

## 柔性基线抖动对星载双天线 InSAR 系统性能的影响分析

王晓光<sup>①②</sup> 王治强<sup>①</sup> 杨新<sup>①</sup> 刘薇<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院光电研究院 北京 100094)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要:** 该文针对星载双天线 InSAR 存在柔性基线抖动现象, 分析了其对系统主要性能的影响。首先建立了基线抖动模型, 在一定参数范围内, 得到了简化的副天线回波信号模型, 采用改进的 2 维频域算法可得原始回波数据; 分析波束失准并提出了一种波束对准方案; 阐述了低频/高频抖动对 SAR 图像与干涉图的影响。以典型系统参数为例, 数值模拟和理论分析结果一致, 可为系统设计和应用提供一定的理论参考。

**关键词:** InSAR; 基线抖动; 波束失准; 干涉图

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)05-1114-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00918

## Analysis of Spaceborne Dual-antenna InSAR System Characteristic Under Flexible Baseline Oscillation

Wang Xiao-guang<sup>①②</sup> Wang Zhi-qiang<sup>①</sup> Yang Xin<sup>①</sup> Liu Wei<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Academy of Optic-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

<sup>②</sup>(Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The main performance of spaceborne dual-antenna InSAR system in case of flexible baseline oscillation is investigated. Based on the mast motion model, a reduced raw echo signal of the slave antenna is derived under a limited condition. Then, the antenna beam misalignment is analysed and an alignment scheme is proposed. Finally, the oscillation effect on the SAR image resolution and the interferogram coherence is expounded for both the slow and high frequency. In the example of typical system, theoretical analysis and numerical simulation conducted show the result is consistent, which could provide an reference for the system design and application.

**Key words:** InSAR; Baseline oscillation; Beam misalignment; Interferogram

### 1 引言

星载双天线干涉合成孔径雷达(InSAR)系统包括主、副天线, 天线支撑臂, 基线测量系统以及波束对准系统等, 与重复通过InSAR模式相比, 它不存在时间去相干, 具有数据相干性好, 质量高等优点<sup>[1]</sup>。双天线通过可伸缩的铰接式支撑臂连接, 采用单臂或双臂展开。其中, 主天线位于卫星平台上, 副天线位于舱外支撑臂末端。该系统的特点是基线为非刚性连接, 会造成侧滚、俯仰、偏航和伸缩等变化, 引起相位误差和去相干效应, 影响系统性能, 降低数字高程模型(DEM)的质量。因此, 须在作业过程中对副天线位置和姿态进行精密的动态测量, 精确定干干涉基线的长度和指向(如SRTM任务中, 基线长度精度要求达2 mm, 指向精度达9"(角秒)<sup>[2]</sup>)。这里基线测量系统包括主天线上的标志点跟

踪器和激光测距仪, 以及副天线上的角反射器和LED标志点(见图1)。

根据双天线InSAR系统的特点, 实质上基线抖动可分为刚性平台姿态抖动和柔性支撑臂抖动两部分。对前者已有相当研究, 可利用平台传感器等方法精确估计偏差<sup>[3]</sup>; 而对后者研究较少, 在理论上虽可利用基线测量系统校正副天线的运动, 但非常复杂<sup>[4]</sup>, 而且不能监测低于采样周期的低频抖动情况。因此, 评价柔性基线抖动对InSAR性能的影响并进

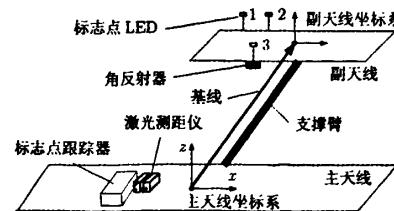


图1 星载双天线InSAR干涉基线示意图(单臂)

2010-08-27 收到, 2010-12-23 改回

\*通信作者: 王晓光 sy0515140@163.com

行相关运动补偿是非常重要的。而已有文献大多没有具体针对柔性抖动, 也缺乏系统地对InSAR性能的影响分析。文献[5]重点在于改进抖动时的原始回波生成算法; 文献[6]只分析了抖动引起的去相干效应; 文献[7]没有分析抖动对波束指向的影响。

