

分布式小卫星 SAR 回波信号的相关性

徐华平, 周荫清, 李春升

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 本文通过建立单视复图像信号模型, 提出并推导了分布式小卫星合成孔径雷达(SAR)回波信号之间新的相关系数模型. 根据干涉复图像对的相位差与相关系数之间的关系, 定义了方位向相位新概念, 提出了分布式小卫星 SAR 干涉复图像对的相位差的均值包括干涉相位和方位向相位两部分. 为了防止方位向相位引起较大的干涉相位估计误差, 必须在数据处理中引入去方位向相位处理新方法, 并给出了去方位向相位处理的具体实现方法. 最后, 进行了计算机仿真处理, 仿真结果验证了本文分析的正确.

关键词: 合成孔径雷达; 分布式小卫星; 干涉; 相关性; 数据处理

中图分类号: TN959 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)06-0965-05

Correlation of Distributed Small Satellites SAR Echoes

XU Huar ping, ZHOU Yirr qing, LI Churr sheng

(Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: There are both across track and along track baseline in Distributed Small Satellites Synthetic Aperture Radar(DSS SAR), which complicates the correlation of DSS SAR echoes. After modeling the single look complex SAR image in DSS SAR, the new correlation model for DSS SAR echoes was proposed and derived. According to the relationship between correlation and phase difference of the DSS SAR image pair, it is proposed that the phase difference of DSS SAR complex image pair in DSS SAR includes two parts: one is interferometric phase which is related to terrain elevation, another is azimuth phase which is brought from the along track baseline and will decrease the terrain height accuracy dramatically. Then a new step, that is applied to remove the azimuth phase, must be added to the interferometric SAR data processing in DSS SAR and the implementation of the azimuth phase removing step is presented. In the end, computer simulation is given and the results validate the correction of analysis in this paper.

Key words: Synthetic Aperture Radar(SAR); distributed small satellites; interferometric; correlation; data processing

1 引言

干涉 SAR 三维测高技术是获得地形高程信息的一个非常重要的手段, 它于 1974 年由 Graham^[1] 首次提出并给出机载数据的处理结果. 卫星上很难安装两部天线, 因此常采用重复飞行方式获取干涉 SAR 数据^[2-6]. 这种重复飞行干涉方式带来的问题: 一是两次观测时间内地形的变化会引起非常严重的相关损失, 甚至导致无法实现干涉; 二是在一个轨道周期内基线变化很大, 因此只能在有限范围获得具有足够相关性的 SAR 复图像对. 2000 年, 美国 SRIM 航天飞机利用长 60m 的桅杆连接两部天线, 成功地实现了双天线干涉^[7]. 但是由于天线之间通过实物连接, 不但限制了基线的长度, 而且系统运行中桅杆的抖动也会影响干涉性能^[8].

分布式小卫星 SAR 是上个世纪末提出的一种新技术, 它可以编队飞行小卫星群作为运载平台实现干涉 SAR 测量, 可以在全球范围内获得性能稳定的高精度数字高程图^[9]. 采用分

布式小卫星 SAR 实现三维地形图成像可以克服上述单星 SAR 干涉存在的问题, 具有三个优点: 1. 不同小卫星可以几乎同时地获得干涉 SAR 数据, 时间相关损失可以忽略; 2. 卫星之间不需要实物连接, 因此可以灵活地实现基线; 3. 不同小卫星 SAR 回波相结合, 可以在全球范围内获得比较稳定的基线.

