

波束中心近似对机载干涉 SAR 运动补偿的影响分析

李银伟^{*①②} 邓袁^{①②} 向茂生^①

^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(中国科学院大学 北京 100039)

摘要: 为了定量分析波束中心近似对机载干涉 SAR 运动补偿的影响, 该文首先建立斜视条件下波束中心近似时运动补偿残余误差的数学模型, 其形式类似于斜距误差。随后推导斜视条件下二次斜距误差对干涉 SAR 的影响, 通过仿真验证了理论推导的正确性。最后详细讨论不同波段、斜视角、轨迹偏移、地形变化和斜距情况下波束中心近似对干涉 SAR 运动补偿后图像质量和相干系数的影响。该文的分析结果为机载重轨干涉 SAR 数据处理中运动补偿精度的估计提供了技术支持。

关键词: 机载干涉 SAR; 波束中心近似; 运动补偿; 残余误差; 相干系数

中图分类号: TN959.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)02-0415-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00479

Effects of Center-beam Approximation on Motion Compensation for Airborne Interferometric SAR

Li Yin-wei^{①②} Deng Yuan^{①②} Xiang Mao-sheng^①

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

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to analyze quantitatively the effects of Center-Beam Approximation (CBA) on Motion Compensation (MOCO) for airborne Interferometric SAR (InSAR), a mathematical model of MOCO residual error under the condition of squint is firstly established. The form of residual error is similar to the slant range error. Then, the effects of quadratic slant range error on InSAR are deduced on condition that the squint angle is not zero, and the accuracy of the theoretical derivation is verified with simulation data. Finally, the effects of CBA on image quality and coherence coefficient for airborne InSAR are discussed in detail for different bands, squint angles, trajectory deviations, topography variation and slant ranges. The research provides technical support for the estimation of MOCO precision in signal processing of airborne repeat-pass interferometric SAR.

Key words: Airborne Interferometric SAR (InSAR); Center-Beam Approximation (CBA); Motion Compensation (MOCO); Residual error; Correlation coefficient

1 引言

高精度的运动补偿是高分辨率机载 SAR 成像的关键, 对于需要精确相位信息的干涉 SAR 来说尤其重要。但是, 基于 IMU/GPS 测量数据的运动补偿受限于 3 个因素: 数据获取时天线相位中心 (Antenna Phase Center, APC) 的测量精度, 运动补偿时地物目标的定位精度 (平地假设是其特例), 以及 CS 算法^[1]、波数域算法^[2]等频域成像算法中的波束中心近似。其中前两个因素主要引入残余运动误差^[3,4], 通常利用 MS^[5], WPCA^[6], MTPT^[7]等算法对

APC 的测量误差进行估计和补偿以消除其测量误差, 而对于定位误差, 主要考虑利用外部 DEM 补偿高程误差; 后一个因素主要引入运动补偿残余误差, 对其还没有合适的算法能够完全消除, 只能利用子孔径运动补偿算法^[8-12]减轻其影响。因此定量地研究波束中心近似对机载干涉 SAR 运动补偿的影响显得尤为重要。

波束中心近似是指在同一方位时刻, 对波束照射范围内的所有目标均按照波束中心目标的运动补偿量进行补偿。而运动误差的方位空变性将导致运动补偿残余误差。DLR 的 Potsis 等人^[8]和 JPL 的 Madsen^[9]首次指出波束中心近似假设不成立, 研究者相继提出了子孔径运动补偿算法, 如 SATA^[10], PTA^[11]和 FD^[12], 但这些算法没有定量分析波束中心

2013-04-11 收到, 2013-10-18 改回

国家 973 计划项目(2009CB724003)资助课题

*通信作者: 李银伟 liyinwei19@163.com

近似对干涉SAR的影响,无法确保在残余运动估计时可完全忽略这些残余误差。文献[13]定量地分析了正侧视模型下波束中心近似对SAR图像质量的影响,但载机平台的抖动总会导致斜视角的出现,同时也没有考虑对相干性的影响。另外,与只重视SAR图像的系统相比,需要精确相位信息的干涉SAR对运动补偿精度的要求更高。

针对上述问题,本文针对斜视条件下波束中心近似时的运动补偿残余误差建立数学模型,得到其形式类似于斜距误差。随后详细推导了斜视条件下二次斜距误差对干涉SAR的影响,通过仿真验证了理论推导的正确性。最后在此基础上详细讨论了不同波段、斜视角、轨迹偏移、地形变化和斜距情况下残余误差对干涉SAR图像质量和相干性的影响,为机载重轨干涉SAR数据处理中运动补偿精度的估计提供了技术支持。

