

## 机载双天线 InSAR 运动补偿误差的影响分析

李芳芳<sup>\*①②③</sup> 仇晓兰<sup>①②</sup> 孟大地<sup>①②</sup> 胡东辉<sup>①②</sup> 丁赤飚<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>③</sup>(中国科学院研究生院 北京 100190)

**摘要:** 干涉 SAR 运动补偿是实现高精度机载干涉 SAR 测量的关键。该文针对运动补偿误差对机载双天线干涉 SAR 测量的影响进行了详细的分析。首先在参考高程无误差和有误差两种情况下对运动补偿残余误差进行建模；随后分析了无测量误差条件下运动补偿残余误差对干涉相位和平面定位精度的影响；接着分析了存在航迹测量误差和基线测量误差条件下运动补偿残余误差的影响；最后，通过仿真和实测数据实验验证了理论推导的正确性。该文的分析结果为机载双天线干涉 SAR 系统设计和数据处理提供了理论基础。

**关键词:** 机载 InSAR；运动补偿；残余误差；干涉相位；平面定位

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)03-0559-09

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00850

## Effects of Motion Compensation Errors on Performance of Airborne Dual-antenna InSAR

Li Fang-fang<sup>①②③</sup> Qiu Xiao-lan<sup>①②</sup> Meng Da-di<sup>①②</sup> Hu Dong-hui<sup>①②</sup> Ding Chi-biao<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>③</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** InSAR motion compensation is a key step to obtain high-precision product. The effect of MOTion COmpensation (MOCO) errors on the precision of airborne dual-antenna InSAR is analysed. First, the MOCO residual errors are deduced on condition that the referenced DEM (Digital Elevation Model) is accurate or not, respectively. Next, the effects of MOCO errors on the interferometric phase and plane location are analyzed without measurement errors considered. Then the effects resulted from trajectory measurement errors and baseline measurement errors are presented. Finally, the accuracy of the theoretical deduction is verified with simulation and real data. The research provides theoretical bases for the system design and signal processing of airborne dual-antenna InSAR.

**Key words:** Airborne InSAR; Motion compensation; Residual error; Interferometric phase; Plane location

### 1 引言

机载干涉 SAR 系统利用双通道复图像对的干涉相位提取地表高程信息，不仅要获取高质量的幅度图像，更要求保持高精度的图像相位信息。影响干涉相位精度的因素一是各种去相干因素导致的随机相位误差，如热噪声去相干、时间去相干、几何去相干等，二是成像处理中由于运动补偿的不精确引入的固定相位误差。去相干因素引起的相位误差通常采用相位滤波的方法降低噪声影响，提高相干性。

2012-07-04 收到，2012-10-26 改回

国家 863 计划项目(2007AA120302)和国家自然科学基金(61101200)

资助课题

\*通信作者：李芳芳 liff86@gmail.com

本文仅考虑运动补偿误差引入的固定相位误差对干涉测量的影响。

高精度的运动补偿是高分辨率机载 SAR 成像的关键。机载干涉 SAR 系统对运动补偿的精度要求更为严苛。普通的机载 SAR 成像常采用传统的两级运动补偿<sup>[1,2]</sup>算法，该算法存在两方面的近似<sup>[3]</sup>，一是波束中心近似，即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的运动误差进行补偿，导致方位空变的残余误差；二是起伏地形中的参考高程近似，即运动补偿基于平地假设或者外源的高程信息进行，高程精度不够时，会导致方位空变残余误差迅速增大。

针对方位空变相位误差的补偿，在高分辨率 SAR<sup>[4]</sup>数据处理中已有一定的研究<sup>[5,6]</sup>，文献<sup>[7-10]</sup>

则进一步对考虑地形变化的补偿方法进行了研究，分别提出了 SATA(SubAperture Topography-and Aperture-dependent) 算法，PTA(Precise Topography-and Aperture-dependent) 算法和 FD(Frequency Division)算法，并进行了对比分析。尽管这些方法为消除传统运动补偿方法的近似误差提供了方案，但是对于机载双天线干涉系统来说，这些方法还不完善，因为运动补偿误差对干涉测量的影响缺乏系统分析。

在双天线干涉 SAR 成像中，载机运动轨迹的测量误差、基线的测量误差等也会引起运动补偿的误差，进一步导致干涉相位误差，从而影响高程测量的精度。

针对上述问题，本文分析了机载双天线干涉 SAR 运动补偿残余误差及其对干涉测量精度的影响。第 2 节对单天线运动补偿残余误差进行了建模，分别推导了运动补偿参考高程有无误差时的情况；第 3 节分析了无测量误差条件下残余误差对干涉相位和平面定位精度的影响；第 4 节分析了存在航迹测量误差和基线测量误差时残余误差的影响；最后通过仿真和实测数据实验验证了理论分析的正确性。

## 2 单天线运动补偿残余误差模型

在相同时刻，对不同方位向位置的地面散射点来说，载机的运动误差引起的误差值不同，而传统运动补偿算法仅按照波束中心的运动误差进行补偿，这就会导致方位空变的运动补偿残余误差。本节首先分析单天线情况下运动补偿参考高程无误差时的方位空变残余误差，在此基础上推导有高程误差时的情况。