干涉 SAR 三维地形图成像中, 干涉 SAR 回波信号之间的相关性是影响地形测高精度的主要因素^[3, 10, 11]. 文献[12, 13] 分别推导了单基线和多基线干涉 SAR 的三维测高误差, 结果表明测高误差主要由 SAR 干涉图像对的相关系数矩阵决定. 因此回波信号之间的相关性是衡量干涉 SAR 三维测高性能的一个重要指标. 1990 年, Li^[14] 推导了星载干涉 SAR 中干涉图像对之间的相关性. 在此基础上, Zebker^[15] 和 Lee^[16] 详细分析了星载干涉 SAR 中图像对之间的相关损失. 但是他们关于星载干涉 SAR 相关性的讨论, 仅考虑了垂直轨迹基线, 因此他们关于干涉图像对的相关性的讨论仅适用于两幅图像多

普勒中心频率几乎完全相同的情况. 而分布式小卫星 SAR 中存在的沿轨迹基线使得任意两幅图像的多普勒中心频率均不相同. 因此有必要进一步讨论分布式小卫星 SAR 中图像对之间的相关性.

本文在建立分布式小卫星 SAR 单视复图像信号模型的基础上, 提出并推导了新的相关系数公式, 完整地描述了分布式小卫星 SAR 回波信号的相关性. 根据新的相关系数公式, 本文分析了两幅图像之间的相位差, 提出分布式小卫星 SAR 中具有多普勒中心频差的两幅 SAR 图像进行三维地形成像处理时, 必须引入新的处理方法—去方位向相位, 以消除多普勒中心频差引起的方位向相位对干涉相位估计的影响. 并给出了去方位向相位的具体实现方法. 最后采用计算机仿真验证了理论分析结果.

2 分布式小卫星 SAR 单视复图像信号模型

如图 1, 分布式小卫星 SAR 中小卫星与地面目标的空间几何关系与单星 SAR 相同, 因此, 根据单星 SAR 回波信号模型^[17], 单发多收的分布式小卫星 SAR 中, 第 k 颗小卫星 S_k 的回波信号可以写为

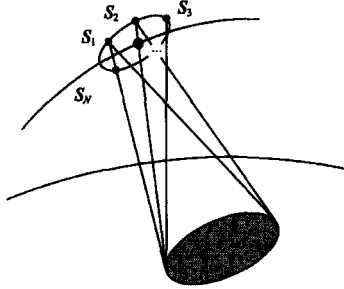


图 1 分布式小卫星 SAR 空间几何关系

$$s_{raw,k}(r, x) = \sigma(r, x) \odot \left\{ \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} R_k(x)\right] \cdot \delta\left[r - R_k(x)\right] \right\} \odot_r \exp\left[-j \pi b \left(\frac{r}{b}\right)^2\right] \quad (1)$$

式中, $\sigma(r, x)$ 为后向散射系数, b 为调频率, c 为变速, λ 为雷达波长, r, x 分别为 S_k 的斜距和方位向坐标, $\delta(\cdot)$ 为单位冲激函数, $R_k(x)$ 为距离徙动曲线, 它的表达式为^[17]

$$R_k(x) = r_k + \frac{\lambda}{2} \left[f_{dk} \cdot \frac{x}{V} + \frac{f_{rk}}{2} \left(\frac{x}{V} \right)^2 \right] + r_s + \frac{\lambda}{2} \left[f_{ds} \cdot \frac{x}{V} + \frac{f_{rs}}{2} \left(\frac{x}{V} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中, r_k, r_s 分别为 S_k 和发射信号卫星在多普勒中心处的斜距, f_{dk}, f_{rk} 分别为 S_k 的多普勒中心频率和调频率, V 为卫星飞行速度, f_{ds}, f_{rs} 分别为发射信号卫星的多普勒中心频率和调频率.

对式(1)的回波信号进行距离压缩、距离徙动校正和方位压缩处理, 得

$$s_k(r, x) = \sigma(r, x) \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_k + r_s)\right\} \cdot \exp\left\{-j \pi f_{dk} \frac{x}{V}\right\} \odot \text{sinc}\left(\frac{\pi r}{\rho_r}\right) \odot \text{sinc}\left(\frac{\pi x}{\rho_a}\right) + n_k(r, x) \quad (3)$$

式中, ρ_r, ρ_a 分别为 SAR 图像斜距向和方位向分辨率, 这里假设分布式小卫星 SAR 中每个 SAR 系统都具有相同的空间分辨率. $n_k(r, x)$ 为热噪声.

