

差分干涉雷达遥感在地质学中的应用研究

谭衢霖, 邵 芸

(中国科学院 遥感应用研究所, 遥感信息科学开放研究实验室, 北京 100101)

摘 要: 雷达差分干涉测量是当前雷达遥感的热点研究领域, 对地质学特别是地震、火山、大地构造的研究具有极其重要的意义。文章对差分干涉雷达遥感的原理及具体实现进行了深入研究, 并分析了差分干涉测量结果的误差, 着重阐述了差分干涉雷达遥感在地震、地表形变测量、火山监测、板块构造研究中的应用。

关键词: 雷达遥感; 差分干涉测量; 地学应用

中图分类号: p237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2001) 03-0143-06

1 概述

差分雷达干涉测量是雷达遥感领域的研究热点, 其基本原理是基于两幅对应的干涉纹图进行差分得到变化检测条纹图所进行的测量。这种技术对动态变化的高灵敏度、高空间分辨率及宽覆盖率使之在探测地表形变方面具有无可比拟的优越性, 可进行厘米量级或更小尺度的相对测量。作为一种新型的遥感测量技术手段, 差分干涉测量在探测地表动态变化方面得到了越来越广泛的应用^[1]。

在我国由于受数据源的限制, 干涉雷达技术应用研究的例子还较少, 利用 SIR-C 干涉数据提取 DEM 的研究已有报道^[2], 差分干涉测量技术成功用于地表形变探测的研究实例更少。随着一般干涉测量技术的日趋成熟和雷达遥感的进一步发展, 越来越多的星载雷达将具有获取干涉雷达数据的能力。我国也即将发射自己的星载雷达, 不久的将来, 我国也必将能获得自己的干涉数据源, 因此, 对差分干涉雷达测量的原理、实现流程及地学应用进行研究, 具有重要的意义。

2 差分干涉测量地表形变的原理

差分干涉测量技术是在雷达干涉测量的基础上发展起来的, 单轨双天线或重复轨道都可以获取干涉 SAR 数据。由于当前在轨的星载 SAR 系统全是单波段单天线的, 因此已有的一些关于差分干涉测量的研究大都采用重复轨道数据。在忽略大气影响, 内部时钟漂移等因素的情况下, 只要雷达观测期间地表的向后散射特性基本保持不变, 则生成的干涉图通常包含如下信息: ①相对轨道位置所引起的传播路程差。②地形所引起的立体路程差, 同基线距有关, 可通过 DEM 或另一幅干涉图消除地形影响。③数据获取时地形位移所引起的路程差, 每个干涉条纹相当于沿雷达视向半个波长的位移量。如果能够消除掉前二方面的信号, 那么剩下的第三个因素产生的干涉条纹信息可用于监测地表的动态变化, 这就是差分干涉测量的基本原理^[1]。根据消除地形效应所采用的方法不同, 差分干涉测量可分为两类, 分别是基于 DEM 模拟条纹和基于生成的从干涉纹图的差分测量, 但在基本原理上, 两者并没有太大的差别。

首先考虑在雷达观测期间不存在地表运动的情况, 如图 1 所示, 位于 A_1 和 A_2 的两部雷达系统对同一地表扫描带进行观测, 假设地表每个分辨单元对 A_1 和 A_2 作用机理相同, 传播路径分别为 ρ 和 $\rho + \delta\rho$, 则测量的相位差为:

$$\cong = \frac{4\pi}{\lambda} \delta\rho \quad (1)$$

收稿日期: 2001-03-26; 修订日期: 2001-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(49989001)资助。

作者简介: 谭衢霖(1975-), 男, 江西宁都人, 博士生, 主要研究方向为雷达遥感与 GIS 应用。

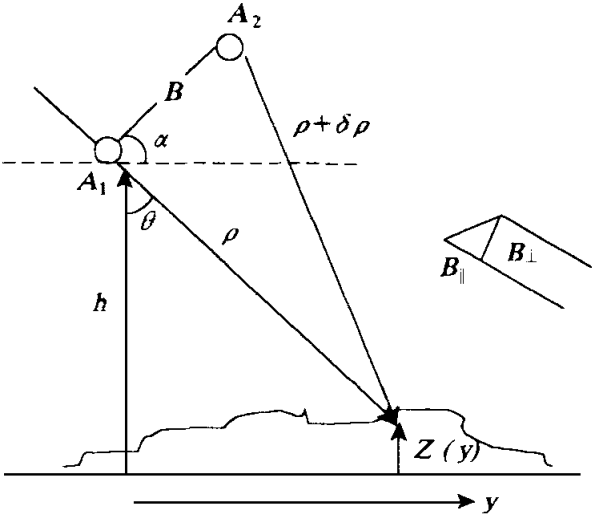


图 1 重轨 SAR 干涉测量几何示意

Fig. 1 Imaging geometry of repeat-pass SAR interferometry

从图中, 根据余弦定理可得:

