

机载差分干涉 SAR 的误差分析

钟雪莲^{①②} 向茂生^① 岳焕印^① 郭华东^③

^①(中国科学院电子学研究所 微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

^③(中国科学院对地观测与数字地球科学中心 北京 100190)

摘要: 该文就机载差分干涉中影响精度的几个重要因素进行了详细的分析, 为开展机载差分干涉应用提供理论基础。首先考虑机载差分干涉算法流程中引入的误差, 指出必须利用外部 DEM(Digital Elevation Model)计算本地视角才能实现高精度的形变反演。随后, 重点讨论了影响差分干涉 SAR (Synthetic Aperture Radar) 的几个重要影响因素: 系统参数误差、相干性和大气效应。系统参数中基线和基线角的误差对差分干涉的精度影响最大, 由此对机载残余运动的补偿提出了很高的要求。相干性分析又对机载差分干涉中形变像对的基线长度提出了严格的限制条件。和星载 SAR 一样, 机载 SAR 同样受到大气的影 响。通过计算这些因素的对机载差分干涉精度的影响, 给出了机载差分干涉精度的表达式。

关键词: 机载 SAR 差分干涉; 精度; 大气效应; 相干性

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)04-0941-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00377

Error Analysis for Airborne Differential SAR Interferometry

Zhong Xue-lian^{①②} Xiang Mao-sheng^① Yue Huan-yin^① Guo Hua-dong^③

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

^③(Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper mainly analyzes the important factors that influence the accuracy of airborne differential SAR interferometry. The error induced by the processing procedure of differential SAR interferometry is first considered, and it is pointed out that external DEM is indispensable to achieve high accuracy in detecting and monitoring deformations of the earth's surface. Then several factors, i.e. system parameters, coherence and atmosphere, are discussed in detail. Among these factors, baseline length and orientation play a much more crucial role, and that means high quality of motion compensations are necessary. By connecting the coherence with the accuracy of airborne SAR differential interferometry, the flight path for repeat-pass interferometry have to be precisely controlled to meet the baseline requirement. Similar to spaceborne SAR, Airborne SAR also suffers atmosphere effect. After discussing all these factors, the mathematical expressions of the accuracy are presented for airborne differential SAR interferometry.

Key words: Airborne differential SAR interferometry; Accuracy; Atmosphere effect; Coherence

1 引言

目前, 星载 SAR 干涉测量的理论研究已经成熟, 正在向实用化的方向发展。但是, 重访周期长, 数据分辨率低, 形变观测受轨道的限制且基线不可控, 这些缺点使得星载差分干涉在监测快速或精度要求较高的地表形变时受到极大的限制。而机载

SAR 系统正好可以弥补星载 SAR 系统的上述不足。它具有良好的机动性, 分辨率高, 不受飞行轨道的限制。借助于高精度的 DGPS/INS 或 IMU 导航系统, 机载重轨干涉的基线长度完全可以控制在几米至十几米的范围内, 减小了几何去相干的影响。这些优势使得机载差分干涉在地表形变(如滑坡、地面沉降、火山、地震等)的监测中具有广阔的应用前景。鉴于这一点, 有必要开展机载差分干涉 SAR 的理论和试验研究。

不同于机载双天线系统获取数字地面高程, 机

2009-03-23 收到, 2009-10-09 改回

国家 863 计划项目(2007AA120302)和国家 973 计划项目(2009CB72400304)资助课题

通信作者: 钟雪莲 sherryzxl@163.com

载形变监测必然涉及到机载重轨干涉, 而重轨使得研究的问题复杂化了。各国在该领域的研究也正处于起步阶段。Rosen 等人提出将 SAR 系统装载在无人机上监测火山、地震、泥石流等快速形变地区^[1], 但该计划仍处于论证阶段。就公开发表的文献来看, 目前只有 DLR 和意大利正在开展机载差分干涉的试验和研究工作^[2-6]。他们的研究重点主要集中在机载运动补偿上, 却没有涉及从总体上分析机载差分干涉的精度。本文主要就这一点展开讨论, 为开展机载差分干涉应用提供理论分析的基础。讨论的重点有两个方面: 干涉处理算法流程中引入的误差; 外界因素造成的误差, 如系统参数、相干性、大气效应等。在分析多种误差效应的基础上, 给出了机载差分干涉精度的表达式。

2 差分干涉算法流程中引入的误差

如果不考虑长时序的情形, 差分干涉 SAR 可以根据所需 SAR 图像的数目, 分为 2 轨、3 轨和 4 轨差分干涉。2 轨差分干涉需要外部 DEM 的加入, DEM 的精度也会影响差分干涉的精度。对于图 1 所示的机载 SAR 干涉的几何关系, 利用 2 轨差分干涉得到的地表形变为

$$\rho_{\text{diff}} = -\frac{\lambda}{4\pi} \phi_{\text{defo}} - \left(\rho - \sqrt{\rho^2 + B^2 - 2\rho B \sin(\theta - \alpha)} \right) \quad (1)$$