### 2.1 无高程误差情况

运动补偿参考高程无误差时，单天线机载 SAR 成像几何如图 1 所示。设在方位零时刻，载机的参考位置为  $\tilde{x}_s, \tilde{z}_s$ ，地面对应点 A 位置为  $x_A, y_A, z_A$ ， $y_A \approx 0$ ，载机的运动误差为  $\Delta x(t), \Delta z(t)$ 。则正侧视情况下 A 点的真实运动误差为

$$\Delta R_A(t)$$

$$\sqrt{\tilde{x}_s^2 + \tilde{x}_A^2 + V_s t^2} - \sqrt{\tilde{x}_s^2 + \tilde{x}_A^2 + V_s t^2}$$

其中  $V_s$  为载机飞行速度。在波束中心近似的情况下，A 点实际补偿的运动误差为

$$\Delta R_{Ares}(t) = \sqrt{\tilde{x}_s^2 + \tilde{x}_A^2 + V_s t^2} - \sqrt{\tilde{x}_s^2 + \tilde{x}_A^2 + z_s^2 + z_A^2}$$

因此补偿后残余的方位空变误差为

$$\Delta R_{Aerr}(t) = \Delta R_A(t) - \Delta R_{Ares}(t)$$

$$= \frac{V_s t}{R_A} (y_A - z_s)$$

$$(3)$$

其中  $R_A = \sqrt{\tilde{x}_s^2 + \tilde{x}_A^2 + z_s^2 + z_A^2}$ ， $f$  为目标 A 的视角。令  $\Delta R_{Aerr}(t) = f \Delta x(t) - f \Delta z(t)$ ，则可得到， $\Delta R_{Ares}(t) = \frac{V_s t}{R_A} \Delta R_{Aerr}(t)$ 。为了对上

式有更直观的理解，下面从另一角度分析，将运动误差投影到斜距平面，如图 2 所示，A 点在该时刻

的真实运动误差为  $\frac{R}{a(t)} \frac{dR}{a(t)}$ ，而补偿的运动误差为  $dR$ ，因此，残余的方位空变误差为

$$\Delta R_{Aerr}(t) = dR - \frac{R}{a(t)} \Delta R_{Aerr}(t)$$

$$\Delta R_{Ares}(t) = \Delta R_{Aerr}(t) + \frac{R}{a(t)} \Delta R_{Aerr}(t) = \frac{a(t)}{a(t)} \Delta R_{Aerr}(t)$$

$$(4)$$

对式(3)做进一步化简，有  $\Delta R_{Ares}(t) = \Delta R_{Aerr}(t)$

$$\frac{V_s t}{R_A} (y_A - z_s) = \Delta R_{Aerr}(t) = \frac{a(t)}{a(t)} \Delta R_{Aerr}(t) = \frac{a(t)}{a(t)} \Delta R_{Aerr}(t)$$

由此可见，上述两个角度的分析是一致的。

### 2.2 有高程误差情况

在存在高程误差情况下进行运动补偿的几何关系如图 3。设目标 D 真实高度为  $z_D$ ，运动补偿采用的当地高度为  $z_A$ ，误差为  $h$ ，即  $z_D = z_A + h$ 。D 点的真实运动误差为

$$\Delta R_D(t)$$

$$\sqrt{\tilde{x}_s^2 + \tilde{x}_D^2 + V_s t^2} - \sqrt{\tilde{x}_s^2 + \tilde{x}_A^2 + V_s t^2}$$

当 SAR 位于 P 时，根据目标 D 所对应距离  $PD$  计算得到的运动补偿采用点为  $A(x_A, y_A, z_A)$ ，其中  $y_A \approx 0$ ，因此在平地近似的情况下，D 点实际补偿的运动误差同式(2)。则补偿后的残余误差为

$$\Delta R_{Dres}(t) = \Delta R_D(t) - \Delta R_{Ares}(t)$$

$$= \Delta R_D(t) - \Delta R_A(t) - \Delta R_{Ares}(t)$$

$$(6)$$

式(6)中前两项由目标高程未知引起，第 3 项为平地目标的方位空变误差，即对于高程未知的目标来说，其残余误差相比平坦场景多了  $\Delta R_D(t) - \Delta R_A(t)$  项。进行一些化简，可得到

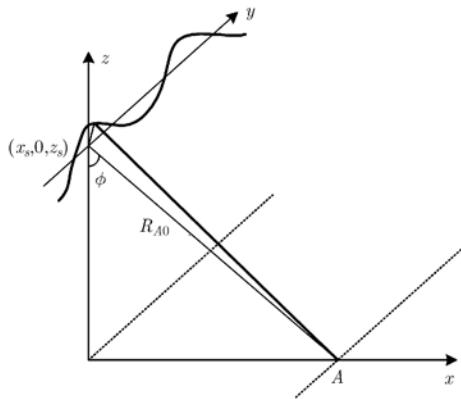


图 1 无高程误差的运动补偿几何示意图

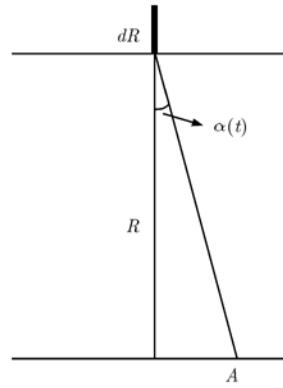


图 2 斜距平面运动误差示意图

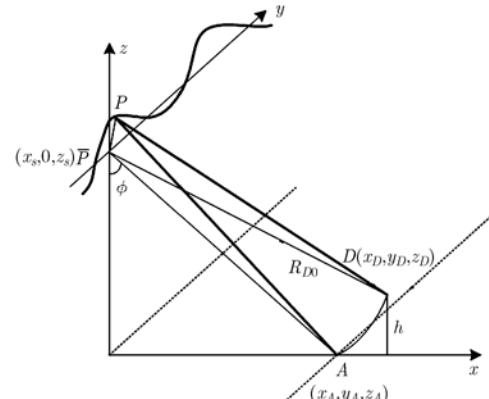


图 3 存在高程误差的运动补偿几何示意图

$$\begin{aligned} & \square R_{Dres} t \quad \square \frac{h}{x_s - x_A} \square x t \square f_1 \quad \square z t \square f_2 \\ & \dots \quad \square \frac{1}{\tilde{a} t} \quad | \quad \square x t \square f_1 \quad \square z t \square f_2 \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $h$  即为目标与参考平面的高度差。