单发单收情况下, 式(3)变为

$$s_k(r, x) = \sigma(r, x) \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} r_k\right\} \cdot \exp\left\{-j 2\pi f_{dk} \frac{x}{V}\right\}$$

$$\odot \text{sinc}\left(\frac{\pi r}{\rho_r}\right) \odot \text{sinc}\left(\frac{\pi x}{\rho_a}\right) + n_k(r, x) \quad (4)$$

根据式(3)和(4), 分布式小卫星 SAR 中任意两颗小卫星 S_m 和 S_n 回波之间的距离向相位差为

$$\Psi_r(m, n) = -\frac{2\pi n_{\text{factor}}}{\lambda} (r_m - r_n) = \frac{2\pi n_{\text{factor}}}{\lambda} \Delta r(m, n) \quad (5)$$

式中, n_{factor} 为 1 表示单发多收系统, 为 2 则表示单发单收系统. 根据 Gatelli^[18]的分析方法, 可以得到式(5)给出的相位差引起的回波之间在距离向的频率偏移为

$$\Delta f(m, n) = \frac{d\Psi_r(m, n)}{2\pi dr} \approx -\frac{n_{\text{factor}} B_n(m, n)}{\lambda r \tan(\theta - \alpha)} \quad (6)$$

式中, $B_n(m, n)$ 为 S_{at_m} 和 S_{at_n} 之间的垂直轨迹基线, θ 为雷达视角, α 为地面在距离向的斜度. 根据式(3)、(4)和多普勒中心频率的计算公式^[17], 可以得到 S_{at_m} 和 S_{at_n} 之间多普勒中心频率的偏差为

$$\Delta f_d(m, n) = f_{dm} - f_{dn} \approx \frac{2VB_a(m, n) \sin \varphi}{\lambda} \quad (7)$$

式中, $B_a(m, n)$ 为 S_{at_m} 和 S_{at_n} 之间的沿轨迹基线, φ 为等效斜视角.

3 分布式小卫星 SAR 回波信号的相关性

1990 年, Li 和 Goldstein^[14]推导了星载干涉 SAR 中单视 SAR 复图像对之间的相关系数, 经过 1992 年 Zebker 等^[15]的进一步完善, 得到星载干涉 SAR 中图像对之间的相关系数为

$$Y_{\text{insar}} = Y_{\text{temporal}} \cdot \frac{1}{1 + \text{SNR}^{-1}} \left(1 - \frac{n_{\text{factor}} B_n \rho_r}{\lambda r \tan \theta} \right) \exp\left\{-j \frac{2\pi n_{\text{factor}}}{\lambda} \Delta r\right\} \quad (8)$$

式中 $Y_{\text{temporal}} = \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{2\pi n_{\text{factor}}}{\lambda} \right]^2 (\sigma_y^2 \sin^2 \theta + \sigma_z^2 \cos^2 \theta)\right\}$ 为两次观测时间间隔内地形变化引起的时间相关损失, σ_y^2 和 σ_z^2 分别为地面目标在地距方向和垂直地面方向的运动方差^[15]. SNR 为仅考虑热噪声的图像信噪比. 下面基于本文建立的分布式小卫星 SAR 单视复图像信号模型, 推导分布式小卫星 SAR 中任意两颗小卫星获得的图像对之间的相关性.

根据式(3)给出的分布式小卫星 SAR 单视复图像信号模型, 配准后, 得到单发多收的分布式小卫星 SAR 中任意两颗小卫星 S_{at_m}, S_{at_n} 的 SAR 单视复图像分别为

$$s_m(r, x) = \sigma(r, x) \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} r_m\right\} \cdot \exp\left\{-j \pi f_{dm} \frac{x}{V}\right\} \odot \text{sinc}\left(\frac{\pi r}{\rho_r}\right) \odot \text{sinc}\left(\frac{\pi x}{\rho_a}\right) + n_m(r, x) \quad (9)$$

$$s_n(r, x) = \sigma(r, x) \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} r_n\right\} \cdot \exp\left\{-j \pi f_{dn} \frac{x}{V}\right\} \odot \text{sinc}\left(\frac{\pi r}{\rho_r}\right) \odot \text{sinc}\left(\frac{\pi x}{\rho_a}\right) + n_n(r, x) \quad (10)$$

式中, $n_m(r, x), n_n(r, x)$ 为相互独立的、均值为零的高斯噪声.