其中 ρ_{diff} 表示计算的形变量, ϕ_{defo} 为形变像对的干涉相位, 其它参数见图 1。将式(1)对高程 h 求导, 就可以得到 DEM 精度对差分干涉的影响:

$$d\rho_{\text{diff}} = \frac{-2\rho B \cos(\theta - \alpha)d\theta}{\rho_1} = \frac{-2B_{\perp}}{\rho_1 \sin \theta} dh \quad (2)$$

可以看出, 视角 θ 越小, 垂直基线 B_{\perp} 越大, 高程误差的影响也越大, 且与 SAR 系统的工作波长无关。计算不同基线角 α 下, DEM 误差引起的 2 轨差分误差(见图 2)。从图中看到, 要达到 mm 级的形变监测精度, DEM 的精度必须达到 1 m 以上, 如此高精度的 DEM 通常是难以获取的。

相比较而言, 常规的 3 轨差分干涉处理较为简单, 本文主要以 3 轨差分为例进行讨论。星载差分干涉 SAR 处理中, 为了避免获取本地视角, 通常都需要进行去平地效应。同样利用图 1 中的几何关系, 以 ϕ_{12} , ϕ_{13} 分别表示形变像对和地形像对生成的干涉相位。 ϕ_{13} 去平地后的相位为

$$\begin{aligned} \phi_{13\text{flat}} = & -\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\rho^2 + B_1^2 - 2\rho B_1 \sin(\theta - \alpha_1)} \\ & + \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\rho^2 + B_1^2 - 2\rho B_1 \sin(\theta_{fe} - \alpha_1)} \quad (3) \end{aligned}$$

其中 B_1 、 α_1 分别是地形像对的基线和基线角, θ 是实际的视角, θ_{fe} 是地面上的视角。对式(3)在 θ_{fe} 附近做 θ 的泰勒级数展开, 得到^[7]

$$\phi_{13\text{flat}} = \frac{4\pi}{\lambda} (\theta - \theta_{fe}) \frac{\rho B_1 \cos(\theta_{fe} - \alpha_1)}{\rho'_1} \quad (4)$$

其中 $\rho'_1 = \sqrt{\rho^2 + B_1^2 - 2\rho B_1 \sin(\theta_{fe} - \alpha_1)}$ 。同理, 也可以得到形变像对的泰勒级数展开 $\phi_{12\text{flat}}$ 。假设 $B_1 = B_2$, 那么差分干涉相位 ϕ_{diff} 为

$$\begin{aligned} \phi_{\text{diff}} = & -\frac{8\pi}{\lambda} \\ & \frac{\rho B_2^2 \Delta h \cos(\theta_{fe} - \alpha_2) \cos\left(\theta_{fe} - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) \sin\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right)}{\rho'_2 \rho'_1 \sin\left(\frac{\theta + \theta_{fe}}{2}\right)} \quad (5) \end{aligned}$$

这里, B_2 , α_2 分别是形变像对的基线和基线角, $\rho'_2 = \sqrt{\rho^2 + B_2^2 - 2\rho B_2 \sin(\theta_{fe} - \alpha_2)}$, Δh 是实际高程与参考平地高程间的差值。在地面没有发生形变的情形下, 式(5)就表示由于去平地方法而引入的形变误差(见图 3)。近距离的误差巨大, 究其原因, 主要是机载平台实际视角与计算的视角差异太大, 而在星载情况下, 几百米的高程差异引起的形变误差不到 1 mm。因此, 对于机载平台来说, 实现高精度的 3 轨差分干涉, 不能采用去平地的方法, 而必须考虑目标的本地视角。

本文直接使用 Macedo 等人提出的方法, 亦即减去地形引起的相位, 利用残余相位进行计算^[7]

$$\phi_{13\text{resi}} = \phi_{13} + \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\rho^2 + B_1^2 - 2\rho B_1 \sin(\theta_{\text{topo}} - \alpha_1)} \quad (6)$$

$\phi_{13\text{resi}}$ 是地形像对的残余相位, θ_{topo} 是通过外部 DEM 计算出的视角。同样可以计算形变像对的残余相位 $\phi_{12\text{resi}}$ 。这样, 可以通过式(7)来获得差分干涉的相位:

$$\phi_{\text{diff}} = \phi_{12\text{resi}} - q\phi_{13\text{resi}} \quad (7)$$

这里, $q = \frac{B_2 \cos(\theta_{\text{topo}} - \alpha_2)}{B_1 \cos(\theta_{\text{topo}} - \alpha_1)}$ 。这样就可以利用精度

不高的外部 DEM 进行高精度的地表形变反演。这点将在 3.1 节中进一步说明。

3 影响干涉 SAR 的几个重要因素

第 2 节在分析算法流程对差分干涉的影响时, 认为各条件都是理想的, 而实际情况中, 仪器测量误差、相干性、大气效应等因素的影响是必须要考虑的。下面就这些误差进行分析。

3.1 系统参数

在差分干涉过程中, 会由于各种系统参数测量的误差而影响差分干涉测量的最终精度, 主要有:

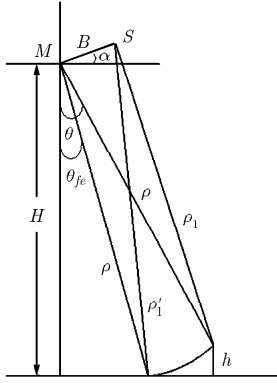


图 1 机载 SAR 干涉的简单几何关系图 (H 是载机高度, ρ, ρ_1 分别是主、辅图像与目标间的斜距, B, α 分别是基线长和基线角, 目标高程为 h)

