

文章编号: 0494-0911(2011)05-0010-03

中图分类号: P237

文献标识码: B

差分干涉雷达测量技术大气延迟分析

付春永, 谭克龙

(中煤航测遥感局, 陕西 西安 710054)

Analysis of Atmospheric Delay for D-InSAR

FU Chunyong, TAN Kelong

摘要: 在分析大气延迟原理的基础上, 利用差分干涉像对组成闭合环, 通过查看闭合环相位直方图分布来判断大气延迟的存在与否, 并用差分干涉相位相加减的方法消除大气延迟的影响, 利用该方法对原来不能产生干涉条纹的干涉像对进行处理, 取得良好的效果。

关键词: 差分干涉雷达测量技术; 大气延迟; 闭合环; 直方图

一、引言

在地表形变监测领域, 同 GPS、水准测量等方法相比, 差分干涉雷达测量技术 (differential Interferometry synthetic aperture radar, D-InSAR) 技术属于后起之秀^[1]。它因具有高空间分辨率、低成本、全天候等优势而引起了研究者们的高度关注。该技术不仅为测量学和地球物理学工作者提供了监测各种地形形变的有效技术手段, 同时也在其他领域 (如灾害学、气象学等) 也有着广阔的应用前景^[2-3]。然而, 水准、GPS 测量等仍旧是目前监测地表变形的主要手段, 一方面是因为这些传统测量技术有其先天优势; 另一方面则是因为 D-InSAR 在监测矿区沉降方面存在诸多技术难题, 其中大气延迟是制约其发展的重要因素。D-InSAR 在地表三维重建与形变探测应用中主要受到两大因素的制约^[4], 即时间失相关和大气影响。

综观国内外文献, 系统解决雷达干涉时间失相关和大气影响的成熟方案并未出现, 这极大地制约了干涉技术的广泛应用和其应用领域的继续扩展。如要使 InSAR 在我国推广应用 (特别是区域形变探测), 必须有效地解决这两个问题^[5]。本文在介绍大气延迟原理的基础上, 通过闭合环理论确定大气延迟的存在, 并用相位相加减的方法消除其影响。

二、大气延迟原理

雷达信号在往返过程中通过对流层和电离层时, 由于这两个大气层具有可变折射率, 因此会导

致信号延迟和路径弯曲。再加上地形起伏, 湿度在空间上发生变化, 所以干涉纹图中可能出现波浪形、云状、平面等异常现象, 致使相位测量精度降低, 制约了形变信息的提取, 从而导致形变监测精度降低。对重轨干涉测量来说, 每一次大气延迟都不相同, 相位变化主要受对流层影响。下面以两轨法为例说明大气延迟对差分干涉测量产生的相位差。大气延迟的相位误差对两轨法地表形变差分干涉测量的影响是直接的^[6], 即

$$\sigma_{\Delta R_{two}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sigma_{\phi} \quad (1)$$

式中 $\sigma_{\Delta R_{two}}$ 是双轨法差分干涉测量形变误差; σ_{ϕ} 是干涉图中的相位误差。通过式 (1) 可以看出, 大气效应对双轨法干涉测量与垂直基线无关。但对于三轨法来说, 差分干涉测量相位 $\phi = [\phi_d, \phi_t]$ 的协方差矩阵为

$$Cov_{\phi_{three}} = \begin{bmatrix} \sigma_{\phi}^2 & \frac{1}{2}\sigma_{\phi}^2 \\ \frac{1}{2}\sigma_{\phi}^2 & \sigma_{\phi}^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据误差传播定律, 大气效应引起的相位误差对三轨法地表形变测量的影响为

$$\sigma_{\Delta R_{three}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{1 - \frac{B_d}{B_t} + \left(\frac{B_d}{B_t}\right)^2} \sigma_{\phi} \quad (3)$$

式中 $\sigma_{\Delta R_{three}}$ 表示三轨法干涉测量的形变误差; B_d 表示形变像对的基线; B_t 表示地形像对的基线; σ_{ϕ} 表示干涉图中的相位误差。由式 (3) 可知, 在进行三轨法差分干涉测量时, 大气延迟对差分结果的影

收稿日期: 2011-03-02

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2007AA120305)