本文重点考虑柔性基线抖动, 建立了抖动模型, 并在一定参数范围内, 得到了简化的副天线回波信号模型, 并采用改进的2维频域算法可得原始回波数据; 然后, 详细分析了抖动对双天线波束指向、单幅复图像和干涉图等特性的影响。最后, 以典型的星载X-SAR参数为例, 给出数值仿真和理论分析结果。

## 2 基线抖动模型

假设 InSAR 为交轨运行模式, 理想情况下, 两天线相位中心在方位斜距坐标系( $x, r$ )下分别表示为  $A_1(x', 0)$  与  $A_2(x', B_{\parallel})$ 。其中,  $x'$  为  $A_1$  天线方位向坐标;  $\theta$  为下视角;  $\alpha$  为基线倾角;  $B_{\parallel}$  为基线沿斜距向的投影,  $B_{\parallel} = B \sin(\theta - \alpha)$ ;  $B_{\perp}$  为垂直于斜距向的基线分量,  $B_{\perp} = B \cos(\theta - \alpha)$ 。

支撑臂发生弯曲时的几何关系如图 2 所示, 其中  $\varphi_r$  为滚转角,  $\varphi_y$  为偏航角,  $\Delta r$  为  $A_2$  斜距向变化,  $\Delta x$  为  $A_2$  方位向变化。此时, 两天线相位中心在方位斜距坐标系下表示为  $A_1(x', 0)$  与  $A_2(x' + \Delta x, B_{\parallel} + \Delta r)$ 。其中  $\Delta x \approx B \varphi_y$ ,  $\Delta r \approx \Delta B \sin(\theta - \alpha) + B_{\perp} \varphi_r$ ,  $\Delta B$  为基线长度伸缩量, 由于变化很小, 可以忽略<sup>[7]</sup>。通常假设支撑臂弯曲经历余弦抖动, 因此斜距向误差可表示为

$$\Delta r(t) = B_{\perp} A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

式中  $A$  为最大滚转角,  $\omega$  为抖动角频率,  $\varphi_0$  为参考相位,  $T_r = 2\pi/\omega$  为抖动周期。将上式转化为空间域, 并按泰勒展开表示,  $\Delta r(x) = \Delta r_0 + (V_0/v)(x - x_0) - (\Delta r_0/2)(\omega/v)^2(x - x_0)^2 + \dots$ , 式中  $t_0$  为参考时刻,  $v$  为平台运动速度,  $\Delta r_0 = \Delta r_m \cos(\omega t_0 + \varphi_0)$ ,  $\Delta r_m = B_{\perp} A$  为基线滚转弯曲幅值;  $V_0 = V_m \sin(\omega x_0/v + \varphi)$ ,  $V_m = \Delta r_m \omega$  为最大抖动速度。

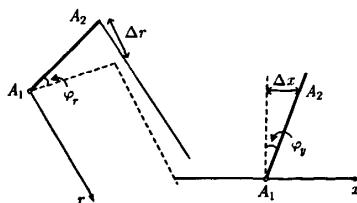


图 2 支撑臂滚转与偏航弯曲投影示意图

## 3 回波信号模型

假设主天线发射线形调频(chirp)信号, 经相干解调后, 副天线回波模型可表示为<sup>[7]</sup>

$$h_2(x', r') = \iint \sigma(x, r) \exp[-jk(R_1 + R_2)] \\ \cdot \exp\left[jb\left(r' - \frac{R_1 + R_2}{2}\right)\right] \\ \cdot \text{rect}\left[\frac{r' - (R_1 + R_2)/2}{c\tau/2}\right] w_1 w_2 dx dr \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为载波波长,  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\sigma(x, r)$  为场景散射系数,  $f_c$  为载波频率,  $B_r$  为 chirp 信号带宽,  $\tau$  为脉冲持续时间;  $L$  为天线方位向尺寸,  $X = \lambda R_0 / L$  为等效合成孔径,  $R_0$  为场景目标最短斜距;  $r' = ct/2$ ,  $b = 2k(B_r/f_c)/(c\tau)$ ;  $w_1, w_2$  分别为主、副天线方向函数,  $\text{rect}[\bullet]$  为矩形窗函数。 $R_1, R_2$  分别为主、副天线到地面目标的斜距; 当支撑臂弯曲时,  $R_2 = \sqrt{(r - B_{\parallel})^2 + (x' + \Delta x - x)^2}$ 。

