据的误差近乎呈正比的关系。使用控制点个数越多，估计出的基线参数的误差就越小，但最显著的精度改善在 5~50 个控制点范围内，如果继续增加控制点个数，精度改善并不显著。与其它因素相比，控制点覆盖面积的大小对基线参数的精度影响最为显著，在控制点数目一定的情况下，控制点分布所覆盖的面积越大，基线参数的精度越高，实际上，控制点越分散，系统的几何强度越高，基线估计解的结果越稳定。

4 误差传播模型

回顾第 3 讲中的高程测量理论表达式(5)–(8)，基于误差传播定律，我们可以得到如下的高程误差模型^[5]：

(1) 高程误差 sh 与干涉相位观测误差 $s\phi$ 的关系表达式为（类似于第 3 讲式 15），

$$\begin{aligned} sh &= R_1 \sin q \frac{l}{4pB \cos(q+a)} sf \\ &= R_1 \sin q \frac{l}{4pB_{\perp}} sf \end{aligned} \quad (1)$$

(2) 高程误差 sh 与基线误差的关系表达式为,

$$\begin{aligned} sh &= (R_1/B) \sin q \sin a sB_x \\ sh &= (R_1/B) \sin q \cos a sB_y \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $B_x = B \cos a$, $B_y = B \sin a$ (参考第 3 讲中的图 3)。

回顾第 3 讲形变测量中的相位分量表达式 (10) — (13), 我们可以写出沿雷达视线方向地表位移观测测量 dr 的表达式为:

“两轨” / “四轨” 干涉:

$$dr = \frac{l}{4p} f_m - B_{\parallel}^0 - \frac{B_{\perp}^0 h}{R_1 \sin q_0} \quad (3)$$

“三轨” 干涉:

$$dr = \frac{l}{4p} f_m - B_{\parallel 2}^0 - \frac{l}{4p} \frac{B_{\perp 2}^0}{B_{\perp 1}^0} f_{t1} \quad (4)$$

为便于误差模型推导, 上面式中的基线分量 B_{\parallel}^0 和 B_{\perp}^0 可等价地表示为 (参考第 3 讲图 3 和图 5),

$$B_{\parallel}^0 = B_x \sin q_0 - B_y \cos q_0 \quad (5)$$

$$B_{\perp}^0 = B_x \cos q_0 + B_y \sin q_0 \quad (6)$$

基于误差传播定律, 我们可以得出如下形变误差模型:

“两轨” / “四轨” 干涉

$$s_{dr} = \frac{l}{4p} sf_m \quad (7a)$$

$$s_{dr} = (\sin q_0 + \frac{h \cot q_0}{R_1}) sB_x \quad (8a)$$

$$s_{dr} = (\cos q_0 + \frac{h}{R_1}) sB_y \quad (9a)$$

$$s_{dr} = \frac{B_{\perp}^0}{R_1 \sin q_0} sh \quad (10a)$$

“三轨” 干涉

$$s_{dr} = \frac{l}{4p} sf_m \quad (7b)$$

$$s_{dr} = (\sin q_0 + \frac{l \cos q_0}{4p B_{\perp 1}^0}) f_{t1} sB_{x2} \quad (8b)$$

$$s_{dr} = (\cos q_0 + \frac{l \sin q_0}{4p B_{\perp 1}^0}) f_{t1} sB_{y2} \quad (9b)$$

$$s_{dr} = \frac{l}{4p} \frac{B_{\perp 2}^0}{B_{\perp 1}^0} sf_{t1} \quad (10b)$$

$$s_{dr} = \frac{B_{\perp 2}^0}{B_{\perp 1}^0} \sin q_0 sB_{x1} \quad (11)$$

$$d_{dr} = \frac{B_{\perp 2}^0}{B_{\perp 1}^0} \cos q_0 sB_{y1} \quad (12)$$

基于欧洲空间局 ERS 卫星 SAR 系统参数, 给定地形干涉对垂直基线分量 $B_{\perp 1}^0 = 200$ m 和“地形—形变”干涉对垂直基线分量 $B_{\perp 2}^0 = 50$ m, 我们对差分干涉的形变误差进行了计算, 表 1 列出了基线分量误差、地形数据误差和干涉相位误差对地表位移观测测量 dr 引起的误差结果。显然, 基线误差的影响最为显著, 但必须再次指出, 基线误差的影响在整个干涉区域内呈现系统性的趋势 (即弱二次曲面), 因此, 可借助均匀分布在研究区域内的几个控制点 (具有外部高程或形变观测数据) 来纠正因基线引入的干涉高程或形变误差^[5]。