作者简介: 付春永 (1984-) 男, 河南社旗人, 硕士, 主要研究方向为雷达干涉测量。

响与干涉基线有很大关系,形变像对的基线要小于地形像对的基线。

三、试验分析

1. 理论基础

假设在某一地区先后获得3幅影像A、B和C,组合生成3个差分干涉像对AB、AC和BC。在理想条件下,对单独的每个像元来说,其在3幅干涉图上的绝对形变值的线性组合 $AB + BC + CA$ 应该为零,即3幅干涉图应该是一个闭合环。可表示为^[7]

$$D_{AB}(i, j) + D_{BC}(i, j) + D_{CA}(i, j) = 0 \quad (4)$$

式中 D 为绝对形变值; (i, j) 为中心像元的坐标。

由于在3幅干涉图中难免会出现噪声,所以并不是所有像素的线性组合都为零。这些像素的直方图可以明确地显示出来。因此,设 K 为常数,即

$$D'_{AB}(i, j) = D_{AB}(i, j) + K \quad (5)$$

则式(5)可变换为

$$D'_{AB}(i, j) + D_{BC}(i, j) + D_{CA}(i, j) = K \quad (6)$$

从式(6)可知,单个像素的线性组合在直方图

上应集中在 K 。

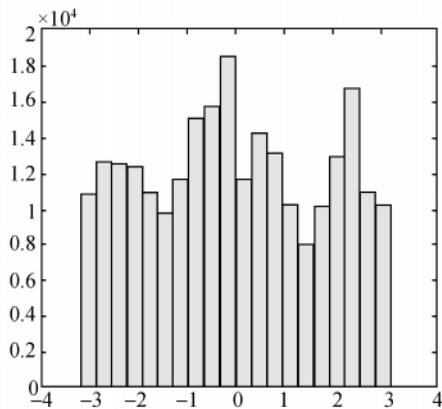
2. 大气延迟的确定

基于上述理论,设计试验如下:选择伊朗巴姆地震的3幅影像,分别组成干涉像对。为了试验方便,本文对每个强度图都进行裁剪,反复试验,最终选择中心经纬度为 $29.060^\circ W, 58.450^\circ E$,行数选择10000,列数选择2000。试验结果反映该裁剪基本上覆盖了地震前后发生形变的区域,所选干涉对基本信息如表1所示。

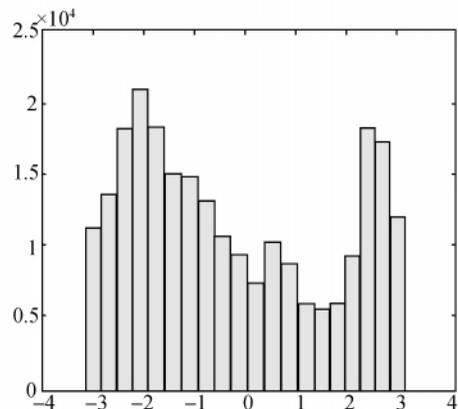
表1 所选用数据的基本信息

干涉像对	主影像	辅影像	垂直基线/m	时间基线/d
A	9 693	9 192	453	35
B	9 192	10 194	33	70
C	9 693	10 194	420	35

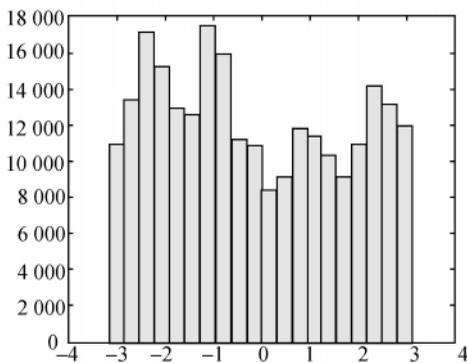
将生成的3幅干涉像对在Matlab中显示其相位值,并分别用直方图的形式统计相位值(如图1所示)。



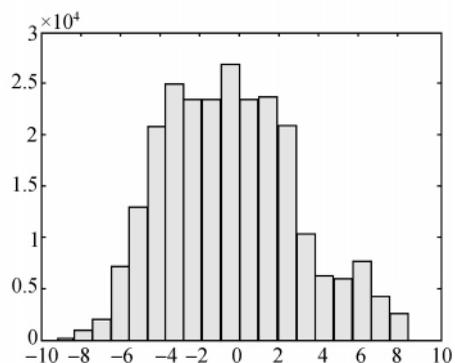
(a) A的直方图



(b) B的直方图



(c) C的直方图



(d) (A+B+C)的直方图

图1 干涉像对的直方图

在图1的4个直方图中,横坐标表示相位值,纵坐标表示像素个数,A、B和C3个单独的直方图上

没有什么规律,它们反映的是在形变发生的时间段内,相位变化和地面沉降值保持一致。但从(A +

$B + C$) 的直方图上可以明显地看出,像素最大统计值出现在相位零值向左偏差大概 0.5 个相位,并且两边基本呈现对称分布。这说明两点:①从整体上验证了 3 个差分干涉相位图的线性组合应为一个闭合环,即单位像素在 3 个干涉图的相位和应该是零值,这在干涉图中体现为某一点的沉降值应为零;②像素最大统计值在相位零值向左偏差大概 0.5 个相位,这说明某一干涉图上存在噪声(主要体现在相位延迟上),式(6)说明了这一点。