由式(2)可知, 考虑基线抖动时, 相位项是变量  $(x' - x, x', x, r)$  的函数, 因此不能采用传统的 2 维频域原始回波生成算法。这里以主天线为参考基准, 对误差项进行分解, 在一定参数适用范围内(见模拟仿真部分), 可得到简化的副天线回波模型:

$$h_2(x', r') = \exp[-jk\Delta r] \iint \sigma(x, r) w_1\left(\frac{x' - x}{X}\right) \\ \cdot w_2\left(\frac{x' + \Delta x - x}{X}\right) \exp[-j2k(R_1 - B_{\parallel}/2)] \\ \cdot \exp[jb(r' - R_1 + B_{\parallel}/2)^2] \\ \cdot \text{rect}\left[\frac{r' - R_1 + B_{\parallel}/2}{c\tau/2}\right] dx dr \quad (3)$$

### 3.1 低频抖动

当基线抖动频率较低时, 可忽略二阶项和高阶项, 则相位误差项可表示为

$$\exp[-jk\Delta r_0] \exp[-j\beta_s(x' - x_0)]$$

式中  $\beta_s = k(V_0/v)$ 。将上式代入式(3), 采用改进的 2 维频域原始回波生成算法, 首先进行距离向 FT 可得

$$H_2(x', \eta) = \exp[-jk\Delta r] \bar{H}_2(x', \eta) \quad (4)$$

式中  $\bar{\eta} = \eta + 2k$ ,  $\bar{H}_2(x', \eta) = \text{rect}\left[\frac{\eta}{b c \tau}\right] \exp\left[j \frac{\eta^2}{4b}\right]$   
 $\iint \sigma(x, r) \exp[j\bar{\eta}(R_1 + B_{\parallel}/2)] w_1 w_2 dx dr$ 。其回波生成算法流程如图 3 所示。

对回波数据做成像处理后, 可以得到 SAR 复图像。同样, 还可从理论上对回波信号模型做匹配滤波和 IFFT 变换, 可近似得到副天线复图像解析表达式:

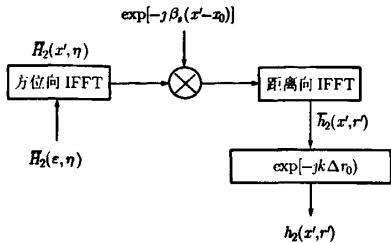


图3 低频抖动时回波生成算法

$$\begin{aligned} i_2(x, r) \approx & \text{rect}[\bar{x}/X] \exp[-jk\Delta r_0] \sigma(x, r) \\ & \otimes \exp[j\beta_s(x + \bar{x})/2] \\ & \cdot \text{sinc}[\pi(x - \bar{x})/\rho_x] \text{sinc}(\pi r/\rho_r) \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $\otimes$  表示卷积； $\rho_x$ 、 $\rho_r$  分别为理想情况下 SAR 的方位向和距离向分辨率；方位向偏移量  $\bar{x} = R_0 V_0 / (2v)$ ； $\rho_x$  为实际方位向分辨率， $\bar{\rho}_x = \rho_x / (1 - \rho_x V_0 / \lambda v)$ 。

### 3.2 高频抖动

对高频抖动而言，必须考虑  $\Delta r$  中高阶项。对式(1)进行 Jacobi-Anger 级数展开，则相位误差项可表示为<sup>[7]</sup>

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n J_n(k\Delta r_m) \exp[jn(\varphi_0 + \beta x')]$$