2 运动补偿残余误差的数学模型

图1是波束中心斜视角为 β 的机载SAR系统的运动补偿几何关系图,其中 $A(x')$ 点为IMU/GPS测量的飞行航迹(假设其为实际航迹), $N(x')$ 点为由飞行航迹拟合的理想航迹。运动轨迹偏移 d 位于与理想航迹垂直的平面内,大小为 d ,与水平面的夹角为 α 。对于波束照射范围内的点 $P(x, r, \theta)$,波束中心上与其具有相同最近斜距和高度的点为 $P_d(x' + x_d, r, \theta)$,而 $P_0(x' + x_d, r, \theta_0)$ 是波束中心上根据实际DEM计算出来的与 P_d 具有相同最近斜距的点,有: $x_d = r \tan \beta$, $\cos \theta = (H - h)/r$, $\cos \theta_0 = (H - h_0)/r$,其中 H 为载机高度, r 为点 P 的最近斜距, θ 和 θ_0 为点 P 和 P_0 的下视角, h 和 h_0 为点 P 的真实高度及运动补偿时用的高度。在成像处理运动补偿时,点 P 的理论运动误差为

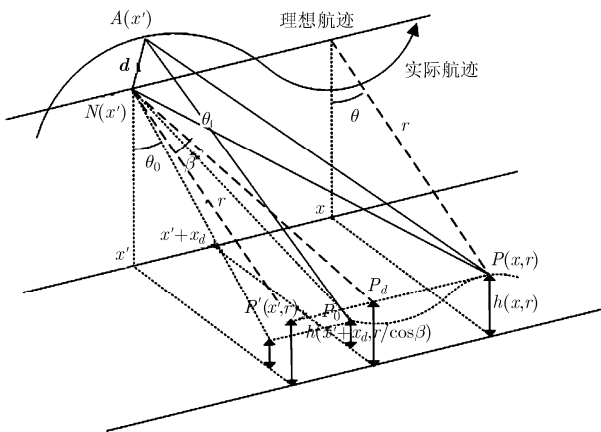


图1 斜视条件下机载SAR系统的运动补偿几何关系图

$$\Delta R(x', x, r) = |NP| - |AP| = \sqrt{r^2 + (x - x')^2} - \sqrt{d^2 + r^2 - 2dr \sin(\theta - \alpha) + (x - x')^2} \quad (1)$$

由于波束中心近似,点 P 实际补偿的运动误差为

$$\begin{aligned} \Delta r(x', x, r) &= |NP_0| - |AP_0| \\ &= \frac{r}{\cos \beta} - \sqrt{\left(\frac{r}{\cos \beta}\right)^2 + d^2 - 2dr \sin(\theta_0 - \alpha)} \quad (2) \end{aligned}$$

引入点 P_d 的运动误差作为中间变量:

$$\begin{aligned} \Delta r_i(x', x, r) &= |NP_d| - |AP_d| \\ &= \frac{r}{\cos \beta} - \sqrt{\left(\frac{r}{\cos \beta}\right)^2 + d^2 - 2dr \sin(\theta - \alpha)} \quad (3) \end{aligned}$$

则波束中心近似导致的运动补偿残余误差为

$$\begin{aligned} \delta e(x', x, r) &= \Delta R - \Delta r \\ &= (\Delta R - \Delta r_i) + (\Delta r_i - \Delta r) \\ &= \delta e_{\text{los}} + \delta e_t \quad (4) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \delta e_t &= \Delta r_i - \Delta r \approx d \cos \beta [\sin(\theta - \alpha) - \sin(\theta_0 - \alpha)] \\ &\approx d \cos \beta \cos(\theta_0 - \alpha) \Delta \theta \\ &= d \cos(\theta_0 - \alpha) \frac{h - h_0}{r \sin \theta_0} \cos \beta \\ &= d_{\perp} \frac{h - h_0}{r \sin \theta_0} \cos \beta \quad (5) \end{aligned}$$

$$\delta e_{\text{los}} = \Delta R - \Delta r_i \approx -d \sin(\theta - \alpha)$$

$$\begin{aligned} &\cdot \left[\frac{\sin \beta \cos^2 \beta}{r} (x' + x_d - x) \right. \\ &\quad \left. - \cos^3 \beta \frac{2 \sin^2 \beta - \cos^2 \beta}{2r^2} (x - x' - x_d)^2 \right] \\ &= -d_{\parallel} \left[\frac{\sin \beta \cos^2 \beta}{r} (x' + x_d - x) \right. \\ &\quad \left. - \cos^3 \beta \frac{2 \sin^2 \beta - \cos^2 \beta}{2r^2} (x' + x_d - x)^2 \right] \quad (6) \end{aligned}$$

其中 $d_{\perp} = d \cos(\theta_0 - \alpha)$ 和 $d_{\parallel} = d \sin(\theta - \alpha)$ 分别为轨迹偏移垂直和平行于视线向(Line Of Sight, LOS)的分量。由式(4)可知,波束中心近似时运动补偿残余误差可以看成由 δe_t 和 δe_{los} 两部分构成。其中 δe_t 是图1中点 P_d 和点 P_0 的残余误差,称之为地形变化残余误差,其主要由 d_{\perp} 和地形起伏变化导致; δe_{los} 是图1中点 P 和点 P_d 的残余误差,称之为LOS近似残余误差,其主要由 d_{\parallel} 导致。