### 3 无测量误差条件下运动补偿残余误差的影响

在推导出单天线运动补偿残余误差的基础上, 本节分析其对机载双天线 InSAR 的干涉相位和平面定位的影响。

#### 3.1 对干涉相位的影响

运动补偿残余误差对干涉相位的影响, 分载机无姿态变化和有姿态变化两种情况进行分析。

(1) 无姿态变化 设基线长度为  $B$ , 基线角为  $\tilde{a}$ , 方位零时刻天线 1 的参考位置为  $x_s^0, z_s$ , 则天线 2 的参考位置为  $x_s^0 + B \square \tilde{a}, z_s^0 + B \square a$ , 载机不存在姿态变化的情况下, 两天线的运动误差相同, 均为  $\square x t \tilde{a}, \square z t \tilde{a}$ 。设天线 1 中与目标  $D$  斜距相同的参考平面上的点为  $A$ , 而天线 2 为  $A'$ , 由于两通道中  $D$  点斜距不同, 因此  $A$  和  $A'$  点不完全重合, 存在微小的距离向偏移, 即  $x_{A'} - x_A \square x$ , 而其高度一致, 均为参考平面的高度, 即  $z_{A'} = z_A$ 。因此两天线中,  $D$  点的运动补偿残余误差分别为

$$\begin{aligned} & \square R_{Dres} t \quad \square \frac{h}{x_s - x_A} \square x t \square f_1, \quad \square z t \square f_2 \\ & \dots \quad \square \frac{1}{\tilde{a} t} \quad | \quad \square x t \square f_1 \quad \square z t \square f_2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \square R_{Dres} t \quad \square \frac{h}{x_s - B \square \tilde{a}} \square x t \square f_1, \quad \square z t \square f_2 \\ & \dots \quad \square \frac{1}{\tilde{a} t} \quad | \quad \square x t \square f_1 \quad \square z t \square f_2 \end{aligned} \quad (9)$$

进一步, 两天线残余误差的不一致分量为

$$\begin{aligned} & \square R_{Dres} t \tilde{a} - \square R_{Dres} t \\ & \dots \quad \square \frac{1}{\tilde{a} t} \quad | \quad \square x t \square f_1, \quad \square z t \square f_1 \square f \\ & \dots \quad \square \frac{h}{x_s - x_A} \square x t \square f_1, \quad \square z t \square f_1 \square f \\ & \dots \quad \square \frac{hB \square \tilde{a}}{x_s - x_A} \square x t \square f_1, \quad \square z t \square f_1 \square f \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $f_1, f_2$  分别为天线 1 和天线 2 中目标  $A$  的视角,  $\square f \square f_1 \tilde{a}, f_1$ , 由于  $A$  和  $A'$  点之间的距离向偏移  $x$  非常小, 为了便于分析, 这里取近似  $x_{A'} \square x_A$ 。

(2) 有姿态变化 载机存在姿态变化时, 会导致两个天线的运动误差不一致。假设由于姿态变化引起的两个天线在  $x$  和  $z$  方向的不一致运动误差分别为  $\square dx t, \square dz t$ , 即天线 1 的运动误差为  $\square x t \tilde{a}, \square z t \tilde{a}$ , 天线 2 的运动误差为  $\square x t, \square dx t \tilde{a}, \square dz t \tilde{a}$ 。此时天线 1 中  $D$  点的运动补偿残余误差仍同式(8), 而天线 2 中  $D$  点的运动补偿残余误差为

$$\begin{aligned} & \square \frac{h}{x_s - B \square \tilde{a}} \square x t, \quad \square dx t \square f_1 \\ & \dots \quad \square z t, \quad \square dz t \square f_2 \quad \square \frac{1}{\tilde{a} t} \quad | \quad \square x t \square f_1 \\ & \dots \quad \square f_2 \square x t, \quad \square dx t \tilde{a}, \quad \square dz t \tilde{a} \end{aligned} \quad (11)$$

因此, 两天线残余误差的不一致分量为

$$\begin{aligned}
 & \square R_{Dres} t \sim \square R_{Dres} t \\
 & \cdots \quad \boxed{\frac{1}{a}} \quad \boxed{x t} \quad \boxed{f_1} \quad \boxed{z t} \quad \boxed{f_1} \quad \boxed{f} \\
 & \cdots \quad \boxed{\frac{1}{a}} \quad \boxed{dx t} \quad \boxed{f_1} \quad \boxed{dz t} \quad \boxed{f_1} \quad \boxed{f} \\
 & \cdots \quad \boxed{\frac{h}{x_s x_A}} \quad \boxed{x t} \quad \boxed{f_1} \quad \boxed{z t} \quad \boxed{f_1} \quad \boxed{f} \\
 & \cdots \quad \boxed{\frac{hB}{x_s x_A}} \quad \boxed{x t} \quad \boxed{f_1} \quad \boxed{z t} \quad \boxed{f_1} \quad \boxed{f} \\
 & \cdots \quad \boxed{\frac{h}{x_s x_A}} \quad \boxed{dx t} \quad \boxed{f_1} \quad \boxed{dz t} \quad \boxed{f_1} \quad \boxed{f} \quad (12)
 \end{aligned}$$