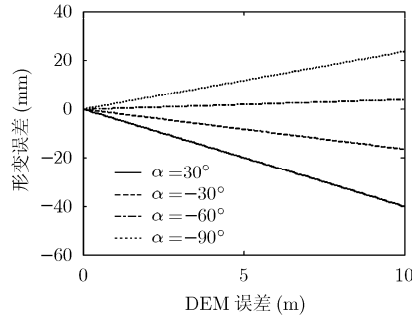


图 2 两轨差分中由于 DEM 误差引起的形变误差(载机高度 7 km, 斜距 8.5 km, 基线 20 m, 实际高程 100 m)

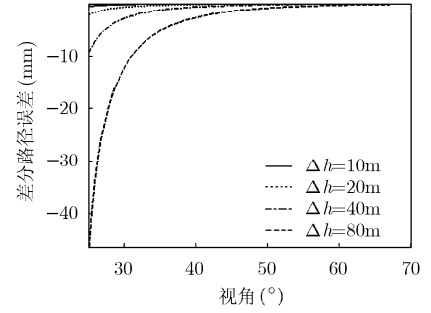


图 3 去平地效应引起的形变误差(载机高度 7 km, 目标实际高程 100 m, $B_1 = B_2 = 10$ m, 基线角 $\alpha_1 = -70^\circ, \alpha_2 = 50^\circ$)

斜距 ρ , 地形像对的基线 B_1 、基线角 α_1 , 形变像对的基线 B_2 、基线角 α_2 , 外部高程 h , 载机高度 H 以及相位误差。如果使用 Macedo 等人的方法计算, 那么将式(7)分别对各因素求偏导数就可以得到形变相位相对于各因素的敏感度因子:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_{\text{diff}}}{\partial \rho} &= \frac{4\pi}{\lambda} \left(1 - \frac{\rho - B_2 \sin(\theta_{\text{topo}} - \alpha_2)}{\rho_2'} \right) - \frac{4\pi q}{\lambda} \left(1 - \frac{\rho - B_1 \sin(\theta_{\text{topo}} - \alpha_1)}{\rho_1'} \right) \\ \frac{\partial \phi_{\text{diff}}}{\partial B_1} &= \frac{q \cdot \phi_{13\text{resi}}}{B_1} + \frac{4\pi q}{\lambda} \frac{B_1 - \rho \sin(\theta_{\text{topo}} - \alpha_1)}{\rho_1'} \\ \frac{\partial \phi_{\text{diff}}}{\partial \alpha_1} &= q \cdot \tan(\theta_{\text{topo}} - \alpha_1) \cdot \phi_{13\text{resi}} + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\rho B_2 \cos(\theta_{\text{topo}} - \alpha_2)}{\rho_1} \\ \frac{\partial \phi_{\text{diff}}}{\partial B_2} &= \frac{-4\pi}{\lambda} \frac{B_2 - \rho \sin(\theta_{\text{topo}} - \alpha_2)}{\rho_2'} - \frac{q \cdot \phi_{13\text{resi}}}{B_2} \\ \frac{\partial \phi_{\text{diff}}}{\partial \alpha_2} &= -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_2 \rho \cos(\theta_{\text{topo}} - \alpha_2)}{\rho_2'} - q \cdot \tan(\theta_{\text{topo}} - \alpha_2) \cdot \phi_{13\text{resi}} \\ \frac{\partial \phi_{\text{diff}}}{\partial \alpha_2} &= -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_2 \rho \cos(\theta_{\text{topo}} - \alpha_2)}{\rho_2'} - q \cdot \tan(\theta_{\text{topo}} - \alpha_2) \cdot \phi_{13\text{resi}} \\ \frac{\partial \phi_{\text{diff}}}{\partial \phi_{13}} &= -q, \quad \frac{\partial \phi_{\text{diff}}}{\partial \phi_{12}} = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

其中 ρ_1', ρ_2' 是从外部 DEM 计算出的地形和形变像对的辅图像的斜距, $B_{2\perp} = B_2 \cos(\theta_{\text{topo}} - \alpha_2)$, 是形变像对的垂直基线。

分析上述各敏感度因子发现: 对于 B_1 和地形像对的相位 ϕ_{13} , q 起主要作用, 因此, 必须增大 B_1 , 减小 B_2 以降低它们的敏感度; 对于 B_2 , 主要是第 1

项起作用, B_2 本身的影响很小; 对于 α_1, α_2 以及高程 h , 减小 B_2 有助于降低它们的敏感度; 载机高度 H 与高程的敏感度表达式基本相同。从以上分析中可以看出: 要降低各个因素的敏感度, 应尽量减小形变基线, 同时增大地形基线。对于机载差分干涉的精度来说, 除相位 ϕ_{13}, ϕ_{12} 外, 各个因素的敏感因子不随波长而改变。