3 斜距误差对干涉 SAR 的影响

假设雷达系统天线发射的是脉冲持续时间为 T , 调频斜率为 K_r 的线性调频信号。理想点目标的回波信号经过混频解调后可表示为

$$h(x', r') = \text{rect} \left[\frac{r' - R(x', x_0, r_0)}{T \cdot c/2} \right] \text{rect} \left[\frac{x' + x_{d0} - x_0}{X} \right] \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(x', x_0, r_0) - j 2K_r \left(\frac{r' - R(x', x_0, r_0)}{c} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

其中 $x_{d0} = r_0 \tan \beta$ 为天线的波束中心方向与零多普勒位置的间隔, $R(x', x_0, r_0)$ 为雷达运动过程中天线与点目标的斜距, X 为天线的合成孔径长度。把斜距 $R(x', x_0, r_0)$ 在波束中心处展开得

$$R(x', x_0, r_0) = \sqrt{(x' - x_0)^2 + r_0^2} + \delta e_0(x') \approx \frac{r_0}{\cos \beta} + \sin \beta (x' + x_{d0} - x_0) + \frac{\cos^3 \beta}{2r_0} (x' + x_{d0} - x_0)^2 + \delta e_0(x') \quad (8)$$

假设波束中心处的斜距误差 $\delta e_0(x')$ 为二次斜距误差

$$\delta e_0(x') \approx \delta e_0(x_0) + \delta \dot{e}_0(x_0)(x' + x_{d0} - x_0) + \frac{1}{2} \delta \ddot{e}_0(x_0)(x' + x_{d0} - x_0)^2 \quad (9)$$

则对式(7)进行距离压缩, 并且对其进行方位向 FFT, 得到距离压缩后的 2 维频域信号

$$HH_{rc}(\xi, \eta) \approx \text{rect} \left[\frac{\eta}{2\Omega_r} \right] \text{rect} \left[\frac{\xi + \xi_d}{2\bar{\Omega}_x} \right] \cdot \exp \left\{ -j \left[\frac{r_0}{\cos \beta} \tilde{\eta} + x_0 \xi \right] \right\} \cdot \exp \left\{ -j(\tilde{\eta} \Delta r + \xi \Delta x) \right\} \cdot \exp \left\{ j b_m \xi^2 \left(1 - \frac{\lambda \eta}{4\pi} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ j \frac{r_0}{2\tilde{\eta} \cos^3 \beta} \xi^2 \right\} \quad (10)$$

其中 $\tilde{\eta} = 4\pi/\lambda + \eta$, $\frac{4\pi X}{\lambda r_0} = 2\Omega_x = \frac{2\pi}{\Delta x}$, $\Delta r = \delta e_0(x_0)$

$$- \frac{r_0 (\delta \dot{e}_0 + \sin \beta)^2}{2 \cos^3 \beta}, \Delta x = - \frac{r_0 (\delta \dot{e}_0 + \sin \beta)}{\cos^3 \beta} + r_0 \tan \beta,$$

$$\Omega_r = K_r T / c, \quad b_m = - \frac{\lambda r_0}{8\pi \cos^3 \beta} \frac{r_0 \delta \ddot{e}_0}{(r_0 \delta \ddot{e}_0 + \cos^3 \beta)},$$

$$\bar{\Omega}_x = \Omega_x (r_0 \delta \ddot{e}_0 + \cos^3 \beta), \quad \xi_d = \frac{4\pi}{\lambda} (\delta \dot{e}_0 + \sin \beta).$$

假设方位向处理带宽足够大, 对 2 维频域信号进行距离徙动校正 (Range Cell Migration Correction, RCMC) 和方位向压缩可得其 2 维频域表达式为

$$H(\xi, \eta) = \text{rect} \left[\frac{\eta}{2\Omega_r} \right] \text{rect} \left[\frac{\xi + \xi_d}{2\bar{\Omega}_x} \right] \cdot \exp \left\{ -j(r_0 \tilde{\eta} + x_0 \xi) \right\} \cdot \exp \left\{ -j(\tilde{\eta} \Delta r + \xi \Delta x) \right\} \cdot \exp \left\{ j b_m \xi^2 \left(1 - \frac{\lambda \eta}{4\pi} \right) \right\} \quad (11)$$

假设 $|b(x_0) \bar{\Omega}_x^2| < 1$, 则 $|\lambda b(x_0) \xi^2 / 4\pi| \leq |\lambda b(x_0) \bar{\Omega}_x^2 / 4\pi|$ 小于等于距离向采样间隔, 对式(11)进行 2 维 IFFT 可得

$$h(x', r') \approx \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} (r_0 + \Delta r) \right\} \cdot \text{sinc} \left[\frac{\Omega_r}{\pi} (r' - (r_0 + \Delta r)) \right] g(x') \quad (12)$$

其中

$$g(x') \approx \int_{-1}^1 \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} \delta e_x \xi^2 \right\} \cdot \exp \left\{ j(x' - x_0 - \Delta x) \bar{\Omega}_x \xi \right\} d\xi \quad (13)$$