$$(\rho + \delta\rho)^2 = \rho^2 + B^2 - 2\rho B \sin(\theta - \alpha) \tag{2}$$

B 为基线距, 雷达天线到地面某点距离为 ρ , 视角为 θ , 基线与水平面夹角为 α , 整理上式并忽略二次项 $(\delta\rho)^2$ 得:

$$\delta\rho \approx B \sin(\theta - \alpha) + \frac{B^2}{2\rho} \tag{3}$$

在星载情况下, 由于 $\rho \gg B$, 为便于分析忽略 $\frac{B^2}{2\rho}$ 得:

$$\delta\rho \approx B \sin(\theta - \alpha) = B_{\parallel} \tag{4}$$

$B_{\parallel}$ 为平行于斜距方向的基线距分量。所以, (1) 式也可写成

$$\approx \frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} \tag{5}$$

从 (5) 式可知干涉测量相位差为平行于斜距方向的基线分量与波数 $(2\pi/\lambda)$ 乘积的两倍。

假设在 ρ 和 θ 不变的情况下, 对同一地区生成第二幅干涉图 (主干涉图)。设主干涉图的基线距和基线与水平面的夹角分别为 B' 和 α' , 则平行于斜距方向的基线距分量为 $B'_{\parallel} = B' \sin(\theta - \alpha')$, 忽略大气影响因素, 由于在观测期间无地表运动, 只存在地形引起的相移, 与 (5) 式类似, 可得:

$$\approx \frac{4\pi}{\lambda} B'_{\parallel} \tag{6}$$

由 (5) 式和 (6) 式, 可得:

$$\frac{\approx}{\approx} = \frac{B_{\parallel}}{B'_{\parallel}} \tag{7}$$

即干涉图的相位之比为基线沿雷达视向的平行分量之比, 与地形无关。

现在考虑在雷达观测期间存在地表运动的情况, 并设在观测期间获取的雷达图像对仍然相关。在这种情况下, 干涉图上除了与地形相关的相位外, 还存在地表形变沿雷达视向的位移分量 $\Delta\rho$ 引起的相位变化。故干涉图的相位差 $\approx'$ 重写为:

$$\approx' = \frac{4\pi}{\lambda} (B'_{\parallel} + \Delta\rho) \tag{8}$$

由于前面生成的第一幅干涉图 (从干涉图) 不存在因地表运动产生的相位, 只有地形变化引起的相位 (忽略其他因素), 因此如果将从干涉图以比例因子 $\frac{B'_{\parallel}}{B_{\parallel}}$ 拉伸, 然后再与主干涉图相减, 则可以消除干涉图上的地形效应, 得到只含与地表形变相关相位的干涉纹图:

$$\approx' - \frac{B'_{\parallel}}{B_{\parallel}} \approx = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\rho \tag{9}$$

上式左边由干涉图的相位和轨道几何决定, 这样, 所得的差分干涉图的相位能够表示地表的动态变化, 地表形变沿雷达视向的位移分量 $\Delta\rho$ 在图像中每点可测。

为便于应用, 在实际数据处理中一般是用成像间隔内未发生地表形变的图像对提取出 DEM 或该区形变前原来已有的 DEM, 然后利用做变化检测的图像对的基线关系模拟出仅由地形引起的干涉条纹图, 再在主干涉条纹图中减去生成的模拟条纹图, 则最后得到的干涉条纹图只包含地表形变信息。

下面将对对比分析差分干涉图上相位变化对地形高程和地表形变的灵敏度。根据图 1 可知, 地表高程:

$$z = h - \rho \cos\theta \tag{10}$$

微分可得:
$$dz = \rho \sin\theta d\theta \tag{11}$$

将 (8) 式 $\approx'$ 分别对 θ 和 $\Delta\rho$ 微分, 由于 $\Delta\rho$ 与 $B'_{\parallel}$ 无关, 并结合 (4) 式给出的关系可得:

$$d\approx' = \frac{4\pi}{\lambda} B' \cos(\theta - \alpha') d\theta \tag{12}$$

$$\frac{d\approx'}{d\Delta\rho} = \frac{4\pi}{\lambda} \tag{13}$$

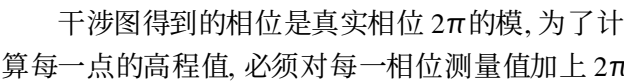
联立 (11) 和 (12) 式, 最后得到:

$$\frac{d\approx'}{dz} = \frac{4\pi B' \cos(\theta - \alpha')}{\lambda \rho \sin\theta} \tag{14}$$