根据以上敏感度因子的表达式, 绘出各个因素的敏感度随视角变化的情况, 见图 4。由于篇幅的限制这里省略了 α_2, B_2 的变化。可以看到: 斜距误差引起的差分误差是很小的, 可以忽略不计; 基线的长度测量必须达到毫米级, 这对机载运动补偿提出了严峻的要求; 外部高程的精度达到 20 m 就可以使用。在干涉系统的几何关系确定的情况下, 干涉相位本身的测量误差才导致差分干涉的精度误差, 而干涉相位的测量误差只与 SAR 图像的相干性有关。关于相干性将在下一节中专门讨论。

3.2 相干性

相干性是 SAR 干涉的基础和核心。有关相干性的分析, 见于以前的很多文献中^[8-10]。根据去相干产生的因素, 可以分为基线去相干、时间去相干、体散射去相干、噪声去相干、数据处理去相干等等。对于分布式目标, 多视情况下每个像元的干涉相位服从一定的概率密度函数分布 pdf ($\phi; \gamma, L, \phi_0$)^[11], 其中, ϕ 是干涉相位, ϕ_0 是干涉相位的均值, γ 是相干系数, L 为视数。那么, 干涉相位的方差 σ_ϕ^2 为

$$\sigma_\phi^2 = E \{ (\phi - \phi_0)^2 \} = \int_{-\pi}^{\pi} \phi^2 \text{pdf}(\phi + \phi_0; \gamma, L) d\phi \quad (9)$$

可以利用数值计算的方法求解上式, 从而得到干涉相位的方差与相干系数间的关系。分析各个去相干因素, 可以建立它们与差分干涉测量精度间的关系。对于机载干涉 SAR, 在产生去相干的所有因素中,

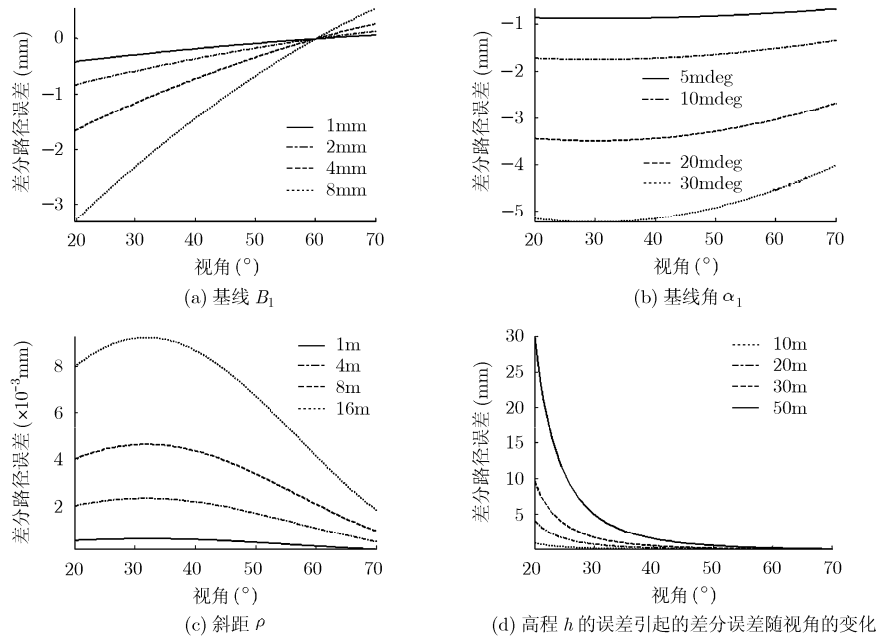


图 4 (载机高度 $H=7$ km, 目标实际高程 $h=100$ m, 地形像对的基线 $B_1=20$ m, 基线角 $\alpha_1=60^\circ$; 形变像对基线 $B_2=10$ m, 基线角 $\alpha_2=30^\circ$, 视角 $20^\circ-70^\circ$)

只有基线 and 数据处理去相干是人为可控制的。数据处理去相干通过提高算法的精度去除, 而基线去相干虽然可以通过频谱滤波的方法减小, 但是对于非均匀目标, 由基线引起的视角的差异是难以消除的。因此, 对于差分干涉 SAR, 形变像对的基线越小越好。而且, 地形坡度越大, 对基线的要求越高。在乒乓模式下, 基线去相干引起的相干系数 γ 为^[9]

$$\gamma = \left[1 - \left| \frac{2B_{\perp} \Delta r}{\lambda R \tan(\theta - \tau_y)} \right| \right] \left[1 - \left| \frac{2B_{\perp} \Delta x \cos \tau_y \tan \tau_x}{\lambda R \sin(\theta - \tau_y)} \right| \right] \quad (10)$$

其中 $\Delta r, \Delta x$ 分别为距离向和方位向的分辨率, B_{\perp} 为干涉像对的垂直基线, τ_y, τ_x 分别为距离向和方位向坡度。考虑到噪声、配准误差^[8]和时间去相干^[10]的影响, 在 L 波段时, 差分干涉相位估计的精度与形变像对的垂直基线间的关系如图 5 所示(假设地形像对的影响很小)。可以看出, 要得到高精度的机载差分干涉结果, 必须严格控制飞行的基线。

3.3 大气效应

大气的延迟效应主要来自对流层底部大气水汽的变化, 因而和星载 SAR 一样, 机载 SAR 也会受到大气效应的影响。大气的延迟效应可以分为两个部分: 大气垂直分层结构造成的延迟和大气湍流引起的延迟^[12]。大气垂直分层结构只对地形起伏地区造成影响, 而大气湍流对平地 and 山区都有影响。