其中 $\delta e_x = \delta \ddot{e}_0 X^2 / 8$ 为合成孔径边缘处的二次残余误差。假设 $\exp \{ j b(x_0) \xi^2 \} \approx 1 + j \xi^2 b(x_0)$, 则

$$h(x'=x_0, r'=r_0) \approx \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} (r_0 + \Delta r) \right\} \cdot \exp \left\{ j \xi_d \Delta x \right\} \cdot \exp \left\{ j \frac{b(x_0) \bar{\Omega}_x^2}{3} \right\} \quad (14)$$

因此, 由式(12)可得, 当斜距误差存在二次项时, 图像会产生散焦, 散焦程度可根据式(13)进行计算;

图像还产生距离偏移 $\Delta r \approx \delta e_0 - \frac{r_0 \delta \dot{e}_0^2 + 2 \sin \beta \cdot \delta \dot{e}_0}{2 \cos^3 \beta}$

和方位偏移 $\Delta x \approx \frac{-(r_0 + \Delta r) \delta \dot{e}_0}{\cos^3 \beta} - \Delta r \cdot \tan \beta$; 同

时, 目标峰值位置处的相位误差包含两部分: 一部分是由 APC 和目标的路径差 δe_0 产生的几何相位误差 $4\pi \delta e_0 / \lambda$, 另一部分是由常数项以外的斜距误差与成像处理过程耦合产生的人造相位误差

$$\frac{4\pi}{\lambda} \frac{-r_0 (\delta \dot{e}_0^2 + 2 \sin \beta \cdot \delta \dot{e}_0)}{2 \cos^3 \beta} - \frac{b(x_0) \bar{\Omega}_x^2}{3} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{-r_0 (\delta \dot{e}_0^2 + 2 \sin \beta \cdot \delta \dot{e}_0)}{2 \cos^3 \beta} - \frac{\delta e_x}{3} \right)$$

接下来, 忽略基线去相干、噪声去相干等因素, 分析双通道间相对的斜距误差对相干系数的影响。假设主通道没有受到运动误差的影响, 副通道受到

二次斜距误差的影响, 则相干系数的幅度为

$$|\gamma| \approx \left| \text{sinc}\left(\frac{\Delta r \Omega_r}{\pi}\right) \text{sinc}\left(\frac{\Delta x \Omega_x}{\pi}\right) + \text{sinc}\left(\frac{\Delta r \Omega_r}{\pi}\right) \cdot \frac{1}{2\tilde{\Omega}_x} \int_{-\tilde{\Omega}_x}^{+\tilde{\Omega}_x} \exp\{j\Delta x \xi\} (j b_m \xi^2) d\xi \right| \quad (15)$$

由式(15)可知, 相干系数主要由两部分构成: 一部分是由线性项引起图像偏移而导致的去相干, 另一部分是由二次项引起图像方位向散焦而导致的去相干。

4 仿真结果和分析讨论

4.1 仿真结果

仿真系统为机载 X 波段 SAR 系统, 仿真参数如表 1 所示。对位于参考斜距的点目标分别加入线

性误差 $\delta\dot{e}_0 = 1 \times 10^{-3}$ 和二次误差 $\delta\ddot{e}_0 = 4.55 \times 10^{-7}$ 进行仿真, 验证其对图像定位及散焦的影响。表 2 给出了线性误差情况下点目标定位误差的仿真和理论分析的结果, 二者比较吻合。表 2 中距离向近似值是指存在斜视角时, 省略掉线性误差的二次项, 这说明斜视角存在时距离向定位误差增大主要是由于两者耦合导致的。

图 2 给出了方位向理想脉冲响应函数(Impulse Response Function, IRF)和存在运动误差情况下的散焦 IRF。由图 2 理想 IRF 和散焦 IRF 的 3 dB 分辨率得到其脉冲响应宽度(Impulse Response Width, IRW)展宽大约为 9.8%, 而根据理论计算得到其 IRW 展宽为 8%, 两者结果比较吻合。同时二次误差对 PSLR 和 ISLR 也都有影响。

表 1 仿真系统参数

中心频率	中心斜距	中心视角	波束宽度	斜视角	带宽	速度	采样率	脉宽	PRF
9.6 GHz	5000 m	40°	3°	2°	100 MHz	169 m/s	150 MHz	5 μs	1186 Hz

表 2 线性误差影响定位的仿真实验

斜视角	方位向 Δx (m)		距离向 Δr (m)		
	仿真值	理论值	仿真值	理论值	近似值
斜视角 0°	-4.9997	-5.0000	0	-0.0025	无
斜视角 2°	-5.0008	-5.0028	-0.1863	-0.1773	-0.1748