由于影像数量有限,并不能推断出具体的相位延迟是出现在哪幅影像上,笔者根据经验推断:由于在试验中,影像对 9693×9192 和影像对 9192×10194 都取得了相当好的差分干涉图,而影像对 9693×10194 干涉效果不好,虽然其时间基线和影像对 9693×9192 相同,但垂直基线偏小,因此可以推断其间产生了大气延迟。

3. 大气延迟的消除

为了消除影像对 9693×10194 干涉像对的大气延迟,笔者基于这样一种假设:有 3 幅影像 E, F 和 G 分别组成 3 个干涉像对 EF, FG 和 EG ,前两个干涉像对都取得了不错的干涉效果,干涉像对 EF 可以看做是 $E - F$ 取得的相位差。同样,干涉像对 FG 可以看做是 $F - G$ 取得的相位差,则 $(E - F) + (F - G)$ 就得到 $E - G$,即得到干涉像对 EG 的相位干涉相位图。图 2、图 3 分别是用上述方法得到的干涉像对 9693×10194 的差分干涉图及其直方图。

从图 2、图 3 可以看出,干涉效果还不是太理想,但与原来不能产生干涉条纹相比,已经取得了不小的进步,具体操作上还有待进一步改进,直方图基本反映了 9693×10194 的相位信息。

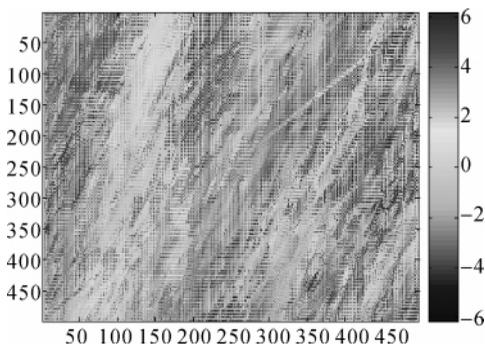


图 2 9693×10194 差分干涉图

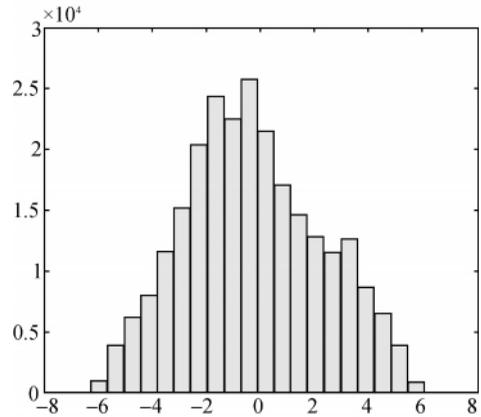


图 3 9693×10194 直方图

四、结束语

本文研究了大气延迟的原理,并利用闭合环原理判断大气延迟的产生与否,采用相位相加减的方法消除其影响,并利用试验数据加以验证,取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] ZEBKER H A, ROSEN P. On the Derivation of Coseismic Displacement Fields Using Differential Radar Interferometry: the Landers Earthquake [C]//IGARSS '94. Pasadena, CA, USA: [s. n.], 1994: 286-288.
- [2] GONG Lixia, ZHANG Jingfa, GUO Qingshi. Measure Groundwater Pumping Induced Subsidence with D-InSAR [C]// Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium. Seoul, Korea: [s. n.], 2005: 2169-2171.
- [3] 王超,张红,于勇,等. 雷达差分干涉测量[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(3): 13-17.
- [4] 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, 2001(8): 10-12.
- [5] 刘国祥. InSAR 应用实例及其局限性分析[J]. 四川测绘, 2005, 28(3): 139-143.
- [6] 王志勇. 星载雷达干涉测量技术在地面沉降监测中的应用[D]. 青岛: 山东科技大学, 2007.
- [7] USAI S. A New Approach for Long Term Monitoring of Deformations by Differential SAR Interferometry [M]. Delft, America: Delft University Press, 2001.