假设地面场景为均匀面目标, 可以认为它具有零均值白随机过程的相关特性^[14, 15]. 即地面散射特性的自相关函数为

$$E\{\sigma(r, x) \cdot \sigma^*(r', x')\} = \sigma_0 \delta(r - r') \delta(x - x') \quad (11)$$

式中, $E\{\cdot\}$ 表示对括号内的参量取均值.

计算两幅图像之间的互相关函数, 得

$$E\{s_m s_n^*\} = \iiint E\{\sigma(r_1, x_1) \cdot \sigma^*(r_2, x_2)\}$$

$$\begin{aligned}
 & \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda}(r_m - r_n)\right\} \\
 & \cdot \exp\left\{-j\pi\left[f_{dm}\frac{x_1}{V} - f_{dn}\frac{x_2}{V}\right]\right\} \\
 & \cdot \operatorname{sinc}\left[\frac{\pi(r - r_1)}{\rho_r}\right] \operatorname{sinc}\left[\frac{\pi(r - r_2)}{\rho_r}\right] \\
 & \cdot \operatorname{sinc}\left[\frac{\pi(x - x_1)}{\rho_a}\right] \operatorname{sinc}\left[\frac{\pi(x - x_2)}{\rho_a}\right] dr_1 dr_2 dx_1 dx_2
 \end{aligned} \tag{12}$$

将式(11)代入式(12),并考虑到与单发单收系统的兼容性,得

$$\begin{aligned}
 E\{s_m s_n^*\} &= \sigma_0 \int \exp\left\{-j\frac{2\pi n_{\text{factor}}}{\lambda}(r_m - r_n)\right\} \cdot \operatorname{sinc}^2\left[\frac{\pi(r - r_1)}{\rho_r}\right] dr_1 \\
 & \cdot \int \exp\left\{-j\pi n_{\text{factor}}\left(f_{dm} - f_{dn}\right)\frac{x_1}{V}\right\} \cdot \operatorname{sinc}^2\left[\frac{\pi(x - x_1)}{\rho_a}\right] dx_1
 \end{aligned} \tag{13}$$

对式(13)中的积分进行计算,近似得

$$\begin{aligned}
 E\{s_m s_n^*\} &\approx \sigma_0 \rho_r \rho_a \left\{1 - \frac{n_{\text{factor}} B_n(m, n) \rho_r}{\lambda r \tan(\theta - \alpha)}\right\} \\
 & \cdot \left\{1 - \frac{n_{\text{factor}} B_a(m, n) \sin \varphi_a}{\lambda r}\right\} \\
 & \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi n_{\text{factor}}}{\lambda} \Delta r(m, n)\right\} \\
 & \cdot \exp\left\{-j\pi \frac{n_{\text{factor}} \Delta f_d(m, n) x}{V}\right\}
 \end{aligned} \tag{14}$$