表 1 ERS 差分干涉系统情况下的形变误差传播分析示例

“两轨” / “四轨” 干涉			“三轨” 干涉		
误差源	给定误差大小	s_{dr} (mm)	误差源	给定误差大小	s_{dr} (mm)
f_m	20°	1.6	f_m	20°	1.6
B_x	10 cm	39.2	B_{x2}	10 cm	39.2
B_z	5 cm	46.0	B_{z2}	5 cm	46.0
H	30 m	4.5	f_{t1}	20°	0.0
			B_{x1}	10 cm	9.8
			B_{z1}	5 cm	11.5

5 进一步讨论——地形数据误差对形变测量的影响

在卫星重复轨道存在轻微偏移即干涉基线长度不为零的情况下，雷达差分干涉需要使用地形数据（如数字地面高程模型或地形干涉相位）从“地形—形变”干涉图（由跨越形变期的两个 SAR 图像生成）中扣除地形相位贡献。从误差模型式 10a 和 10b 可以看出，地形数据的不确定性对形变结果产生的误差影响与“地形—形变”干涉对的基线长度成正比。为达到要求的形变测量精度，长基线干涉比短基线干涉对地形数据的精度要求要高。

虽然前面已给出了与地形数据误差有关的形变误差模型，但地形数据误差对干涉形变结果的影响是系统性的还是随机性的，目前还存在争论。为进一步理解与澄清事实，并不失一般性，我们选择“四轨”差分干涉模式进行了模拟实验^[1]。在此实验中，我们模拟不同量级的随机或系统的高程误差加入到干涉 DEM 中，并作差分干涉处理，分析并比较由此产生的干涉形变结果的误差大小及其在空间尺度上的表现特性。为便于形变误差检测，这里的四轨方法仅采用两个 SAR 图像，即 1996 年卫星 ERS-1 和卫星 ERS-2 分别于 1996 年 3 月 18 和 19 日在深圳—香港上空通过时所获取的两幅 C 波段 SAR 图像（即串接飞行模式对）^[1]。也就是说，形变对与地形对（用于生成 DEM）的元数据是相同的，因为成像间隔仅为一天，因此整个考查区域内的干涉形变结果应该为零。此模拟实验就是对干涉 DEM 加入不同的高程误差，反复进行差分干涉，并提取形变误差。这样所得到的差分“形变观测”完全是由高程误差引入的（而非实际的地表位移）。形变误差追踪与分析比较是在所选定的 16 个明显特征点上来进行的。

实验结果表明^[1]：无论地形误差是随机的还是系统的，总体表现为形变误差量级随地形误差量级增大而增大，但是它们对差分干涉信号分析有着不同的负面影响。随机性的地形误差可导致差分干涉图相关系数显著降低，相关系数的降低几乎与地形高程的噪声水平呈线性关系，地形随机误差噪声水平越高，失相关越严重，这种因地形数据的随机误差而引入的失相关性（这里称之为地形失相关）在前面以及其它参考文献中均没有提及，应特别引起注意，地形失相关进一步增加了干涉数据的处理如相位解缠的难度。

系统性的地形误差几乎不会降低干涉相关性，但会严重地扭曲真实的形变测量结果。在地形数据

精度信息未知的前提下，很难确定地形系统误差对形变结果的影响范围和由此引入的形变误差的大小，因此，在完成干涉处理后应特别重视对形变结果精度的检查与分析，如与外部地面形变观测（如 GPS 数据）结果的相互对比。

一般来说，已有 DEM 中的系统误差占主导地位，因此，在“两轨”的差分模式中，地形数据引入的形变误差将主要表现为系统性。对于“三轨”和“四轨”差分模式来说，地形数据引入的形变误差将主要表现为随机性，这就要求在差分处理之前，我们必须对干涉 DEM 或地形干涉相位图作适度的空间滤波。

参考文献

- [1]Liu G.X., Mapping of Earth Deformations with Satellite Radar Interferometry: A Study of Its Accuracy and Reliability Performances [D]. Ph.D. thesis: Dept. of Land Surveying & Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, pp.250, 2003.
- [2]刘国祥, 刘文熙, 黄丁发. InSAR 技术及其应用中的若干问题 [J]. 测绘通报, Vol.8, pp.10-12, 2001.
- [3]Zebker, H.A., P.A. Rosen and S. Hensley, Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps [J]. Journal of Geophysical Research, Vol.102, pp.7547-7563, 1997.
- [4]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.
- [5]Zebker, H.A., C.L. Werner, P.A. Rosen and S. Hensley, Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.32, pp.823-836, 1994.

[收稿日期] 2005-4-25

[作者简介] 刘国祥(1968-),男,博士,现任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)。