(1) 大气的垂直分层结构造成的延迟 垂直分层的大气在每一水平层的内部是均匀的, 在垂直方向是不均匀的。它又可以分为两个部分: 干燥大气

和潮湿大气。为适应机载的情况, 对 Baby 等人提出的模型^[12]略作修改, 得到干燥和潮湿大气在下视情况下的延迟 $\Delta L_h, \Delta L_w$ 分别为

$$\Delta L_h = 10^{-6} \int_{P_m}^{P_0} \frac{k_1 R_d}{g} dP = k_1 R_d 10^{-6} \left(\frac{P_0}{g_0} - \frac{P_m}{g_m} \right) \quad (11)$$

$$\Delta L_w = (3.81 \times 10^{-3} U_0 / \alpha) [e_s(T_0) / B_0 - e_s(T_m) / B_m] \quad (12)$$

其中 k_1, R_d 是常数, P_0, g_0 分别是地面的大气压和重力加速度, P_m, g_m 分别为飞机高度处的大气压强和重力加速度^[13]。 e_s 是饱和水汽压, U_0, T_0, B_0 分别是测量的地面相对湿度、温度和系数 B 。假设所有高度上的湿度都相同, T_m, B_m 分别对应载机高度处的温度和系数 B 。假设温度随着高度线性递减, 即 $T = T_0 - \alpha h$, 取 $\alpha = 6.5^\circ / \text{km}$ 。为了将下视条件下的大气延迟映射到视角 θ 上, 可以使用不同的映射函数, 这里直接除以 $\cos \theta$ 。

对于平地, 如果各点的气象条件都相同, 那么下视条件下它们的大气延迟也相同。而对于山区, 高程的变化会引起温度、压力的变化, 从而影响大气的延迟。对于图 6(a)所示的某地区的高程图, 在相对湿度变化 20% 时大气垂直分层结构产生的双程大气延迟为图 6(b)。此时, 两次飞行期间的大气延迟误差达到了十几厘米。但从以上计算模型可知, 只要准确测量地面的气象参数, 即温度、压强、相对湿度, 就可以消除或减少由大气垂直分层结构引起的大气延迟。

(2) 大气湍流引起的延迟 大气湍流引起的延迟是一个随机过程, 不能使用函数模型来表达。根

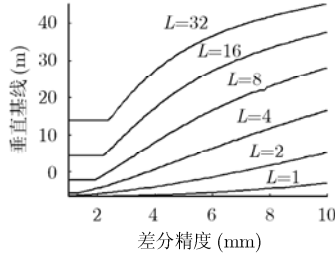
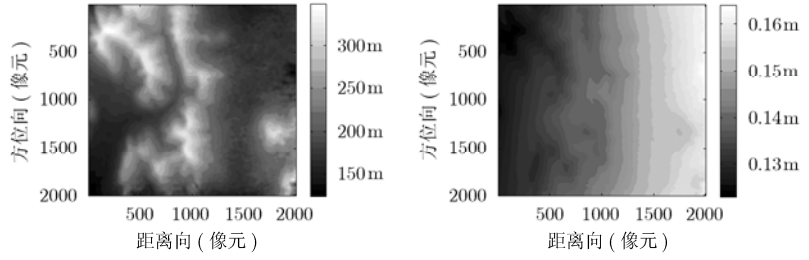


图 5 机载差分干涉精度与形变像对的垂直基线间的关系 (波长 24 cm, 载机高度 7 km, 斜距分辨率 1.25 m, 方位向分辨率 0.3 m, 视角 25°, 距离向地形坡度 20°, SNR=20dB, 考虑了配准误差和时间去相干, 基线为负值表示不存在)



(a) 某地区的高程图 (b) 相对湿度从 50% 变化到 30% 时, 大气垂直分层结构在两次飞行中引起的双程路径差

图 6 (基线 20 m, 基线角 -120°, 温度 20°C, 压强 100 kPa, 飞机高度 7 km, 视角 35°~45°)

据 Treuhaft 和 Lanyi 的模型^[14], 大气折射率波动的空间结构可以用 Kolmogorov 湍流理论来近似, 并且该空间结构随着风速 v 移动, 从而引起大气折射率随时间的波动。为了方便描述大气湍流的统计特征, 引入结构函数 $D(\mathbf{r}, \mathbf{R})$ 的概念, 其定义参见文献[14]。其中, \mathbf{r} 是空间中的位置矢量, \mathbf{R} 表示距离矢量。假设湍流层的变化是一个稳态的、各向同性的随机过程, 那么, 大气折射系数 $\chi(\mathbf{r})$ (折射率减 1) 的结构函数 $D_\chi(\mathbf{r}, \mathbf{R})$ 只与 $|\mathbf{R}| = R$ 有关。此时, 通过湍流大气的电磁波的延迟为

$$\tau_\theta(\mathbf{x}) = \frac{1}{\cos\theta} \int_0^h \chi(\mathbf{x} + \mathbf{r}(\theta, z)) dz \quad (13)$$