又因为

$$E\{s_m s_m^*\} = E\{s_n s_n^*\} = \sigma_0 \rho_r \rho_a + P_n \tag{15}$$

其中, $P_n = E\{n_{nm} n_m^*\} = E\{n_n n_n^*\}$ 为噪声能量。所以近似得到两幅图像之间的相关系数为

$$\begin{aligned}
 \gamma_{m, n}(r, x) &\approx \frac{\sigma_0 \rho_r \rho_a}{\sigma_0 \rho_r \rho_a + P_n} \left\{1 - \frac{n_{\text{factor}} B_n(m, n) \rho_r}{\lambda r \tan(\theta - \alpha)}\right\} \\
 & \cdot \left\{1 - \frac{n_{\text{factor}} B_a(m, n) \sin \varphi_a}{\lambda r}\right\} \\
 & \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi n_{\text{factor}}}{\lambda} \Delta r(m, n)\right\} \\
 & \cdot \exp\left\{-j\pi \frac{n_{\text{factor}} \Delta f_d(m, n) x}{V}\right\} \\
 & = \rho_{\text{noise}} \cdot \gamma_{\text{rspatial}} \cdot \gamma_{\text{aspatial}}
 \end{aligned} \tag{16}$$

式中 ρ_{noise} 、 γ_{rspatial} 、 γ_{aspatial} 分别为系统热噪声、垂直轨迹基线和沿轨迹基线引起的相关损失。且有

$$\rho_{\text{noise}} = \frac{1}{1 + \text{SNR}^{-1}} \tag{17}$$

$$\gamma_{\text{rspatial}} = \left\{1 - \frac{n_{\text{factor}} B_n(m, n) \rho_r}{\lambda r \tan(\theta - \alpha)}\right\} \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi n_{\text{factor}}}{\lambda} \Delta r(m, n)\right\} \tag{18}$$

$$\gamma_{\text{aspatial}} = \left\{1 - \frac{n_{\text{factor}} B_a(m, n) \sin \varphi_a}{\lambda r}\right\} \cdot \exp\left\{-j\pi \frac{n_{\text{factor}} \Delta f_d(m, n) x}{V}\right\} \tag{19}$$

其中,信噪比 $\text{SNR} = \frac{\sigma_0 \rho_r \rho_a}{P_n}$, 为 SAR 单视复图像中信号与热噪声的功率比。

比较式(16)给出的分布式小卫星 SAR 中图像对之间的相关系数与式(8)给出的星载干涉 SAR 中图像对之间的相关系数公式,可以知道:分布式小卫星 SAR 系统几乎是同时获取同一观测地区的信号,因此可以忽略时间相关损失的影响;

分布式小卫星 SAR 中沿轨迹基线的存在引起了相关系数中的 γ_{aspatial} 相关损失项,它不但影响相关系数的幅值,而且引起了相关系数相位的变化。

考虑式(7),并结合方位向分辨率与多普勒带宽的关系,式(19)可以写为

$$\gamma_{\text{aspatial}} = \left\{1 - \frac{n_{\text{factor}} \Delta f_d(m, n)}{2B_w}\right\} \cdot \exp\left\{-j\pi \frac{n_{\text{factor}} \Delta f_d(m, n) x}{V}\right\} \tag{20}$$

从式(16)和(20)可以看出,干涉图像对之间多普勒中心频率偏移,也会引起图像对的相关性的降低,当多普勒偏移超过多普勒带宽时,图像对的相关性为零。

4 分布式小卫星 SAR 中任意两幅图像间的相位差

干涉 SAR 数据处理中干涉相位的模糊值是通过求取图像对之间的相位差获得的^[1-5],因此,这里有必要分析分布式小卫星 SAR 中任意两幅图像间的相位差。

$s_m(r, x)$ 与 $s_n(r, x)$ 的共轭相乘,求取幅角,得到两幅图像间关于 2π 模糊的相位差 $\phi(m, n)$,它是概率密度函数为周期函数的随机变量。文献[19]和[20]分别推导了单视和多视情况下 $\phi(m, n)$ 的概率密度函数,给出了它的均值为两幅图像相关系数的幅角^[19,20]

$$\phi_{m, n} = E\{\phi(m, n)\} = \arg(\gamma_{m, n}) \tag{21}$$

式中, $\arg(\cdot)$ 表示取括号内复数的幅角, $\phi_{m, n}$ 的取值范围为 $[-\pi, \pi]$ 。将式(16)代入式(21),求得分布式小卫星 SAR 中小卫星 Sat_m 、 Sat_n 获得的图像对之间相位差的均值为

$$\phi_{m, n} = \operatorname{mod}\left\{\frac{2\pi n_{\text{factor}}}{\lambda} \Delta r(m, n) + \pi \frac{n_{\text{factor}} \Delta f_d(m, n) x}{V}, 2\pi\right\} \tag{22}$$