假设干涉系统的参数如表 1, 运动误差为 10 m, 在无高程误差且无姿态变化时, 方位空变残余误差引起的干涉相位误差为  $\square j = \frac{p}{l} \square R_{Dres} \sim \square R_{Dres} t$

存在高程误差时, 设  $h \sim$ ; 此时方位空变残余误差引起的干涉相位误差为  $\square j = \square e \sim$ ; 进一步, 考虑载机的姿态变化, 当基线垂直于航向时, 俯仰角的变化不影响两天线的相对位置; 而设偏航角的影响在单天线运动补偿方位重采样时已消除, 因此仅需要考虑横滚角的变化。设横滚角变化为  $q \sim$ , 则由其引起的两天线不一致运动误差分别为:  $dx t \sim B \square a \sim q \sim \square a$ ,  $dz t \sim B \square a \sim q \sim \square a$ , 此时的干涉相位误差为  $\square j \sim \square e \sim$ 。由此可见, 在无高程误差时, 方位空变残余误差对干涉相位的影响很小, 可以忽略, 而高程误差的存在使得方位空变残余误差引起的干涉相位误差增大, 尤其在载机有姿态变化的情况下, 干涉相位误差显著增大。

表 1 干涉系统参数

波长(m)	0.03	工作模式	乒乓
飞行高度(m)	3000	视角	45
天线孔径(m)	1	基线长度(m)	2
基线角(rad)	0	运动误差(m)	10

### 3.2 对平面定位的影响

方位空变残余误差不仅影响目标的峰值相位, 进而引起干涉相位的误差, 还对目标的平面定位有影响。式(7)为存在高程误差时的方位空变残余误差, 将其在波束中心时刻, 即  $t \sim$  处进行泰勒展开, 则有

$$\begin{aligned}
 & \square R_{Dres} t \sim \square R_{Dres} \dots \square R'_{Dres} \sim t \\
 & \cdots \quad \frac{1}{\square} \square R''_{Dres} \sim t^2 \quad \square \quad (13)
 \end{aligned}$$

其中, 常数项系数  $\square R_{Dres} \sim$  和 1 次项系数  $\square R'_{Dres} \sim$

分别为

$$\begin{aligned}
 & \square R_{Dres} \sim \square \frac{h}{x_s x_A} \square x \sim \square f \sim \square z \sim \square f \square \\
 & \square R'_{Dres} \sim \square \frac{h}{x_s x_A} \square dx \sim \square f \sim \square dz \sim \square f \square \quad (14)
 \end{aligned}$$

线性残余误差会引起目标方位向位置的偏移, 有

$$\begin{aligned}
 & \square s_a \square \frac{R_D}{V_s} \square R'_{Dres} \sim \\
 & \cdots \quad \square \frac{R_D h}{V_s x_s x_A} \square x \sim \square f \sim \square z \sim \square f \square \quad (15) \\
 \text{其中 } R_D \square \sqrt{x_s x_D \dots z_s z_D}, \text{ 为波束中心时刻目标到载机参考位置的距离。而常数残余误差和线性残余误差均会引起目标距离向位置的偏移, 有} \\
 & \square s_r \square \square R_{Dres} \sim \square \frac{R_D}{V_s} \square R'_{Dres} \sim \\
 & \cdots \quad \square \frac{h}{x_s x_A} \square x \sim \square f \sim \square z \sim \square f \square \\
 & \cdots \quad \square \frac{R_D h}{V_s x_s x_A} \square x \sim \square f \sim \square z \sim \square f \square \quad (16)
 \end{aligned}$$

由上述分析可以看出, 当不存在高程误差时, 目标的方位向和距离向位置偏移均为零, 方位空变残余误差基本不影响目标的平面定位。而随着高程误差的增大, 方位向和距离向位置偏移均会增大, 使图像产生内部畸变, 从而影响干涉测量的平面定位精度。

## 4 有测量误差条件下运动补偿残余误差的影响

### 4.1 航迹测量误差

上节分析是以航迹测量完全准确为前提的。而实际中传感器导航系统存在测量误差, 目前其测量精度能达到 1~5 cm<sup>[11]</sup>。因此需要分析航迹测量误差对运动补偿的影响。

不考虑航迹测量误差时两天线的运动补偿残余误差如式(8)和式(11), 此时两天线的运动误差分别为  $\square x t \sim \square z t \sim$  和  $\square x t \sim dx t \sim dz t \sim$ , 并按照准确运动误差拟合的参考轨迹补偿。在存在航迹测量误差时, 两天线则分别按  $\square x t \sim s_m x t \sim \square z t \sim s_m z t \sim$  和  $\square x t \sim dx t \sim s_m x t \sim \square z t \sim dz t \sim s_m z t \sim$  拟合的参考轨迹进行补偿, 其中  $s_m x t \sim$ ,  $s_m z t \sim$  即为测量误差。由于  $s_m x t \sim$  和  $s_m z t \sim$  较小, 因此对其仅按常数项分析, 此时天线 1 和天线 2 分别有附加的运动补偿误差为

$$\begin{aligned}
 & \square R_{Dres} t \sim s_m x t \sim \square f_1 \sim s_m z t \sim \square f_1 \sim \square \\
 & \square R_{Dres} t \sim s_m x t \sim \square f_2 \sim s_m z t \sim \square f_2 \sim \square \quad (17)
 \end{aligned}$$