式中  $J_n(\cdot)$  为第 1 类  $n$  阶 Bessel 函数， $\beta = \omega/v$ ，令  $A_n = j^n J_n(k\Delta r_m) \exp(jn\varphi_0)$ 。将上式代入式(3)，采用改进回波生成算法，流程与图 4 类似。此外，同样可从理论上分析，近似得到副天线复图像解析表达式：

$$\begin{aligned} i_2(x, r) \approx & \sum_{n=-M}^{+M} A_n \sigma(x, r) \otimes \exp[jn\beta(x + n\bar{x})/2] \\ & \cdot \text{sinc}[\pi(x - n\bar{x})/\rho_x] \text{sinc}(\pi r/\rho_r) \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $M = [T_r v / \rho_x]$ ， $[\cdot]$  表示下取整； $\bar{x} = \rho_x T / T_r$ ， $\bar{\rho}_x = \frac{\rho_x}{1 - n\bar{x}/X}$ 。由式(6)可知，基线高频抖动对图

像产生的影响可看作是一系列未受扰动图像的加权叠加。

## 4 模拟仿真与分析

(1) 仿真条件 X-SAR 系统仿真参数示于表 1。

(2) 波束失准分析与对准方案 基线抖动会引起波束失准，减少两天线波束“脚印”的重叠，降低副通道的信噪比，增大方位向模糊比等，影响干涉信号的相干性。此外，不同的斜视角也将引起两天线多普勒频带的差异，减少方位谱的重叠。主、副两天线的多普勒频差可表示为<sup>[8]</sup>

$$\Delta f_d = (2/\lambda)v \cos \beta_1 (\varphi_p \cos \theta_{el} - \varphi_y \sin \theta_{el})$$

其中  $\beta_1$  为主天线斜视角， $\varphi_y$  为基线偏航角， $\varphi_p$  为俯仰角， $\theta_{el}$  为方位向仰角。当  $\varphi_p \leq 0.1^\circ$  时，两天线多普勒频带偏移  $|\Delta f_d| \leq 840$  Hz，引起的高程误差约为 5 m。理想情况下  $\Delta f_d = 0$ ，因此可根据多普勒频率测量估计基线转动角偏差。

为提高干涉测量精度，需进行双天线波束对准，使其具有相同的地面重叠和多普勒谱。在轨对准是基于基线测量系统和多普勒频率测量，并结合机械调整装置和电子波束调整仪用于失准校正。基本过程为：在天线支撑臂伸展完成后，基线测量系统首先估计出副天线滚转角、俯仰角和偏航角偏差。对滚转角偏差，可通过主天线的仰角（距离向）调整给以补偿；而对俯仰角和偏航角偏差，由于估计值受到仪器误差和机械位置误差的影响，先用于粗对准，使两天线波束充分重叠。然后，通过多普勒频率测量和分析，精确补偿俯仰角和偏航角偏差，然后将定标后的估计值用于精对准，使两天线视轴指向一致。最后，方位向波束对准的残差可进一步通过电子波束控制给以补偿。

(3) 参数适用范围 简化后的副天线回波模型具有一定的适应范围，因此，分析忽略项的条件是非常必要的。假设当指数项绝对幅角值小于 0.1 rad 时，可近似认为指数项为 1，即可忽略。此外，已知方位向变化小于半波束宽度，即  $x - x_0 \leq \lambda r / (2L)$ 。以表 1 中 X-SAR 系统参数为例，对相位一阶项分别进行分析，当  $\Delta x \leq 0.38$  m， $\Delta r \leq 587.6$  m 时，幅角均小于 0.1。显然，两个条件容易满足，3 个一阶项均可忽略；对相位二阶项进行分析，当  $\Delta r \leq 0.51$  m，二阶项可简化为  $(r' - R_1 + B_1)^2$ 。