4.2 地形变化残余误差

假设在整个合成孔径里 $h - h_0 = h'(x' + x_{d0} - x_0)$ 和 $d_{\perp} = d_{\perp 0} + d'_{\perp}(x' + x_{d0} - x_0)$, 则式(5)写成式(9)的形式时 $\delta e_0 = 0$, $\delta\dot{e}_0 = [\cos\beta / (r_0 \sin\theta_0)] d_{\perp 0} h'$, $\delta\ddot{e}_0 = (2 \cos\beta / (r_0 \sin\theta_0)) d'_{\perp} h'$ 。本小节针对 $\beta \neq 0$ 时, 以 $\beta = 2^\circ$ 进行分析计算。

(1) 图像散焦 图像散焦由残余误差的二次项造成, 式(13)表示了 SAR 图像方位向的 IRF。当 $b(x_0) = 0$ 时, 即 $\delta\ddot{e}_0 = 0$ 时, 式(13)退化为 SAR 图像方位向标准的 IRF, 得到完全聚焦的图像。当

$\delta\ddot{e}_0 \neq 0$ 时, 图像方位向由于调频率失配, 聚焦结果将会受到影响。特别地, 对高聚焦精度(IRW 小于 2%)SAR 来说, 要求 $(4\pi/\lambda)\delta e_X < \pi/4$, 即 $\delta e_X < \lambda/16$; 对中等聚焦精度(IRW 小于 8%)SAR 来说, 要求 $(4\pi/\lambda)\delta e_X < \pi/2$, 即 $\delta e_X < \lambda/8$ 。图 3 分别给出了图像方位向 IRW 小于 2% 和 8% 时, 在不同斜距和不同合成孔径长度下的地形坡度和轨迹偏移。由图 3 可知: 在地形坡度和轨迹偏移都相同的条件下, 合成孔径长度越长, 斜距越远, 图像散焦越严重。此处及后文中 P 波段的中心频率都设为 620 MHz。

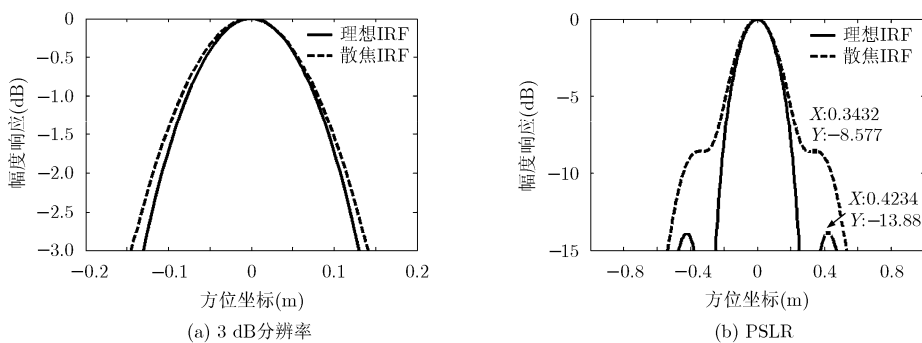


图 2 方位向理想 IRF 和散焦 IRF 对比图

(2)相位误差 由于地形变化残余误差中常数项为0, 目标峰值点的相位误差只有人造相位误差。地形变化残余误差的一次项和二次项都会导致人造相位误差。由图像散焦分析可知, 当 $\delta e_x < \lambda/16$ 时可认为对图像聚焦无影响, 同时其产生的相位误差 $4\pi \cdot \delta e_x / \lambda/3$ 小于 15° ; 当 $\delta e_x < \lambda/16$ 时, 它不仅造成图像散焦, 而且产生大于 15° 的相位误差。对于线性误差导致的相位误差, 当 $\beta = 0$ 时, 相位误差为 $2\pi \cdot r_0 \delta e_0^2 / \lambda$; 当 $\beta \neq 0$ 时, 相位误差变为 $4\pi \sin \beta / (\lambda \cos^2 \beta \sin \theta_0) d_{\perp 0} h'$, 与斜距无关。图4给出了 $\beta = 0$ 或 $\beta \neq 0$ 时, 地形变化中线性误差导致的相位误差。由图4可知: 斜视角的存在加剧了相位

误差, 且与斜距无关; 当 $\beta = 0$ 时, 相位误差与斜距、波长都成反比。

(3)相干系数 地形变化中性线误差会产生2维的图像定位偏移, 且图像方位向定位偏移远远大于距离向, 因此线性误差去相干主要由方位向定位偏移来决定。同时, 由 δe_0 可得, Δx 与斜距无关。图5(a)给出了其导致的去相干随地形坡度的变化曲线, 相干系数随着地形坡度和轨迹偏移的增加急剧下降。当只考虑 δe_0 造成的去相干时, δe_x 导致的去相干随地形坡度变化如图5(b)所示, 相干性随着地形坡度和合成孔径内轨迹偏移的增加而减小, 且对高频系统的影响更大。

