

# 机载双站 SAR 运动补偿研究

李燕平, 张振华, 邢孟道, 保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 与单站 SAR 相比, 双站 SAR 的几何关系更复杂, 运动误差来源更多, 因而运动补偿难度更大. 本文提出了一种有效的双站 SAR 运动误差的估计和补偿方法. 文中首先根据双站 SAR 运动误差的几何模型, 推导出径向运动误差随距离变化的解析式, 接着利用从回波数据估计的多普勒调频率和图像对比度来估计运动参数, 最后利用估计的运动参数对数据分别进行径向和沿航向运动补偿. 该方法可有效校正收发平台的三维运动误差, 并可降低双站 SAR 系统对惯导的要求. 仿真和实测数据的实验结果验证了该方法的有效性.

**关键词:** 双站合成孔径雷达; 运动补偿; 运动误差估计; 雷达成像

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 03-0421-07

## Motion Compensation for the Airborne Bistatic SAR

LI Yan ping, ZHANG Zhen hua, XING Meng dao, BAO Zheng

(Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Compared with the monostatic synthetic aperture radar (SAR) case, the situation in the bistatic SAR case is more complex. First, the geometry of the bistatic SAR is more complex. Second, both the deviations of the transmitter and the deviations of the receiver will introduce motion errors. These lead to an increased complexity for motion compensation of the bistatic data. This paper presents a method for estimating and compensating the motion errors of the bistatic data. Based on the motion error model of the bistatic SAR, an analytic expression that shows the variation of the motion error in the line of sight (LOS) direction with range is derived. Then, the estimated doppler rate and the image contrast are used to calculate the motion parameters. Finally, the motion compensation are implemented separately in the LOS direction and in the along track direction. By using this method, the three dimensional motion errors of the transmitter and receiver can be compensated effectively, and furthermore, the requirement for the inertial navigation system can be decreased. Results on the simulated data and the real data are provided to show the effectiveness of this method.

**Key words:** bistatic synthetic aperture radar; motion compensation; motion error extraction; radar imaging

## 1 引言

双站 SAR 作为一种新概念的对地观测手段, 无论在民用还是军用领域都有广阔的应用前景. 现有的双站 SAR 成像算法<sup>[1~5]</sup>均要求收发平台作匀速直线运动. 对于机载情况, 受气流扰动和导航控制系统的影响, 运动误差难以避免, 因而运动补偿是机载双站 SAR 的关键技术之一. 与单站 SAR 的运动补偿相比, 双站 SAR 的运动补偿存在更大的挑战: 一方面由于收发平台的分置, 运动误差的来源增多; 另一方面, 由于双站 SAR 几何关系的复杂性, 运动误差对不同目标造成的影响也更复杂, 补偿的难度更大. 单站 SAR 中运动误差的分析及补

偿已有大量文献讨论<sup>[6~9]</sup>, 但讨论双站 SAR 运动补偿的文献还不多. 文献[10]分析了不同类型运动误差对双站 SAR 相位同步及成像的影响, 文献[11]分析了载机运动参数的测量误差对双站 SAR 成像的影响, 文献[12]给出了机载双站 SAR 的实验结果, 采取在成像后进行自聚焦的方法以补偿运动误差, 但有时效果不佳. 这些文献重在分析双站 SAR 运动误差的影响, 并未给出运动补偿的具体方法. 本文首先建立了双站 SAR 运动误差的几何模型, 推导出了径向运动误差随距离变化的解析式, 接着提出了一种有效的收发平台三维运动误差的估计和补偿方法, 最后采用仿真和实测数据对该方法进行了验证.

## 2 运动误差模型

假设双站 SAR 收发系统均以正侧视方式工作, 如图 1 所示. 收发平台的高度分别为  $H_R$  和  $H_T$ ; Y, Z 方向的基线分别为  $B_y$  和  $B_z$ ; 收发系统到场景中任一点目标  $P_n$  的最近距离分别为  $R_{BR}$  和  $R_{BT}$ ,  $P_n$  点的坐标为  $(x_n, y_n, 0)$ . 理想情况下, 收发平台将沿 X 轴方向以  $V_0$  匀速直线运动. 假设存在运动误差时, 收发平台的前向速度分别为  $V_R(t)$  和  $V_T(t)$ ,  $t$  时刻收发平台的坐标分别为  $(X_R(t), \Delta Y_R(t), H_R + \Delta Z_R(t))$  和  $(X_T(t) - B_y + \Delta Y_T(t), H_T + \Delta Z_T(t))$ ,

其中  $X_R(t) = \int_0^t V_R(s) ds$  和  $X_T(t) = \int_0^t V_T(s) ds$  分别为收发平台的沿航向位置,  $\Delta Y_R(t)$  和  $\Delta Y_T(t)$  分别为收发平台的 Y 方向位置偏移,  $\Delta Z_R(t)$  和  $\Delta Z_T(t)$  分别为收发平台的 Z 方向位置偏移. 则  $t$  时刻收发系统到点目标  $P_n$  的距离可分别表示为

$$R_R(t) = \sqrt{(X_R(t) - x_n)^2 + (\Delta Y_R(t) - y_n)^2 + (H_R + \Delta Z_R(t))^2} \quad (1)$$

$$R_T(t) = \sqrt{(X_T(t) - x_n)^2 + (-B_y + \Delta Y_T(t) - y_n)^2 + (H_T + \Delta Z_T(t))^2} \quad (2)$$