因此, 由航迹测量误差引起的两天线残余误差

的不一致分量为

$$sR_x(t) - sR_y(t) \square s_m x(t) \square f_1, s_m z(t) \square f_1 \square f \quad (18)$$

设测量误差  $s_m x(t)$  和  $s_m z(t)$  均为 5 cm, 其它参数如表 1, 则  $\square j \square \sim \square \square$ , 可见航迹测量误差引起的两天线的运动补偿残余误差几乎可以抵消, 对干涉相位的影响很小。航迹测量误差对平面定位的影响与 3.2 节分析相同, 由于  $sR_x(t)$  和  $sR_y(t)$  很小, 由此引起的目标位置偏移可以忽略。

#### 4.2 基线测量误差

基线长度和基线角的测量值通常存在偏差。设真实的基线长度为  $B$ , 基线角为  $a$ , 测得的基线长度和基线角分别为  $B_m \square B$  和  $a_m \square a$ 。不失一般性, 假设 POS (Position and Orientation System) 安装在天线 1 的位置, 基线有误差时的运动补偿关系如图 4。根据 POS 数据和测量的基线  $B_m$  和  $a_m$  解算得到的天线 2 的位置存在误差, 即图 4 中虚曲线所示的  $S_{2e}(t)$ , 运动补偿则根据该曲线拟合得到的参考轨迹  $\tilde{S}_{2e}(t)$  进行。然而天线 2 的真实运动轨迹应根据基线真实值  $B$  和  $a$  解算, 得到图 4 中实曲线  $S_2(t)$ , 并对其拟合得到参考轨迹  $S_2(t)$ , 从而进行运动补偿。因此, 在基线存在测量误差的情况下, 会引起运动补偿的误差。

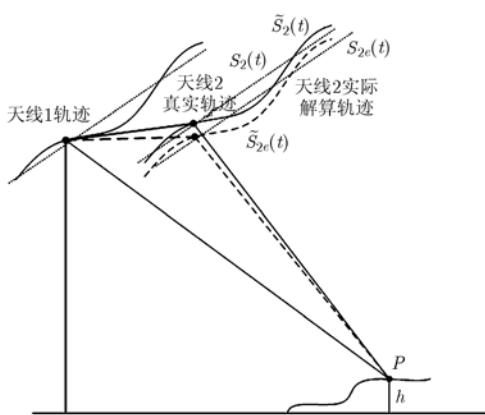


图 4 基线有误差时的运动补偿关系示意图

基线误差为零时两天线残余运动误差的不一致分量如式(12), 该式得出的前提是两天线的运动轨迹均为准确的, 并根据该运动轨迹拟合的参考轨迹进行运动补偿。而在基线测量存在误差时有: 天线 1 的运动误差为  $\square x(t) \square z(t)$ , 并按照准确运动误差拟合的参考轨迹补偿; 而天线 2 的运动误差为  $\square x(t) \square dx(t) \square z(t) \square dz(t)$ , 但按照  $\square x(t) \square dx(t) \square z(t) \square dz(t)$  拟合的参考轨迹进行补偿,  $sx(t)$  和  $sz(t)$  即为基线误差引起的解算运动轨迹的误差。因此需要分析按照不同参考轨迹进行运

动补偿的差异。

图 4 中, 天线 1 的位置为  $x_1(t), y_1(t), z_1(t)$ , 与 3.1 节有姿态变化时的情况类似, 这里载机的姿态变化也仅需考虑横滚角  $q(t)$  的因素, 因此当基线长度为  $B$ , 基线角为  $a$  时, 天线 2 的准确位置为  $x_2(t) = B \square a \square q(t) \square y_2(t) \square z_2(t)$ 。设天线 1 的运动补偿参考轨迹为  $(\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{z}_1)$ , 即有  $\square x(t) \square z(t) = (\bar{x}_1, \bar{z}_1)$ , 通常将天线 2 的参考轨迹拟合为  $(\bar{x}_2, \bar{B} \square a \square \bar{q}, \bar{y}_2, \bar{z}_2)$

$\bar{B} \square a \square \bar{q}$ , 其中  $\bar{q}$  为横滚角  $q(t)$  的均值, 由此可以推出姿态变化引起的两天线不一致运动误差  $dx(t), dz(t)$  分别为

$$\begin{aligned} dx(t) &= B \square a \square q(t) - B \square a \square \bar{q} \\ dz(t) &= B \square a \square q(t) - B \square a \square \bar{q} \end{aligned} \quad (19)$$

在基线存在误差时, 天线 1 的运动轨迹和参考轨迹不变, 而天线 2 根据基线测量值解算得到的运动轨迹为  $(\bar{x}_2, \bar{B}_m \square a_m \square q(t), \bar{y}_2, \bar{z}_2)$ ,  $\bar{B}_m \square a_m \square \bar{q}$ , 拟合的参考轨迹为  $(\bar{x}_2, \bar{B}_m \square a_m \square \bar{q}, \bar{y}_2, \bar{z}_2)$ ,  $\bar{B}_m \square a_m \square \bar{q}$ , 因此可以计算出  $sx(t)$  和  $sz(t)$  分别为

$$\begin{aligned} sx(t) &= B \square a \square q(t) - B \square a \square \bar{q} \\ dz(t) &= B \square a \square q(t) - B \square a \square \bar{q} \end{aligned} \quad (20)$$