综合以上分析，当满足  $\Delta x \leq 0.38$  m， $\Delta r \leq 0.51$  m 时，可以获得简化回波模型式(3)。通常

表 1 X-SAR 系统仿真参数

名称	参数
轨道高度	233 km
场景中心下视角	54.5°
基线倾角	45°
平台速度	7500 m/s
交轨基线长度	60 m
载波波长	0.0312 m
方位向天线长度	12 m
脉冲带宽	9.5 MHz
距离向采样频率	11.25 MHz
脉冲重复频率	1674 Hz

InSAR 在作业过程中状态相对稳定, 故该条件可以满足。

(4) 抖动频率的划分 考虑基线抖动模型的二阶泰勒展开式, 由于  $x' - x_0 < X/2$ , 当  $\frac{\pi \Delta r_m}{\lambda} \cdot \left( \frac{\omega X}{2v} \right)^2 \leq 0.1$  时, 对应低频抖动情况, 即可忽略二阶项和高阶项, 此时合成孔径时间  $T = 0.14$  s, 抖动周期  $T_r \geq 9.83$  s, 抖动速度幅值  $\Delta r_m / T_r \leq 0.051$  m/s, 抖动加速度幅值  $\Delta r_m / T_r^2 \leq 5.2 \cdot 10^{-3}$  ms<sup>-2</sup>; 反之, 为高频抖动情况, 必须考虑高阶项。图 4 显示高频和低频抖动时的平均相位误差。

当卫星处于姿态保持状态时, 认为基线经历低频抖动; 而当发动机某次点火后, 认为基线经历高频抖动。

(5) 低频抖动分析 由式(5)可知, 低频抖动主要产生一确定性误差, 即常相位项  $\exp(-jk\Delta r_0)$ , 它将引起干涉图去相干, 可在回波信号距离向压缩前直接进行补偿。除此误差项外, 图像方位向分辨率受损, 并且将产生空间偏移。为方便分析, 对方位谱参数  $\beta_z$  和空间偏移参数  $\bar{x}$  做归一化处理,  $S_1 = \rho_z V_0 / (\lambda v)$ ,  $S_2 = \bar{x} / \rho_z = TV_0 / \lambda$ 。由于  $V_0 \leq 2\pi\Delta r_m / T_r$ , 结合表中参数可得,  $S_1 \leq 0.01$ ,  $S_2 \leq 1.44$ 。因此  $S_1$  项对方位分辨率  $\bar{\rho}_z$  与复图像对相干性的影响较小, 可以忽略; 而  $S_2$  项不能忽略。

图 5 为数值仿真得到的理想情况下和低频抖动时的方位向响应, 由图可知, 低频抖动对分辨率影响较小, 只引起一定的空间偏移, 这与理论分析结果是一致的。

此外, 归一化空间偏移项  $S_2$  会对复图像对相干性产生较大影响, 根据复图像对相干性表达式定义, 并忽略热噪声等, 相干系数可表示为  $S_2$  的函数<sup>[9]</sup>。

$$\rho = (1 - |a_x \rho_r|)(1 - |a_x \rho_z|) \operatorname{sinc}[\pi S_2(1 - |a_x \rho_z|)]$$

式中  $a_x$  与  $a_z$  是距离向坡度和方位向坡度的函数。图 6 显示相干系数随抖动速度的变化。

距离向坡度和方位向坡度以 2 维坐标形式表示, 由图可知, 仅当  $\Delta r_m / T_r \leq 0.002$  m/s 时, 空间

偏移项引起的去相干较小。此外, 相干性还与场景的坡度有关, 随着抖动速度的增加, 将引起严重的去相干, 必须给以补偿。为分析低频抖动对干涉图的影响, 选取斜坡地型图, 给出干涉相位模拟图, 如图 7 所示。

(6) 高频抖动分析 高频抖动时, 回波数据可看作是理想情况下幅相加权的叠加, 进而造成目标响应的减弱。由式(6)可知, 加权数  $M$  仅与抖动周期有关, 且成正比。当  $T_r / T < 0.0058$  时,  $M < 1$ , 只有  $n = 0$  项才起作用, 这意味着任何超高频抖动将不会对图像产生影响; 而随着  $T_r$  增大, 方位向分辨率  $\bar{\rho}_z$  受到的影响将减小。