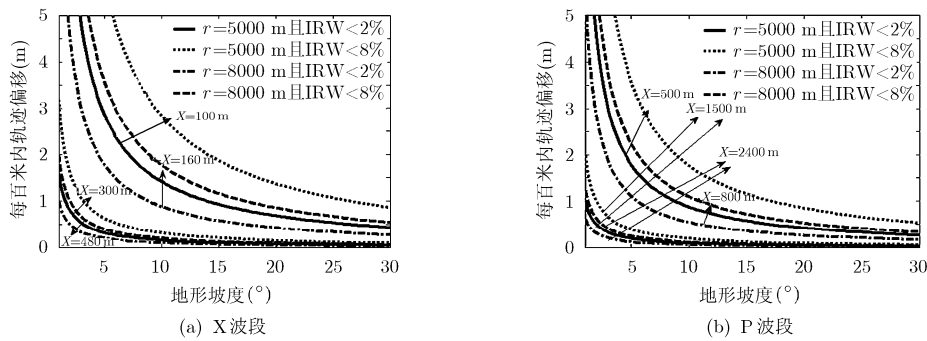


图3 地形变化中二阶误差的散焦影响

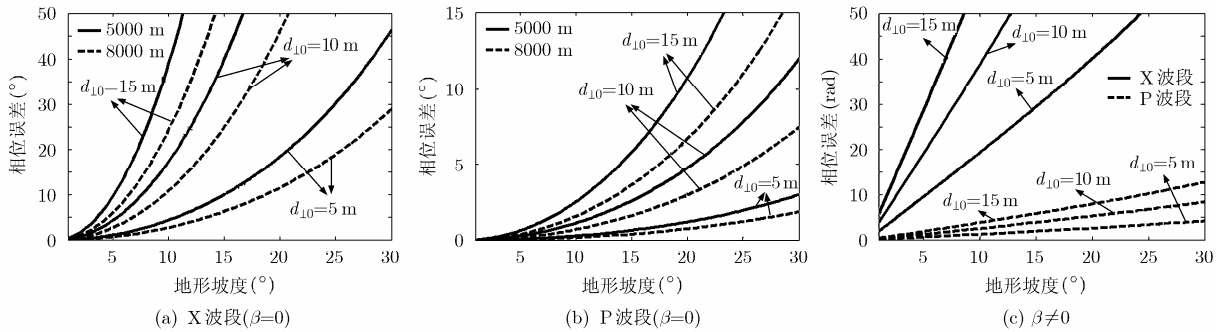


图4 地形变化中线性误差导致的相位误差

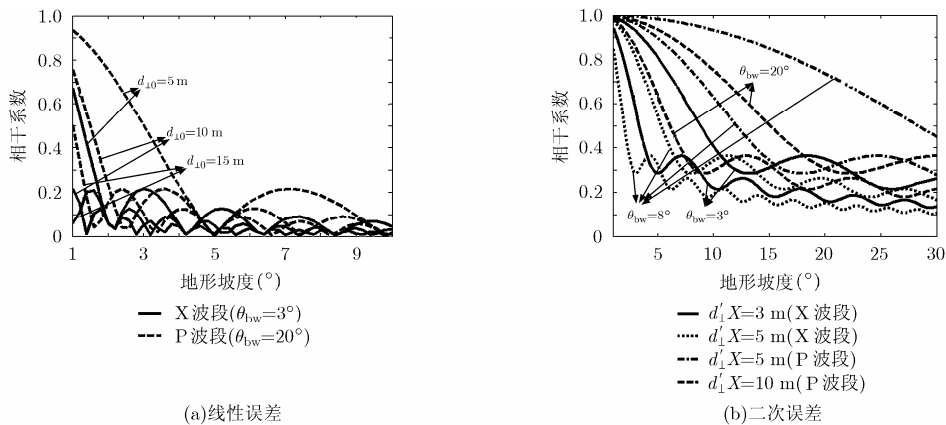


图5 地形变化中残余误差导致的去相干

4.3 LOS 近似残余误差

假设在整个合成孔径里 $d_{||} = d_{||0} + d'_{||}(x' + x_{d0} - x_0)$ ，则式(6)写成式(9)形式时， $\delta e_0 = 0$ ， $\delta \ddot{e}_0 = (-\sin \beta \cos^2 \beta / r_0) d_{||0}$ ， $\delta \ddot{e}_0 = \delta \ddot{e}_{01} + \delta \ddot{e}_{02} = (\cos^3 \beta (2 \sin^2 \beta - \cos^2 \beta) / r_0^2) d_{||0} - (2 \sin \beta \cos^2 \beta / r_0) d'_{||}$ 。

(1)图像散焦 LOS 近似残余误差中的二次项由两项组成，当 $\beta = 0$ 时 $\delta \ddot{e}_{02} = 0$ ，此时 $\delta \ddot{e}_0 = -d_{||0} / r_0^2$ 。图 6 给出了不同散焦程度下 $d_{||0}$ 随 θ_{bw} 的变化曲线。图 7 给出在 $IRW < 2\%$ 情况下其导致的相位误差。由图 7 可知：宽波束的图像易散焦，且不散焦时相位误差较大；波束宽度相同时，对高频系统的影响更大。当 $\beta \neq 0$ 时， $\delta \ddot{e}_0$ 的绝对值比 $\beta = 0$ 时略微减小，其影响也略微减轻，但此时二次项中 $\delta \ddot{e}_{02} \neq 0$ 。图 8 给出了不同散焦程度下，合成孔径长度内轨迹偏移在不同 β 下随 θ_{bw} 的变化曲线。由图 8 可知：斜视角越大，波束宽度越大，图像不散焦时对轨迹偏移的要求越严格；相同波束角下，斜视角对高频系统的影响更大。