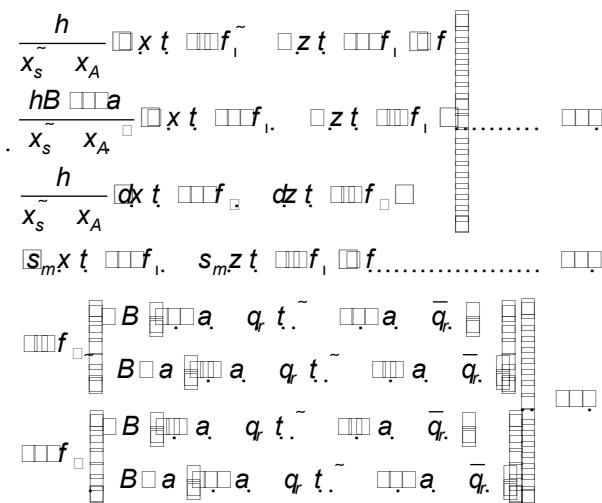
由于  $sx(t)$  和  $sz(t)$  很小, 因此对其进行常数项分析, 此时天线 2 有附加的运动补偿误差为

$$sR_x(t) \square sx(t) \square f \square sz(t) \square f \quad (21)$$

假设  $\square B \square \sim \square \square, \square a \square \sim \square$ , 横滚角变化  $q \square \square$ , 均值  $\bar{q} \square \square$ , 其它参数同表 1, 则有  $sR_x(t) \square \sim \square \bar{e} \square \square$ , 由此引起的相位误差为  $\square j \square \sim \square \square$ , 可见基线测量误差对运动补偿及干涉相位误差有较显著的影响, 且姿态变化越剧烈, 误差越大。基线测量误差对目标平面定位的影响与 3.2 节分析相同, 由于  $sR_x(t)$  很小, 由此引起的天线 2 的目标位置偏移也很小, 几乎可以忽略。

综上所述, 两天线总的运动补偿残余误差之差可表示为

$$\begin{aligned} \square R_{Dres}(t) &- \square R_{1Dres}(t) \\ \dots \square \frac{1}{a(t)} \square x(t) \square f_1, \square z(t) \square f_1 \square f_1 &\quad (22a) \\ \dots \square \frac{1}{a(t)} \square dx(t) \square f_1, \square dz(t) \square f_1 \square f_1 \end{aligned}$$



式中各项所代表的物理意义如下：式(22a)为无高程误差时目标的方位空变残余误差；式(22b)为存在高程误差时目标的方位空变残余误差；式(22c)为航迹测量误差引起的残余误差；式(22d)为基线测量误差导致的运动补偿误差。

## 5 实验结果分析

### 5.1 仿真实验

本小节通过仿真点目标阵的运动补偿及成像过程，进而测出目标的平面位置，并利用干涉相位解算出目标的高程，从而对比仿真结果与理论计算结果的一致性。

仿真系统为机载双天线 X 波段干涉 SAR 系统，仿真参数如表 2。仿真 3 个条带的飞行方向如图 5 所示，整个区域覆盖范围为  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 。仿真采用的 POS 数据和横滚角变化数据如图 6 所示。设 3 个条带的基线误差及相位初始偏置如表 3。各条带点目标分布如图 7。

表 2 仿真系统参数

波长(m)	0.03125	工作模式	乒乓
脉冲宽度( $\mu \text{ s}$ )	3	天线孔径(m)	0.8
带宽(MHz)	500	PRF(Hz)	454.5
采样频率(MHz)	550	视角	4.5
飞行高度(m)	3286.6	飞行速度(m/s)	113.3
基线角(rad)	0.014	基线长度(m)	2.18

表 3 3 个条带基线长度、基线角误差以及两通道初始相位偏置

条带	$\Delta B$	$\Delta a$	$\Delta i$
1	0.0050	0.050	45
2	0.0030	0.030	25
3	0.0065	0.065	65