由于 ρ 远大于基线 B , 从 (13) 和 (14) 式可知, 差分干涉测量相位对地表形变比对地形高程变化更为敏感。当干涉测量技术对地形高程达到米级精度时, 对形变测量能达到厘米或毫米精度。对于 ERS-1 数

具体流程如图 2 所示。进行差分干涉前, 针对一定的应用目的, 需要评价原始数据的质量。要得到良好的差分干涉图, 需要使得获取的雷达图像彼此相关, 从物理上而言, 即要求观测期间地表的后向散射特性保持不变, 一般用相干度作为评价数据质量的主要因子^[3]。

差分干涉测量的实现步骤可以分为两大步。第



的整数倍, 解决 2π 模糊性的处理过程即是相位解缠。当相邻像元的解缠相位变化的绝对值小于 π 时, 才能进行相位解缠。相位解缠取决于两个因子: 系统噪声和干涉条纹间隔。在高噪声区或当地形坡度大于雷达入射角时, 相位信号的采样率过低, 通常不能解缠。由于干涉条纹间隔同当地表面坡度有关, 通常坡度大的地方干涉条纹密度大于平地, 解缠相对困难些^[5]。在差分干涉测量中, 不论是用 DEM 模拟的地形干涉图还是直接用另一幅干涉图消除地形影响, 由于两幅干涉图上的相位断点并不一定出现在同一位置上, 因此在差分前要对每幅干涉图进行相位解缠处理。

3.2 误差分析

从根本原理而言, 差分干涉基于雷达波传播的时间延迟与相移的关系进行测量, 任何因素, 只要它能使雷达波产生一定的时间延迟, 理论上便能产生一定的相移, 对干涉条纹便有一定的贡献。这方面的常见因素有: 地形、地震、地面沉降等动态变化产生的位移, 大气、地物介电常数的变化, 轨道收敛等^[6]。理论上而言, 如果想精确知道地表形变的位移量, 需要在差分干涉图中消除除地表形变外其他所有因素所产生的相移。但实际情况下, 我们通常只考虑地形效应, 因此大气效应、轨道收敛等所产生的相移仍残留在差分干涉图中, 产生一定的误差。

另一方面, 不论是运用 DEM 还是干涉图来分离地形和形变产生的相移, 在最后的差分干涉图中总存在一定的残余地形影响, 基线距越小, 干涉测量对地形的灵敏度越低, 故残余的地形影响越小。一般利用产生一个干涉条纹的地形高度变化(即模糊高度)来衡量干涉测量对地形的灵敏度, 这样, 高度变化同相位变化的函数关系可以写为^[7]:

$$\delta_e = \frac{h_{2\pi}}{2\pi} \quad \delta_e \approx \frac{\lambda \rho}{4\pi B} \frac{\sin\theta}{\cos(\theta - \alpha)} \quad \delta_e \quad (15)$$

$h_{2\pi}$ 为模糊高度, B 为基线距, α 为基线倾角, θ 为入射角, ρ 为传感器与目标之间距离, λ 为波长, δ_e 为干涉图相位误差, δ_e 为相应的高度误差。根据上式, 可用模糊高度评价差分干涉图中残余的地形效应, 例如, 假设用 USGS DEM 消除地形效应, DEM 的垂直精度为 30 m, 干涉图的模糊高度为 220 m, 则用 DEM 消除地形效应时, 在差分干涉图中由 DEM 的误差所引入的干涉条纹数最多为 30/220, 若雷达系统波长为 56 mm, 则 DEM 所引入的误差为 $28 \times 30/220$, 约 4 mm。

利用已有的 DEM 消除地形影响, 由于只有地表

形变和 DEM 误差引起的干涉条纹残留在差分干涉图中, 需要进行相位解缠的区域相对较少。但残留的地形影响, 即 DEM 的误差易被传递到差分干涉图中, Zebker 讨论了这种方法的局限性^[8]。因此, 为克服 DEM 的这些缺陷, 他提出采用另一幅干涉图消除地形影响, 这种方法数据处理相对来说复杂些, 但地形残留相对前者而言较小, 精度更高, 自动化程度也更高。