(2)相位误差 LOS 近似残余误差的一次项和二次项都会导致人造相位误差。当 $\beta = 0$ 时，残余误差只剩下 $\delta \ddot{e}_0 = -d_{||0} / r_0^2$ ，其在 $IRW < 2\%$ 情况下导致的相位误差如图 7 所示。当 $\beta \neq 0$ 时，残余误差的二次项和线性项都增加了。增加的二次项很容易导致

散焦，如图 8 所示，而且会附加大于 15° 的相位误差。残余误差的线性项导致的相位误差如图 9 所示，且相位误差与斜距无关，与波长成正比。

(3)相干系数 当 $\beta = 0$ 时， $\delta \dot{e}_0 = 0$ ， $\delta \ddot{e}_{02} = 0$ ，此时 $\delta \ddot{e}_0 = -d_{||0} / r_0^2$ ， $\delta e_x = (\tan^2(\theta_{bw}/2)/2) d_{||0}$ 。图 10(a)给出了相干系数随 θ_{bw} 的变化曲线，高频系统去相干更严重。当 $\beta \neq 0$ 时，线性误差会产生 2 维的偏移，此时其导致的去相干如图 11 所示，随着斜视角的增大，相干系数减小。同时，出现线性误差的同时，还出现新的二次项，此时 δe_x 导致的去相干如图 10(b)所示，相干性随着合成孔径内的轨迹偏移和斜视角的增加而减小。

5 结论

本文针对波束中心近似对机载干涉 SAR 图像质系数的影响进行了深入研究。详细推导了斜视条件下二次斜距误差对干涉 SAR 的影响，并通过仿真验证了理论推导的正确性。在此基础上，从理论上推导了斜视量和相干条件下波束中心近似造成的运动补偿残余误差对干涉 SAR 的影响，从而得到了如下结论：波束中心近似残余误差会导致图像散焦、定位偏移、相位误差和去相干，且对宽波束高频系