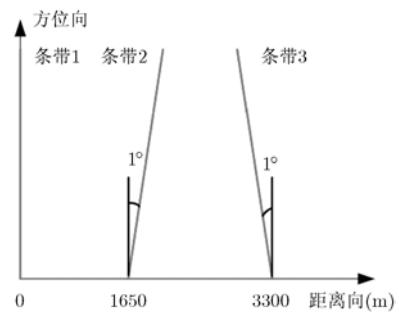


图 5 3 个条带飞行方向示意图

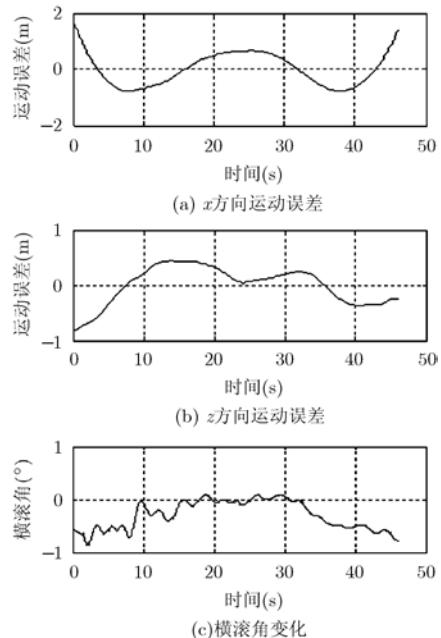


图 6  $x, z$  方向的运动误差和横滚角变化

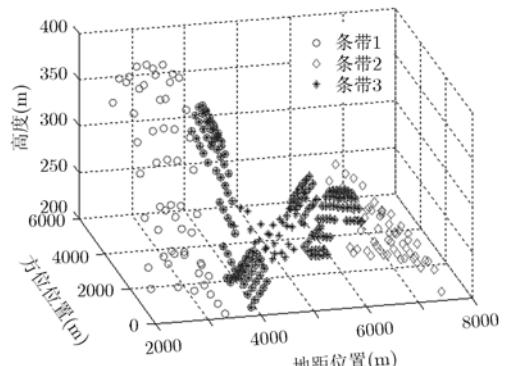


图 7 各条带点目标 3 维位置分布图

运动补偿采用的参考平面的高程为 200 m。由于运动补偿时高程误差的存在，使得目标的平面位置存在偏移。条带 1 中各点目标的平面定位误差如图 8 所示，其中图 8(a)为实际测得的目标方位向和距离向偏移量，图 8(b)为实际偏移量与理论计算偏移量之间的误差。可以看出偏移量误差均在 0.01 m

以内, 表明理论分析与仿真结果基本一致。对条带2和条带3的仿真结果进行分析可以得出同样结论, 这里不再详细叙述。

目标的高程误差可表示为

$$\Delta h = \frac{\Delta h}{\Delta j_1} \Delta j_1 + \frac{\Delta h}{\Delta j_2} \Delta j_2 + \frac{\Delta h}{\Delta j_3} \Delta j_3 + \frac{\Delta h}{\Delta B} \Delta B + \frac{\Delta h}{\Delta a} \Delta a$$

$$= \Delta h_{j_1} + \Delta h_{j_2} + \Delta h_{j_3} + \Delta h_B + \Delta h_a$$

其中  $\Delta j_1$  为参考 DEM 的误差引起的运动补偿残余相位误差, 由此导致反演的 DEM 误差为  $\Delta h_{j_1}$ ;  $\Delta j_2$  为由于  $\Delta B$ ,  $\Delta a$  测量误差引起解算轨迹误差所导致的运动补偿残余相位误差, 由此导致的 DEM 误差为  $\Delta h_{j_2}$ ;  $\Delta j_3$  为两通道初始相位偏置, 引起 DEM 误差为  $\Delta h_{j_3}$ ;  $\Delta B$  为基线长度误差, 引起 DEM 误差为  $\Delta h_B$ ;  $\Delta a$  为基线角误差, 引起 DEM 误差为  $\Delta h_a$ ;  $\Delta h_{j_1}$ ,  $\Delta h_{j_2}$ ,  $\Delta h_{j_3}$  为高程误差的敏感度方程<sup>[12]</sup>。通过仿真结果测得的 DEM 误差为  $\Delta h_{DEM}$ , 按理论分析分别计算出各项误差  $\Delta h_{j_1}$ ,  $\Delta h_{j_2}$ ,  $\Delta h_{j_3}$ ,