4 地学应用

4.1 地震研究

全世界各地的地震每年使成千上万的人失去生命, 使几十亿美元的财产遭受损失。但是, 虽然世界各地的地震分布早已摸清, 可在地震预报, 即何时、何地、多大震级的问题上, 仍是鲜有进展。地表形变是发生地震最直接的表现现象, 因此, 利用雷达差分干涉技术测量地表形变对于地震研究具有重要的意义。

对于地震的研究, 相对于一般的大地形变测量仪器及方法(成本高、布点少, 且难以大范围追踪地壳形变), 差分干涉技术在许多方面具有无可比拟的优越性。相对于 GPS, 它不仅具有比 GPS 更高的形变观测精度、更高的采样密度(100 m 以内), 而且空间延续性好和无需建立地面接收站^[9]。

目前国际上利用雷达差分干涉技术进行地震研究的应用实例不少, 国内研究受数据源限制仍进展缓慢。如 1993 年 Massonnet 等运用 SAR 差分干涉技术研究了加州的 Landers 地震, 采用 ERS-1 在震前和震后得到的 SAR 图像得到了干涉条纹图, 用研究区的 DEM 消除地形影响后, 在干涉纹图中残余的信息为地震残差位移。干涉图中每个条纹表示 28 mm 的位移量, 干涉图北部无干涉条纹, 断层附近波瓣中心干涉条纹最多, 达到 20 条, 最大位移量为 56 cm。与地面测量数据比较, 两者之间标准偏差为 1.2 个干涉条纹, 即约 34 mm。生成的差分干涉图与根据弹性半球位移模型模拟的干涉图非常一致^[10]。

同样以加州的 Landers 地震为研究区, Zebker 等利用差分干涉测量的另一种实现技术得到了更精确的结果^[8]。Zebker 认为, 用 DEM 消除地形影响, 由于已有的 DEM 可能精度不高, 不能满足所需的精度要求且 DEM 所包含的误差可能被传递。为了克服这些限制因素, Zebker 等采用震前、震后的 3 景

ERS-1 原始数据, 分别利用 1992 年 3 月 24 日和 8 月 7 日, 7 月 3 日和 8 月 7 日的原始数据对生成了两幅干涉图, 由于采用震后的干涉图消除地形影响, 所生成的差分干涉图精度较高, 与 GPS 和电子距离测量所得的数据对比, 相关系数达到 0.96, 标准偏差为 18.9 cm。

但是总体而言, 目前的研究还处于为研究地震的内部机理及建模提供原始模拟数据, 并对震前、震后地表形变进行观测的层次上, 将来随着雷达分辨率的提高以及更高信噪比的多频雷达技术的日趋成熟, 有可能采用这种技术实时预报地震。

4.2 火山监测

火山灾害在爆发前, 会产生地壳形变, 其量级较地震更大, 因此对敏感区实施定期观测, 将能捕捉火山爆发的前兆, 以便及时发出预报。因此, 利用雷达差分干涉测量技术对世界活动火山进行监测, 对预报火山爆发是很有前景的监测技术手段。相对于用水平仪、测倾仪、三边测量和 GPS 等测量方法, 差分雷达干涉测量具有更高的空间采样。不过, 就当前的星载 SAR 系统而言, 时相采样没有前面的几种方法高。但是, 大范围的地表形变采样和合适的时相间隔测量却能够很好的表征地下构造活动的特性, 甚至因此可以利用简单的模型(如地下点源形变模型)来估计地下岩浆活动的深度^[11]。

雷达差分干涉测量监测火山一个非常成功的实例是 Massonnet 等对意大利南部西西里埃特纳活火山的研究^[12]。在该项研究中, 他们利用分别于 1992 和 1993 年获取的 ERS-1C 波段 SAR 图像集(间隔时间为 13 个月), 来对由于地下岩浆活动引起的地表形变进行差分干涉测量。由于变化干涉图上一个条纹代表 28 mm 的斜距向地形变化, 因此用 C 波段的 SAR 系统进行差分干涉测量地表形变非常灵敏。他们研究的测量结果表明, 在数据获取 13 个月时间间隔中, 地表的形变量达 110 mm。

4.3 构造运动测量

重轨星载雷达差分干涉测量技术适于对活动比较剧烈的区域, 如每年几厘米的运动速率的构造运动测量。但在运用中必须注意, 由于大气分布的不均匀性(如水汽含量变化), 会给变化检测条纹图引入额外(即非地表形变引起)的干涉条纹。因此, 获取观测区域的多干涉图像对是非常必要的, 在多个测量结果中可以通过“多数决定法”来确定正确的地表形变大小^[13, 14]。