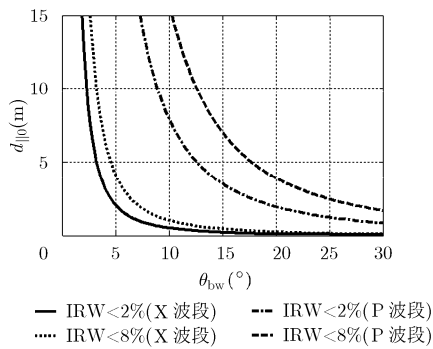


图 6 $d_{||0}$ 随 θ_{bw} 的变化

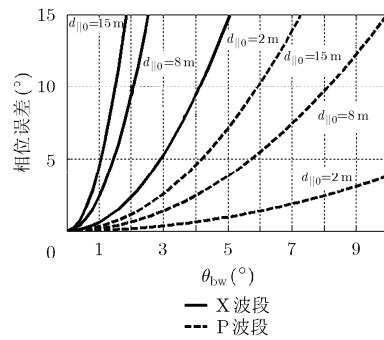


图 7 $IRW < 2\%$ 时的相位误差

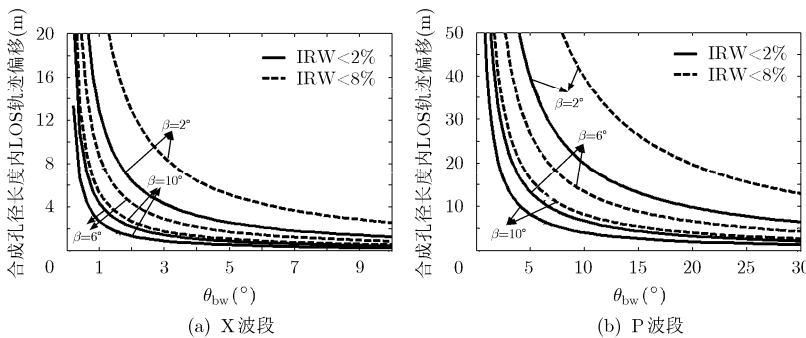


图 8 合成孔径长度内轨迹偏移随 θ_{bw} 的变化曲线

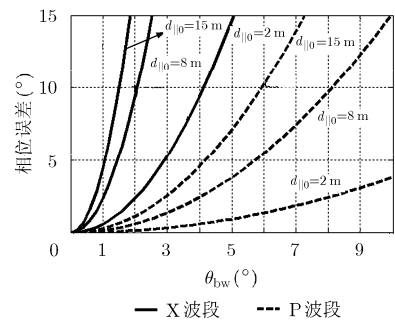


图 9 LOS 近似中线性误差导致的相位误差

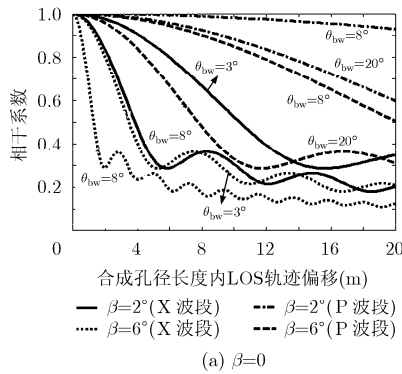
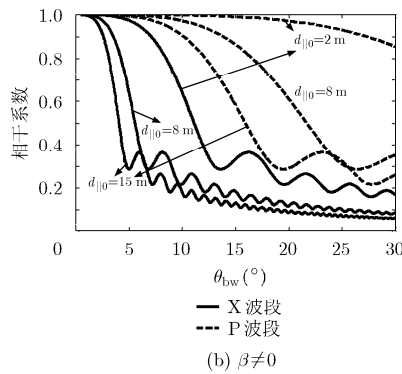
(a) $\beta=0$ (b) $\beta \neq 0$

图 10 LOS 近似中二次误差导致去相干

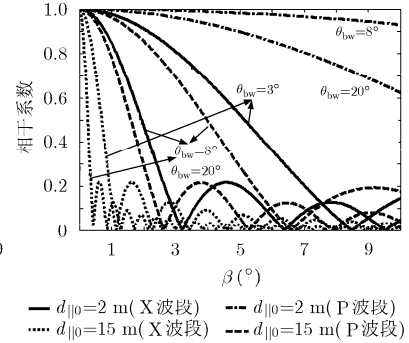


图 11 LOS 近似中线性误差导致去相干

统的影响更大；地形变化残余误差中斜视角的存在会使相位误差急剧增加；LOS 近似残余误差的影响与斜距无关，且斜视角和轨迹偏移的增大会加剧其不利影响。该文的分析结果为机载重轨干涉 SAR 数据处理中运动补偿精度提供了理论依据。同时在残余运动误差估计和补偿中都假设相位误差全是由 IMU/GPS 测量数据导致的，因此在残余运动误差估计之前必须要消除波束中心近似误差的影响。

参考文献

- [1] Moreira A and Huang Yong-hong. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1029-1040.
- [2] 李银伟, 向茂生, 毛永飞. 基于扩展波数域的机载双天线干涉 SAR 自配准成像算法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(7): 1630-1636.
Li Yin-wei, Xiang Mao-sheng, and Mao Yong-fei. Auto-registration imaging algorithm based on extended wavenumber domain for airborne dual-antenna InSAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(7): 1630-1636.
- [3] Mao Yong-fei, Xiang Mao-sheng, Wei Li-deng, et al. The effect of IMU inaccuracies on airborne SAR imaging[J]. *Journal of Electronics (China)*, 2011, 28(4): 409-418.
- [4] Mao Yong-fei, Xiang Mao-sheng, Wei Li-deng, et al. Error analysis of SAR motion compensation[C]. *IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques*, Manchester, United Kingdom, 2012: 377-380.
- [5] Reigber A, Prats P, and Mallorqui J. Refined estimation of time-varying baseline errors in airborne SAR interferometry[J]. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(1): 145-149.
- [6] Macedo K A C de, Scheiber R, and Moreira A. An autofocus approach for residual motion errors with application to airborne repeat-pass SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3151-3162.
- [7] Zhong Xue-lian, Guo Hua-dong, Xiang Mao-sheng, et al. Residual motion estimation with point targets and its application to airborne repeat-pass SAR interferometry[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(2): 762-780.
- [8] Potsis A, Reigber A, and Mittermayer J. Sub-aperture algorithm for motion compensation improvement in wide beam SAR data processing[J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(23): 1405-1407.
- [9] Madsen S. Motion compensation for ultra wide band SAR[C]. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Symposium*, Sydney, Australia, 2001: 1436-1438.
- [10] Prats P, Reigber A, and Mallorqui J. Topography-dependent motion compensation for repeat-pass interferometric SAR systems[J]. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 206-210.
- [11] Macedo K A C de and Scheiber R. Precise topography and aperture-dependent motion compensation for airborne SAR[J]. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 172-176.
- [12] Zheng X, Yu W, and Li Z. A novel algorithm for wide beam SAR motion compensation based on frequency division[C]. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Symposium*, Denver, CO, 2006: 3160-3163.
- [13] Fornaro G, Franceschetti G, and Perna S. On center-beam approximation in SAR motion compensation[J]. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(2): 276-280.

李银伟：男，1985 年生，博士生，研究方向为 SAR 成像、运动补偿、干涉 SAR 信号处理。
邓袁：男，1989 年生，硕士生，研究方向为多基线干涉 SAR 信号处理。
向茂生：男，1964 年生，研究员，博士生导师，长期从事干涉 SAR 技术及方法的研究工作。