式中, $\operatorname{mod}\{\cdot, 2\pi\}$ 表示对第一个数取 2π 模糊。

从式(22)看出,分布式小卫星 SAR 中两幅图像之间的相位差由两部分组成:一部分是由地形高度引起的干涉相位 $\phi_{\text{insar}}(m, n) = \operatorname{mod}\left\{\frac{2\pi n_{\text{factor}}}{\lambda} \Delta r(m, n), 2\pi\right\}$;另一部分则是由于两幅图像之间多普勒中心频差引起的方位向相位 $\phi_a(m, n) = \operatorname{mod}\left\{\pi \frac{n_{\text{factor}} \Delta f_d(m, n) x}{V}, 2\pi\right\}$ 。干涉相位 $\phi_{\text{insar}}(m, n)$ 是后续数据处理所需要的信息,通过对其进行相位展开,得到的非模糊值可以求得被观测地形的高度^[21]。而方位向相位 $\phi_a(m, n)$ 的存在则会影响 $\phi_{\text{insar}}(m, n)$ 的正确估计,从而影响相位展开以及地形高度估计,因此必须在相位展开之前去除相位差中的 $\phi_a(m, n)$ 项,具体的去除方法见本文第 5 部分。

5 去方位向相位处理

为了去除方位向相位的影响,在估计干涉相位模糊值之前,在干涉复图像中乘以相位补偿因子 $\exp\left\{j\pi \frac{n_{\text{factor}} \Delta f_d(m, n) x}{V}\right\}$,则得到去方位向相位后的干涉复图像为

$$s_{m, n}(r, x) = s_m(r, x) \cdot s_n^*(r, x) \cdot \exp\left\{j\pi \frac{n_{\text{factor}} \Delta f_d(m, n) x}{V}\right\} \tag{23}$$

式中, $s_n^*(r, x)$ 为 $s_n(r, x)$ 的共轭。可以看出,实现式(23)的关

键是确定 $\Delta f_d(m, n)$ 的值.

获得 $\Delta f_d(m, n)$ 的方法有两种: 一种是根据式(7) 直接计算, 另一种则是利用回波数据进行估计. 直接计算的方法实现简单, 但是由于星历参数精度有限, 因此该方法的精度较差. 利用回波数据估计的方法可以从两个方面实现, 一是分别估计两颗卫星的多普勒中心频率^[17], 然后求它们的差; 二是根据频率估计方法^[22], 估计干涉复图像方位向最亮条纹的频率.

去方位向相位处理的具体步骤为: (1) 复图像对共轭相乘, 获得干涉复图像; (2) 估计复图像对的多普勒中心频差; (3) 根据多普勒中心频差计算补偿相位, 并在干涉复图像中逐点乘以相位补偿因子; (4) 估计补偿后干涉复图像的方位向频率, 检查去方位向相位处理是否成功.

需要说明的是, 虽然去方位向相位的方法与干涉 SAR 三维地形图成像处理中去平地相位的处理非常相似, 但不同的是: 去平地相位是为了方便噪声抑制和相位展开处理, 一般在高度计算之前需要加回去掉的平地相位; 而方位向相位则是必须去除的, 否则它将造成较大的地形高度估计误差.