此外, SAR 系统传递函数与加权函数共同作用时会在方位向产生回波对, 回波的幅值取决于  $J_n$  项。而由于  $J_n$  项与抖动幅值有关, 当  $\Delta r_m < 0.1$  cm 时, 基项  $J_0$  约为 1, 其它谐振项远小于基项, 此时可认为副天线回波数据受抖动的影响均可忽略。

图 8 为数值仿真得到的聚焦处理后的方位向目标响应, 这里取  $T_r = T$ ,  $\Delta r_m = 0.5$  cm。由图 8 可知, 目标响应不仅受  $J_0$  的影响, 还出现了较高峰值的回波对(对应于  $n = \pm 2, \pm 3$  等), 会降低图像质量。

为进一步分析高频抖动对干涉图的影响, 选取“金字塔”型高程图(600 m × 600 m × 200 m), 给出干涉相位模拟图。

由图 9 可知, 基线抖动对干涉图的影响较大, 随着抖动幅值的增大, 相位误差和干涉图模糊程度也将增大, 相干性变小。由于高频抖动产生的相位误差具有不确定性, 因此需要采用相应的运动补偿算法<sup>[10,11]</sup>。

## 5 结论

本文针对柔性基线抖动对 InSAR 系统性能的影响进行了理论和数值模拟分析。

(1) 在一定参数范围内可得简化的副天线回波模型, 此时基线抖动产生的主要影响源自滚转弯曲, 而偏航弯曲、俯仰弯曲和伸缩项等主要影响天线方

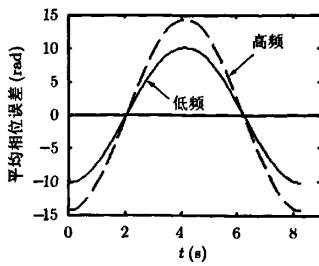


图 4 低频抖动和高频抖动时的平均相位误差

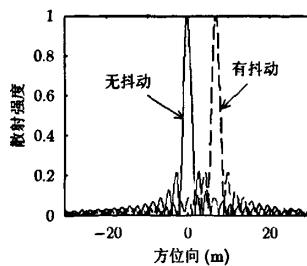


图 5 低频抖动时方位向脉冲响应

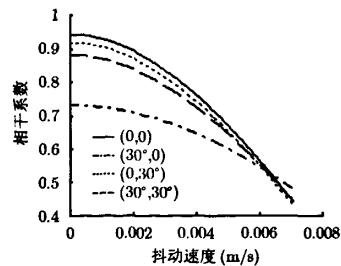
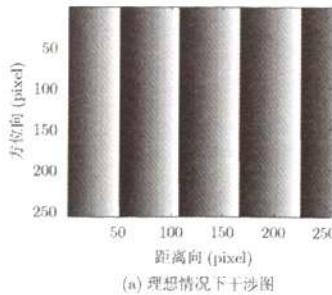
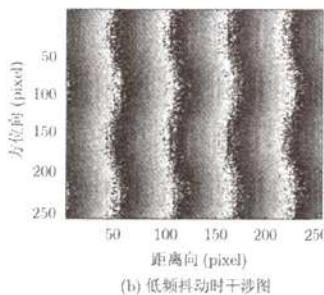


图 6 基线抖动对相干系数的影响



(a) 理想情况下干涉图



(b) 低频抖动时干涉图

图7 不同情况下的干涉图

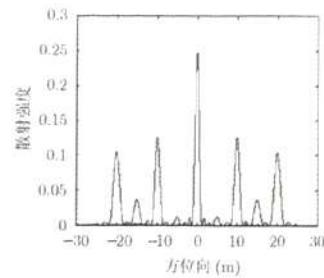
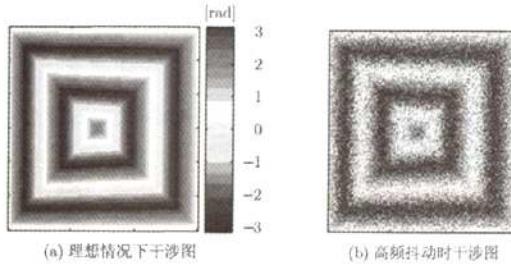