一般而言, 由于长波长对时相去相关(植被生长

去相关、土壤湿度去相关等)不敏感, 故从去相关的角度考虑, 测量中使用长波长 SAR 系统要优于短波长的 SAR 系统。但另一方面, 就形变灵敏度而言, 由于地表形变测量的灵敏程度和雷达半波长相关, 这样一来, 长波长 SAR 系统没有短波长 SAR 系统对形变敏感。

6 结论与讨论

(1) 作为一种新型的大地形变测量技术, 差分干涉测量对地表动态变化具有很高的灵敏度, 可进行厘米量级或更小尺度的相对测量。

(2) 差分干涉技术的主要限制因素在于其数据获取条件的苛刻性, 即首先要求雷达回波在观测期间高度相关, 这使得差分干涉测量技术不太适于时间跨度过大(如几十年)的形变测量。

(3) 就数据处理而言, 雷达干涉测量技术已经发展得比较成熟, 需要进一步完善的是相位解缠算法。对于差分干涉则要求有很好的相位解缠算法、图像匹配技术等。目前研究的主题是在应用中的局限, 例如, 数据的实用性、处理软件、技术规范等。

(4) 差分干涉测量技术为地表形变研究开创了新的思路, 将会对地学特别是地震学的研究产生深远的和革命性的影响, 可以期待差分干涉测量与 GPS、高分辨率多光谱遥感等其他高新技术的配合使用, 将成为地震监测、震害评估及其他灾害减轻的重要技术手段。随着新的遥感平台和传感器的出现, 差分干涉技术在我国必将有飞速的发展。

参考文献:

[1] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry[J]. J. Geophys. Res., 1989, 94(B7): 9183-9191.

[2] Wang Chao. DEM Generation using SIR-C/X-SAR interferometric data[J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(1): 46-49.

[3] Gens R, Genderen V J. SAR interferometry issues, techniques, applications[J]. Int J Remote Sensing, 1996, 17(10): 1803-1835.

[4] Kimura H, Todo M. Baseline Estimation Using Ground Points for Interferometric SAR[A]. IGRASS'97, 1997: 442-444.

[5] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping[J]. Radio

Sci., 1988, 23(4): 713-720.

- [6] Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes. IEEE Trans[J]. Geosci. Remote Sensing, 1992, 30(5): 950-959.
- [7] Zebker H A, Goldstein R M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations[J]. J. Geophys. Res., 1986, 91(B5): 4993-4999.
- [8] Zebker H A, Rosen P, Goldstein R M, *et al.* On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake[J]. J. Geophys. Res., 1994, 99: 19617-19634.
- [9] Zhang Jin-fa, Shao Yun. SAR Interferometry and Its Application Review[J]. Seismology and Geology, 1998, 20(3): 277-288.
- [10] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, *et al.* The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry

[J]. Nature, 1993, 34(6433): 138-142.

- [11] Ross S L, Christopher D E. Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications[M]. London: Taylor&Francis Ltd., 1 Gunpowder Square, EC4A 3DF, 1999.
- [12] Massonnet M, Briole P, Arnaud A. Deflation of Mount Etna Monitored by Spaceborne Radar Interferometry[J]. Nature, 1995, 375: 567-570.
- [13] Werner L, Rosen P, Hensley S, *et al.* Detection of aseismic creep along the San Andreas fault near Parkfield, California with ERS-1 radar interferometry[A]. 3rd ERS Symposium 'Space at the Service of our Environment.' 1997.
- [14] Meyer B, Armijo R, Massonnet D, *et al.* The 1995 Grevena (Northern Greece) earthquake: Fault model constrained with tectonic observations and SAR interferometry[J]. Geophysical Research Letters, 1996, 23(19): 2677-2680.

STUDY ON APPLICATIONS OF RADAR DIFFERENTIAL INTERFEROMETRY TECHNOLOGY TO GEOSCIENCES

TAN Qu-lin, SHAO Yun

(Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Application,
C.A.S. Beijing 100101, China)

Abstract: Radar differential interferometry is an up-to-date frontier research for radar remote sensing. It is grandly significant to earth sciences, especially to seismology, volcano, tectonics and crust deformation studies. In this paper, the mechanism and operational procedure of radar differential interferometry are introduced. The errors of measurement result of radar differential interferometry are analyzed. The emphasis is paid to the applications to seismology, volcano, tectonics and crust deformation studies. Finally, the characteristics and limitation are analyzed.

Key words: radar remote sensing; differential interferometry; geoscience applications