6 计算机仿真及结果

根据式(4) 所建立的分布式小卫星 SAR 单视复图像信号模型, 本文通过仿真单发单收模式下分布式小卫星 SAR 的单视复图像来验证 3、4、5 部分得到的结论, 轨道和雷达参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数

轨道高度 / km	雷达波长 / m	雷达视角 / (°)	空间分辨率 / m	采样率 / MHz	脉冲重复 频率/ Hz
600.0	0.20	35.0	8(方位) × 5(斜距)	35.0	1900

不考虑热噪声的影响, 令沿轨迹基线长度为 0, 仿真不同垂直轨迹基线长度下获得的平地观测地形的分布式小卫星 SAR 干涉复图像对, 计算它们之间的相关系数. 图 2 给出了分布式小卫星 SAR 干涉复图像间相关系数随垂直轨迹基线的变化, 图中的实线为根据式(18) 计算的结果, 离散的星图为仿真所得的结果, 可以看出理论分析与仿真结果非常吻合. 令垂直轨迹基线长度为 0, 仿真不同沿轨迹基线长度下平地地形的分布式小卫星 SAR 干涉复图像对, 计算它们之间的相关系数. 图 3 给出了图像间相关系数随沿轨迹基线的变化, 图中的实线为根据式(19) 计算的结果, 离散的星图为仿真所得的结果. 在沿轨迹基线长度较小时, 理论分析与仿真结果比较吻合, 随着基线长度的增大, 在推导中被忽略掉的高次

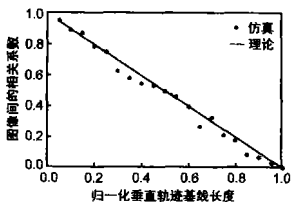


图 2 图像间相关系数随垂直轨迹基线长度的变化, 图中横坐标为垂直轨迹基线与其极限长度的归一化值

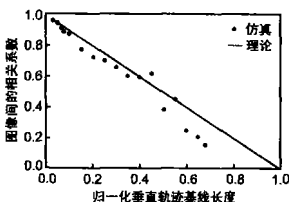


图 3 图像间相关系数随沿轨迹基线长度的变化, 图中横坐标为沿轨迹基线与其极限长度的归一化值

相位项引起的相关损失越来越大, 因此仿真结果值相对于理论分析值偏小.

仿真不同基线条件下平地地形的分布式小卫星 SAR 干涉复图像对, 干涉处理后得到其模糊干涉相位图. 图 4 给出了仅存在 0.1 倍极限长度垂直轨迹基线时的干涉相位图, 图中横向为距离向, 纵向为方位向. 可以看出它具有非常清晰的干涉条纹. 图 5 为同时存在 0.1 倍极限长度沿轨迹基线和 0.1 倍极限长度垂直轨迹基线时得到的干涉相位图, 由于沿轨迹基线引起的方位向相位的影响, 使得干涉条纹发生了倾斜. 利用本文给出的去方位向相位的方法, 对图 5 进行去方位向相位处理, 结果如图 6 所示.

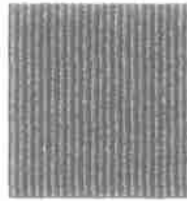


图 4 仅存在垂直轨迹基线时的干涉相位

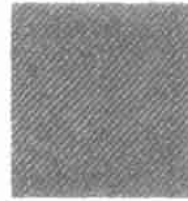


图 5 同时存在沿轨迹基线和垂直轨迹基线时的干涉相位



图 6 图 5 去方位向相位处理后的结果

比较图 4 和图 6, 可以看出本文给出的去方位向相位的处理方法能够有效地去除由于沿轨迹基线引起的方位向相位. 与图 4 相比, 图 6 中的干涉条纹受噪声影响较大, 这是因为沿轨迹基线引起的相关损失降低了干涉相位图的质量, 正好验证了本文提出的相关性模型, 同时也说明了去方位向相位处理只能去掉干涉相位中方位向相位的影响, 但不能用来提高干涉图像的质量.