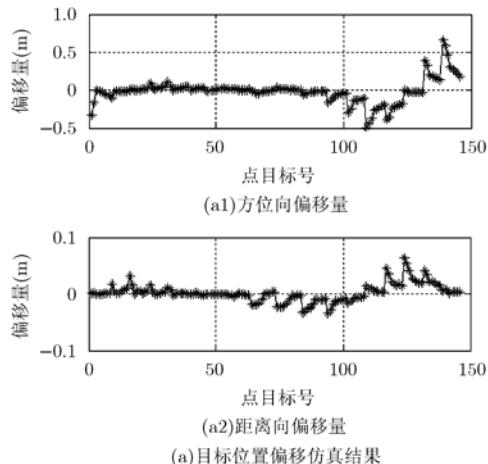


图 8 条带 1 目标平面定位结果

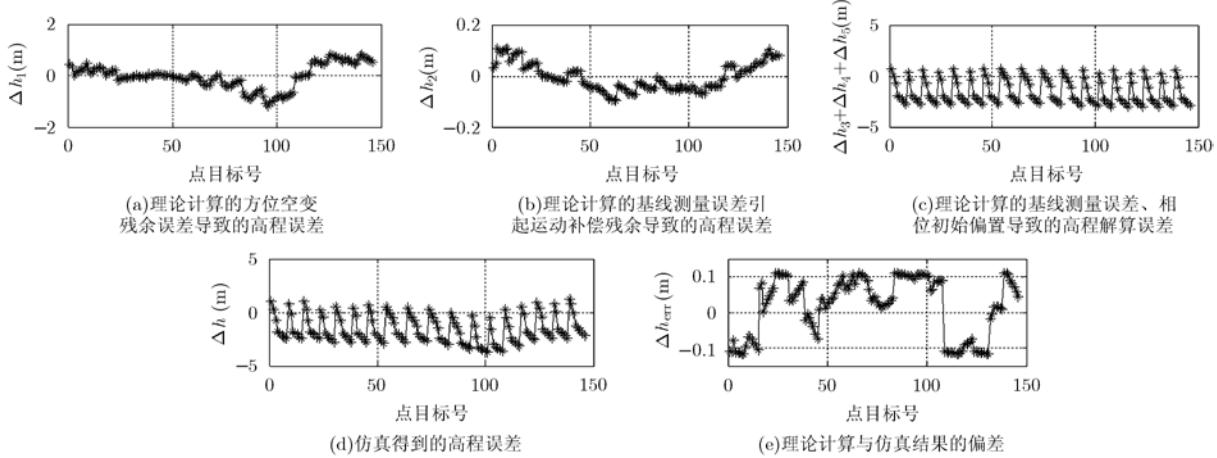


图 9 条带 1 目标高程反演结果

$\Delta h_B$ ,  $\Delta h_a$ , 并计算出实际误差与理论误差的差异为  $\Delta h_{err} = \Delta h - \Delta h_{theo}$ , 从而验证理论分析的正确性。这里也仅显示了条带 1 各点目标的仿真结果如图 9 所示, 其中, 图 9(a) 为理论计算的方位空变残余误差导致的高程误差  $\Delta h_{j_1}$ , 图 9(b) 为理论计算的基线测量误差引起运动补偿残余误差, 进而导致的高程误差  $\Delta h_{j_2}$ , 图 9(c) 为理论计算的基线测量误差、相位初始偏置导致的高程解算误差, 图 9(d) 为实际测出的 DEM 误差  $\Delta h_{DEM}$ , 图 9(e) 为实际误差与理论误差的差异  $\Delta h_{err}$ , 可以看出  $\Delta h_{err} \approx 0$ , 表明理论分析与仿真结果基本吻合。条带 2 和条带 3 的仿真结果同样证明了理论分析的正确性。

## 5.2 实测数据实验

由于实测场景中无定标点信息, 因而无法直接验证干涉测量的高程精度和平面定位精度。因此, 本文分别采用不同的参考高程进行运动补偿, 对实测数据经过两次成像处理, 对比两次成像结果中目

标的平面位置偏移，从而间接地验证平面定位精度与理论分析的一致性。

两次运动补偿采用的参考高程分别为 490 m, 1500 m, 成像结果分别如图 10(a), 10(b)所示。场景中所标注的孤立强散射点在两幅图像中的实测位置偏移及理论计算位置偏移如表 4, 从中可以看出, 实测结果与理论计算结果的误差均在 0.5 像素以内, 表明了理论分析的正确性。

## 6 结束语

本文针对机载双天线干涉 SAR 运动误差对干涉测量的影响进行了深入研究。从理论上推导了方位空变残余误差及其对干涉测量的影响, 进一步分析

了存在航迹测量误差以及基线测量误差时运动补偿残余误差的影响, 从而得出如下结论: 在运动补偿参考高程无误差时, 方位空变残余误差对干涉相位的影响很小, 目标的平面位置偏移也近似为零, 当参考高程存在误差时, 方位空变残余误差导致的干涉相位误差迅速增大, 目标的位置偏移也同时增大; 航迹测量误差引起的两天线的运动补偿残余误差几乎可以抵消, 对干涉相位和平面定位的影响均很小; 基线测量误差对运动补偿及干涉相位误差有较显著的影响, 且姿态变化越剧烈, 误差越大, 但对平面定位的影响很小。仿真和实测数据实验证了理论分析的正确性。本文的分析结论为机载双天线干涉 SAR 系统设计和数据处理提供了理论依据。

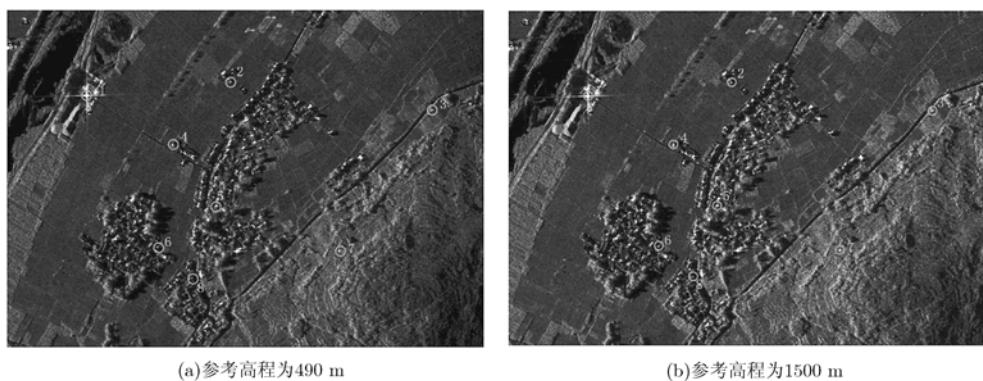


图10 不同参考高程的成像结果

表4 实测位置偏移与理论计算位置偏移对比

目标	1	2	3	4	5	6	7	8
实测偏移量(像素)	方位向	3	2	3	2	2	2	2
	距离向	1	2	1	1	1	1	1
理论偏移量(像素)	方位向	3.36	2.19	3.03	2.91	2.38	2.13	2.04
	距离向	1.07	1.58	0.92	1.06	1.08	1.13	1.04

## 参 考 文 献

- [1] Fornaro G. Trajectory deviations in airborne SAR: analysis and compensation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 997–1009.
- [2] Reigber A, Alivizatos E, Potsis A, et al. Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(3): 301–310.
- [3] Fornaro G, Franceschetti G, and Perna S. On center-beam approximation in SAR motion compensation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(2): 276–280.
- [4] Reigber A, Horn R, Nottensteiner A, et al. Current status of DLR's new F-SAR sensor[C]. *Proceedings of 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Aachen, Germany, June. 7–10, 2010: 1078–1081.
- [5] Madsen S N. Motion compensation for ultra wide band SAR [C]. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Sydney, Australia, July. 9–13, 2001: 1436–1438.
- [6] 孟大地, 丁赤飚. 一种用于宽带机载 SAR 的空变相位补偿算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(10): 2375–2378.
- Meng Da-di and Ding Chi-biao. A new approach to compensating spatially variant phase error in airborne wideband SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(10): 2375–2378.
- [7] Prats P, Reigber A, and Mallorqui J J. Topography-dependent

## 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>