这里, θ 为视角, z 为高度, \mathbf{x} 是地面上的观测点的位置坐标, h 是有效对流层高度。设 L 是地面上两点间的水平距离, 那么, 可以得到湍流大气延迟的结构函数 $D_{\tau_\theta}(L)$ ^[14]。

两个像元间的协方差和方差分别为^[15]

$$\left. \begin{aligned} C(L) &= \text{Cov}[\tau(\mathbf{x}, L), \tau(\mathbf{x})] = C(0) - \frac{1}{2}D(L) \\ \sigma^2(L) &= \text{Var}[\tau(\mathbf{x}, L) - \tau(\mathbf{x})] = D(L) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中 $\text{Var}(\cdot)$ 表示方差, $\tau(\mathbf{x})$, $D(L)$ 分别是 $\tau_\theta(\mathbf{x})$, $D_{\tau_\theta}(L)$ 的缩写, $\tau(\mathbf{x}, L)$ 表示与 \mathbf{x} 点水平相距 L 处的大气延迟, $C(0) = \text{Var}[\tau(\mathbf{x})]$, 为每个像元的方差。如果干涉像对两次获取时间的间隔 Δt 足够长, 大气是不相关的, $\tau(\mathbf{x})$ 的均值是常数, 那么, 干涉纹图的方差 σ_{int}^2 和协方差 C_{int} 分别为^[15]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{int}}^2(L, \Delta t) &= 2D(L) \\ C_{\text{int}}(L, \Delta t) &= C_{\text{int}}(0, \Delta t) - D(L) = D(\infty) - D(L) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

这里, $D(\infty) = 2\text{Var}[\tau(\mathbf{x})]$ ^[16]。

如果两次获取的时间间隔很短, 则大气是相关的。假设风速为 v , 将时间相关转换到空间相关 $L' = v \cdot \Delta t$ 。根据各向同性的假设, 两点间的等效距离为 $L + L'$, 那么干涉纹图的协方差和方差为

$$\left. \begin{aligned} C_{\text{int}}(L, \Delta t) &= \text{Cov} \left\{ \left[\tau_{t_n}(\mathbf{x}) - \tau_{t_m}(\mathbf{x}) \right], \right. \\ &\quad \left. \left[\tau_{t_n}(\mathbf{x}, L) - \tau_{t_m}(\mathbf{x}, L) \right] \right\} = D(L + L') - D(L) \\ \sigma_{\text{int}}^2(L, \Delta t) &= \text{Var} \left\{ \left[\tau_{t_n}(\mathbf{x}, L) - \tau_{t_n}(\mathbf{x}) \right] \right. \\ &\quad \left. - \left[\tau_{t_m}(\mathbf{x}, L) - \tau_{t_m}(\mathbf{x}) \right] \right\} = 4D(L) - 2D(L + L') \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

大气湍流效应使得各像元相互独立的假设不成立, 与定标点相距越远, 差分干涉误差的方差就越大。关于这一点将在第 4 部分进一步说明。

4 机载差分干涉的精度

以上分别讨论了系统参数误差、相干性和大气效应的影响, 以下主要关注它们对差分干涉的联合作用。在讨论系统参数误差和相干性时, 认为像元间相互独立, 但是大气的湍流效应使得各像元间产生相关性。最终的干涉产品都必须经过定标才能使用, 这个过程就是其它像元与定标点间的对比过程, 像元间的相关性使得该对比过程变得复杂。为了说明的方便, 分 3 个部分讨论影响差分干涉精度的因素: 只有系统参数误差的影响; 只有大气的的影响; 两者的联合作用。

4.1 系统参数误差对差分干涉精度的影响

由于影响差分干涉的各系统参数相互独立, 因此, 由系统参数误差引起的差分干涉的精度为

$$\begin{aligned} \sigma_{\gamma_{\text{diff}}}^2 &= \frac{\lambda}{4\pi} \left[\text{Var}(\phi_{\text{diff}}) + \left(\frac{\partial \phi_{\text{diff}}}{\partial \rho} \right)^2 \sigma_\rho^2 + \left(\frac{\partial \phi_{\text{diff}}}{\partial B_1} \right)^2 \sigma_{B_1}^2 \right. \\ &\quad + \left(\frac{\partial \phi_{\text{diff}}}{\partial \alpha_1} \right)^2 \sigma_{\alpha_1}^2 + \left(\frac{\partial \phi_{\text{diff}}}{\partial B_2} \right)^2 \sigma_{B_2}^2 + \left(\frac{\partial \phi_{\text{diff}}}{\partial \alpha_2} \right)^2 \sigma_{\alpha_2}^2 \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial \phi_{\text{diff}}}{\partial h} \right)^2 \sigma_h^2 \right] \end{aligned} \quad (17)$$

4.2 大气对差分干涉精度的影响

正如前文所说,垂直分层结构可以通过地面气象测量减少或消除,因而大气的影 响主要来自大气湍流。假设 3 个时间点 t_1, t_2, t_3 上获得的图像的相位分别为 $\phi_{t_1}, \phi_{t_2}, \phi_{t_3}$ 。 t_1, t_2 间构成形变像对 ϕ_{12} ; t_1, t_3 间构成地形像对 ϕ_{13} 。根据误差传播原理,大气湍流效应引起的差分干涉 SAR 的相位方差为

$$\sigma_{\phi_{diff}}^2 = \sigma_{\phi_{12}}^2 + q^2 \sigma_{\phi_{13}}^2 - q(\sigma_{\phi_{12}}^2 + \sigma_{\phi_{13}}^2 - \sigma_{\phi_{23}}^2) \quad (18)$$