7 结论

根据本文对分布式小卫星 SAR 图像间相关性的分析和仿真, 可以得到以下结论: (1) 分布式小卫星 SAR 中同时存在着垂直轨迹基线和沿轨迹基线, 这两种基线均会引起其图像间的空间相关损失; (2) 沿轨迹基线在复图像的相位差中引起了方位向相位, 该相位项的存在会影响干涉相位的正确估计, 从而导致相位展开以及地形高度估计错误, 在三维地形图成像处理时, 必须引入去方位向相位处理步骤, 以消除方位向相位对干涉相位的影响; (3) 本文给出的去方位向相位方法可以有效地去除相位差中的方位向相位; (4) 仿真结果验证了理论分析的正确性.

参考文献:

[1] Graham L C. Synthetic interferometric radar for topographic mapping [J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(6): 763- 768.

[2] Gabreil A K. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR B[J]. Journal of Remote Sensing, 1988, 9(8): 857- 872.

[3] Zebker H A, et al. Accuracy of topographic maps derived from ERS 1 interferometric radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 1994, 32(4): 823- 836.

- [4] Moreira J, et al. X-SAR interferometry: first results [J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 1995, 33(4): 950– 955.
- [5] Lanari R, et al. Generation of digital elevation modes by using SIR-C/ X-SAR multifrequency two pass interferometry: the etna case study [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(5): 1097– 1114.
- [6] Geudner D, et al. RADARSAT repeat pass SAR interferometry [A]. IGARSS' 1998 [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998. 1635– 1637.
- [7] Eineder M, et al. SRTM X-SAR calibration results [A]. IGARSS' 2001 [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001. 748– 750.
- [8] Franceschetti G, et al. Effect of antenna mast motion on X-SAR/ SRTM performance [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2361– 2372.
- [9] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 506– 520.
- [10] Mittermayer J, Krieger G, et al. Interferometric performance estimation for the interferometric cartwheel in combination with a transmitting SAR satellite [A]. IGARSS' 2001 [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001. v7: 2955– 2957.
- [11] Krieger G, et al. Performance analysis for bistatic interferometric SAR configurations [A]. IGARSS' 2002 [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002. v1: 650– 652.
- [12] Rodriguez E, Martin J M. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars [J]. IEE Proceedings F, 1992, 139(2): 147– 159.
- [13] Lombardo P, Lombardini F. Multi baseline SAR interferometry for terrain slope adaptivity [A]. IEEE National Radar Conference [C]. Syracuse, NY, USA: IEEE, 1997. 196– 201.
- [14] Li F K, Goldstein R M. Studies of multi baseline spaceborne interferometric Synthetic Aperture Radars [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(1): 88– 97.
- [15] Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(5): 950– 959.
- [16] Lee H, Liu J G. Spatial decorrelation due to topography in the interferometric SAR coherence imagery [A]. IGARSS' 1999 [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999. 485– 487.
- [17] 黄岩, 李春升, 等. 高分辨率星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法 [J]. 电子学报, 2000, (28) 3: 35– 38.
- HUANG Yan, LI Chunsheng, CHEN Jie, ZHOU Yirong. Refined chirp scaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging [J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2000, 28(3): 35– 38.
- [18] Gatelli F, et al. The wavenumber shift in SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 855– 864.
- [19] Just D, Banler R. Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radars [J]. Applied Optics, 1994, 33(20): 4361– 4368.
- [20] Lee J S, Hoppel K W, et al. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(5): 1017– 1027.
- [21] Small D, Pasquali P, Fuglistaler S. A comparison of phase to height conversion methods for SAR interferometry [A]. IGARSS' 1996 [C]. USA: IEEE, Piscataway, NJ. 1996. 342– 344.
- [21] Abatzoglou T. A fast maximum likelihood algorithm for frequency estimation of a sinusoid based on Newton's method [J]. IEEE Transaction on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1985, 33(1): 77– 89.

作者简介:



徐华平 女, 1977 年 2 月出生于陕西渭南, 博士后, 主要研究方向: 信息获取与处理, 高分辨率雷达成像, 分布式星载 SAR 的实现方法等。
E-mail: huaping_xu@sina.com



周荫清 男, 湖南湘潭人, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 主要研究方向: 信息获取与处理、高分辨率成像雷达和时变谱估计等。