图8 高频抖动时方位向脉冲响应



(a) 理想情况下干涉图

(b) 高频抖动时干涉图

图9 不同情况下的干涉图

向图, 可通过波束对准和图像配准加以修正。(2)基线抖动引起波束失准, 本文提出了一种基于基线测量和多普勒频率测量的粗对准、精对准和波束控制方案。(3)低频抖动主要产生确定性相位误差项  $\exp(-jk\Delta\tau_0)$ , 对分辨率影响不大, 但引起去相干效应, 可在距离向压缩前直接补偿; 而高频抖动产生的相位误差具有不确定性, 导致方位向分辨率降低和干涉图去相干, 需采用合适的补偿算法。此外, 由定量分析可知, 当抖动幅值和频率满足一定关系时, 抖动产生的影响可以忽略。

文中以典型的X-SAR系统参数为例, 给出了数值仿真和理论分析, 两者结果相吻合, 验证了结论的正确性, 可为InSAR系统总体分析与设计提供重要理论依据。

## 参 考 文 献

- [1] Rosen P A, Hensley S, and Joughin I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(3): 333-382.
- [2] Farr T G, Paul A R, and Edward C, et al. The shuttle radar topography mission[R]. *Reviews of Geophysics*, 2007: 45.
- [3] 时磊, 梁兴东. 双向卡尔曼滤波器在机载 SAR 运动补偿中的应用[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(12): 3380-3383.  
Shi Lei and Liang Xing-dong. Application of forward-backward Kalman filter to airborne SAR motion compensation [J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(12): 3380-3383.
- [4] Breit H, Adam N, and Eineder M, et al. The shuttle radar topography mission: processing scenario and techniques[C]. CEOS SAR Workshop, Tolouse, France, 1999: 133-136.
- [5] 唐晓青, 向茂生, 吴一戎. 考虑基线抖动的双天线干涉 SAR 原始回波仿真[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(8): 1856-1861.  
Tang Xiao-qing, Xiang Mao-sheng, and Wu Yi-rong. SAR raw signal simulation of dual-antenna InSAR accounting for baseline oscillations [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(8): 1856-1861.
- [6] Tang Xiao-qing, Wu Yi-rong, Wang Yan-ping, and Peng Hai-liang. Analysis of decorrelation caused by mast oscillation in spaceborne dual-antenna InSAR[C]. CIE International Conference on Radar, Shanghai, China, 2006: 776-780.
- [7] Franceschetti G, Iodice A, and Maddaluno S, 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.
- [8] Geudtner D, Zink M, and Gierull C, et al. Interferometric alignment of the X-SAR antenna system on the space shuttle radar topography mission[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(5): 995-1006.
- [9] Franceschetti G, Iodice A, and Migliaccio M, et al. A novel across-track SAR interferometry simulator[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 950-962.
- [10] 谭鸽伟, 邓云凯. 机载SAR的运动误差的2维空变性及其补偿[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(2): 366-369.  
Tan Ge-wei and Deng Yun-kai. The two-dimensional spatial-variant properties of airborne SAR motion error and its compensation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(2): 366-369.
- [11] 唐晓青, 向茂生, 吴一戎. 一种改进的基于 DEM 的机载重轨干涉 SAR 运动补偿算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1090-1094.  
Tang Xiao-qing, Xiang Mao-sheng, and Wu Yi-rong. An improved topography-dependent motion compensation approach for airborne repeat-pass interferometric SAR systems [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(5): 1090-1094.

王晓光: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为星载双天线 InSAR 系统关键技术。

王治强: 男, 1972年生, 副研究员, 研究领域为空间系统总体仿真与应用。

杨新: 男, 1967年生, 研究员, 博士生导师, 研究领域为空间系统总体仿真与应用。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>

---



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>