其中 $\sigma_{\phi_{12}}^2, \sigma_{\phi_{13}}^2, \sigma_{\phi_{23}}^2$ 分别是各干涉纹图中由大气湍流引起的相位方差。由于相位和路径 τ 之间的线性关系,路径误差也存在上述关系。这节中若没有特别说明,都指的是路径误差,且只考虑单程的情况。

假设定标点 O 处的位置为 X_0 , 视角为 θ , 像素点 P 距定标点的水平距离为 L , 视角为 β , 则定标点处的差分干涉结果为

$$\tau_{diff}(X_0) = [\tau_{t_1}(X_0) - \tau_{t_2}(X_0)] - q[\tau_{t_1}(X_0) - \tau_{t_3}(X_0)] \quad (19)$$

同样可以写出 P 点处的差分干涉结果。根据地形像对大气的相关性 与否,分两种情况讨论。

情况 1 若差分干涉的 3 个时间段内大气都不相关,令其时间间隔都为 Δt , 参考 Emardson^[17] 的结论和前面的推导结果,差分干涉图像中定标点 O 与 P 点的协方差为

$$C_{diff}(L) = Cov\{\tau_{diff}(X_0), \tau_{diff}(X_0 + L)\} = \frac{1 - q + q^2}{\cos \theta \cos \beta} (D(\infty) - D(L)) \quad (20)$$

而根据式(18),定标点 O 和像元 P 处的绝对差分干涉路径方差分别为

$$\sigma_{\tau_{diffO}}^2 = \frac{(1 - q + q^2)D(\infty)}{\cos^2 \theta}, \sigma_{\tau_{diffP}}^2 = \frac{(1 - q + q^2)D(\infty)}{\cos^2 \beta} \quad (21)$$

结合两点的协方差(式(20)),可得 P 点相对于定标点 O 的相对差分干涉精度为

$$\sigma_{\tau_{diff}}^2 = \sigma_{\tau_{diffO}}^2 + \sigma_{\tau_{diffP}}^2 - 2C_{diff}(L) = (1 - q + q^2) \cdot \left[D(\infty) \left(\frac{1}{\cos \theta} - \frac{1}{\cos \beta} \right)^2 + \frac{2D(L)}{\cos \theta \cos \beta} \right] \quad (22)$$

情况 2 在机载 SAR 中,地形像对的时间间隔有可能非常短,使得两幅图像中的大气是相关的,此时,差分干涉图像中定标点 O 与 P 点的协方差为

$$C_{diff}(L) = \frac{D(\infty) - D(L) + (q^2 - q)(D(L + L') - D(L))}{\cos \theta \cos \beta} \quad (23)$$

其中 L' 是大气湍流在地形像对的时间间隔内移动

的等效距离。地形像对的方差为

$$Var\{\tau_{t_1}(X) - \tau_{t_3}(X)\} = C_{int}(0, |t_1 - t_3|) = D(L') \quad (24)$$

此时,根据式(18),定标点 O 和像元 P 点处的差分干涉绝对路径方差分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\tau_{diffO}}^2 &= \frac{D(\infty) + (q^2 - q)D(L')}{\cos^2 \theta} \\ \sigma_{\tau_{diffP}}^2 &= \frac{D(\infty) + (q^2 - q)D(L')}{\cos^2 \beta} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

结合式(23)和式(25),也可以写出大气相关的情况下, P 点相对于定标点 O 的差分干涉精度 $\sigma_{\tau_{diff}}^2$ 。

假设一年内垂直方向大气延迟的标准方差为 $2.4 \text{ cm}^{[16]}$, 则 $D(\infty) = 11.52 \text{ cm}^2$ 。那么在第 1、2 两种情况下,由大气湍流引起的相对差分干涉方差见图 7。在地形像对的大气相关时, q 值($q < 1$)的变化对差分干涉精度的影响不大。从图中看出,要使得差分干涉的精度优于厘米级,必须使定标点与所有像素间的距离小于 2 km,才能有效去除大气湍流效应的影响。

4.3 系统参数误差和大气效应的综合作用

以上分别考虑了系统参数误差和大气效应对差分干涉精度的影响,但实际上这两者是同时起作用的。由于它们相互独立,因此,对于每个像元 P ,差分干涉的绝对精度可以表达为

$$\sigma_{diffP}^2 = \sigma_{\gamma_{diffP}}^2 + 4\sigma_{\tau_{diffP}}^2 \quad (26)$$

$\sigma_{\tau_{diffP}}^2, \sigma_{\gamma_{diffP}}^2$ 分别是 P 点由大气和系统参数误差引起的差分方差,后者的表达式与式(17)一致。则 P

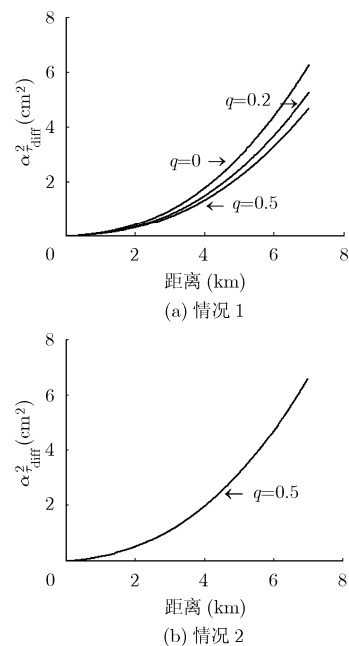


图 7 差分干涉沿距离方向的精度变化(单程)(载机高度 7 km, 风速为 8 m/s, 对于情况 2, 假设地形像对的时间间隔为 10 min)

点相对于定标点 O 的相对差分干涉方差 σ_{diff}^2 为

$$\sigma_{\text{diff}}^2 = \sigma_{\gamma_{\text{diff}P}}^2 + \sigma_{\gamma_{\text{diff}O}}^2 + 4\sigma_{\tau_{\text{diff}}}^2 \quad (27)$$

5 结论

本文从干涉处理算法、系统参数误差、大气效应这几个方面讨论了机载差分干涉 SAR 的精度, 指出: 机载差分干涉要达到毫米级的测量精度, 必须在去除地形相位时考虑目标的本地视角, 并在尽量减小形变基线长度的同时, 增大地形像对的基线长度; 为去除大气效应的影响, 需要获取载机飞行时的地表气象数据。通过对这些因素的综合分析, 给出了机载差分干涉 SAR 精度的表达式, 并提出为了有效去除大气湍流效应的影响, 定标点与所有像素间的距离应小于 2 km。本文的分析为机载差分干涉的开展提供了一定的理论基础, 但实际应用中还有很多其它的误差因素需要考虑, 如穿透性、解缠误差、定标误差等。对于工作在长波长的机载 SAR 系统, 穿透性是一个不容忽视的因素。这也是以后进行精确地表形变反演所必须考虑的因素。

参 考 文 献

- [1] Rosenh P, Hensley S, and Wheeler K, *et al.* UAVSAR: A new NASA airborne SAR system for science and technology research[C]. IEEE Conference on Radar, Verona, New York, Apr. 2006: 22-26.
- [2] Macedo K A C, Scheiber R, and Moreira A. First evaluation of airborne InSAR time-series[C]. Proc. EUSAR'06, Dresden, Germany, 2006.
- [3] Macedo K A C, Scheiber R, and Moreira A. An autofocus approach for residual motion errors with application to airborne repeat-pass SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3151-3162.
- [4] Perna S, Wimmer C, and Moreira J, *et al.* X-band airborne differential interferometry: results of the OrbiSAR campaign over the Perugia area[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(2): 489-503.
- [5] Prats P, Scheiber R, Reigber A, Andres C, and Horn R. Estimation of the surface velocity field of the Aletsch glacier using multibaseline airborne SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(2): 419-430.
- [6] Prats P, Reigber A, and Mallorqui J J. Estimation of the temporal evolution of the deformation using airborne differential SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(4): 1065-1078.
- [7] Macedo K A C and Scheiber R. Controlled experiment for analysis of airborne D-InSAR feasibility[C]. Proc. EUSAR'04, Ulm, Germany, May 2004.
- [8] Just D and Bamler R. Phase statistics of interferograms with applications to Synthetic Aperture Radar[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(20): 4361-4368.
- [9] Rodriguez E and Martin J M. Theory and design of interferometric Synthetic Aperture Radars[J]. *IEEE Proceedings-F*, 1992, 139(2): 147-159.
- [10] Zebker H A and Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 950-959.
- [11] Hanssen R. Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis[M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001: 97-159.
- [12] Baby H B, Gole P, and Lavergnat J. A model for the tropospheric excess path length of radio waves from surface meteorological measurements[J]. *Radio Science*, 1988, 23(6): 1023-1038.
- [13] Delacourt C, Briole P, and Achache J. Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography. Application to Etna[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(15): 2849-2852.
- [14] Treuhaft R N and Lanyi G E. The effect of the dynamic wet troposphere on radio interferometric measurements[J]. *Radio Science*, 1987, 22(2): 251-265.
- [15] Li Zhen-hong, Fielding E, and Cross P, *et al.* Interferometric Synthetic Aperture Radar atmospheric correction: GPS topography-dependent turbulence model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(132): B02404.
- [16] Boncori J P and Mohr J J. A tunable closed-form model for the structure function of tropospheric delay[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(2): 222-226.
- [17] Emardson T R, Simons M, and Webb F H. Neural atmospheric delay in interferometric Synthetic Aperture Radar applications: statistical description and mitigation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(B5): ETG 4.

钟雪莲: 女, 1980年生, 博士生, 研究方向为机载 SAR 重轨干涉。
 向茂生: 男, 1964年生, 研究员, 博士生导师, 研究领域为干涉合成孔径雷达系统与方法的研究。
 岳焕印: 男, 1975年生, 副研究员, 研究方向为机载遥感系统的设计、SAR 数据处理、以及 Lidar 数据的处理和应用。
 郭华东: 男, 1950年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为雷达遥感。