若雷达的方位波束为窄波束, 对式(1)和式(2)展开, 并忽略影响较小的高次项, 有

$$R_R(t) \approx R_{BR} + (X_R(t) - x_n)^2 / (2R_{BR}) - \Delta Y_R(t) \sin \beta + \Delta Z_R(t) \cos \beta \quad (3)$$

$$R_T(t) \approx R_{BT} + (X_T(t) - x_n)^2 / (2R_{BT}) - \Delta Y_T(t) \sin \alpha + \Delta Z_T(t) \cos \alpha \quad (4)$$

其中  $R_{BR} = \sqrt{y_n^2 + H_R^2}$ ,  $R_{BT} = \sqrt{(B_y + y_n)^2 + H_T^2}$ ,  $\beta$  和  $\alpha$  为收发系统到  $P_n$  的入射角(见图 1).

易知收发平台 Y, Z 方向偏移造成的径向运动误差为

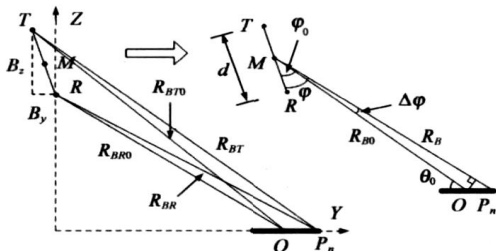


图 2 航线法平面内收发系统与目标的几何关系

$$r_{los}(t) = -\Delta Y_R(t) \sin \beta + \Delta Z_R(t) \cos \beta - \Delta Y_T(t) \sin \alpha + \Delta Z_T(t) \cos \alpha \quad (5)$$

## 3 双站 SAR 三维运动误差的估计及补偿

### 3.1 目标到收发系统最近距离的近似表达式及运动误差分解

假设收发系统到场景中心  $O$  点的最近距离分别为  $R_{BR0}$  和  $R_{BT0}$ . 记  $O$  点和点  $P_n$  相对收发系统最近距离的一半分别为

$$R_{B\Sigma} = (R_{BT0} + R_{BR0})/2 \text{ 和 } R_{B\Sigma} = (R_{BT} + R_{BR})/2,$$

若  $R_{B\Sigma}$  相对  $R_{B\Sigma0}$  增加了  $\Delta r$ , 可得  $R_{BR}$  和  $R_{BT}$  的近似表达式为(证明见附录)

$$R_{BT} = R_{BT0} + \mu_T \Delta r, R_{BR} = R_{BR0} + \mu_R \Delta r \quad (6)$$

其中  $\mu_T$  和  $\mu_R$  为与雷达参数有关的接近 1 的常数,  $\Delta r$  可由距离采样间隔计算得到.

根据式(6)和图 1 的几何关系, 利用

$$\begin{cases} 1/R_{BT} \approx 1/R_{BT0} - \mu_T \Delta r / R_{BT0}^2 \\ 1/R_{BR} \approx 1/R_{BR0} - \mu_R \Delta r / R_{BR0}^2 \\ 1/R_{BT}^2 \approx 1/R_{BT0}^2 - 2\mu_T \Delta r / R_{BT0}^3 \\ 1/R_{BR}^2 \approx 1/R_{BR0}^2 - 2\mu_R \Delta r / R_{BR0}^3 \end{cases}$$

等近似关系, 将径向运动误差进一步分解, 有

$$r_{los}(t) \approx -\Delta Y_R(t) (1 - H_R^2 / (2R_{BR}^2)) + \Delta Z_R(t) H_R / R_{BR} - \Delta Y_T(t) (1 - H_T^2 / (2R_{BT}^2)) + \Delta Z_T(t) H_T / R_{BT} \approx A(t) + B(t) \Delta r \quad (7)$$

其中  $A(t) = -\Delta Y_R(t) \sin \beta_0 + \Delta Z_R(t) \cos \beta_0$

$$- \Delta Y_T(t) \sin \alpha_0 + \Delta Z_T(t) \cos \alpha_0$$

$$B(t) = -\mu_R [\Delta Y_R(t) \cos^2 \beta_0 + \Delta Z_R(t) \cos \beta_0] / R_{BR0}$$

$$- \mu_T [\Delta Y_T(t) \cos^2 \alpha_0 + \Delta Z_T(t) \cos \alpha_0] / R_{BT0}$$

式(7)表明径向运动误差与距离呈线性关系. 其中  $A(t)$  为收发平台 Y, Z 方向偏移相对场景中心的投影,  $B(t)$  为斜率, 表征了径向运动误差随距离变化率的大小.  $A(t)$  一般在米级, 会造成包络和相位的误差,  $B(t) \Delta r$  一般较小, 对包络的影响可以忽略, 可认为只造成相位的误差.

### 3.2 基于回波数据的运动参数加权最小二乘估计

受安装误差和测量精度的影响, 目前国内惯导提供的加速度值往往偏差较大, 有时为了降低成本甚至不配备加速度计, 因而本文考虑从回波数据估计运动参数. 假设  $a_{yR}(t)$  和  $a_{yT}(t)$  分别为收发平台在 Y 方向的加速度,  $a_{zR}(t)$  和  $a_{zT}(t)$  分别为收发平台在 Z 方向的加速度. 由式(3)、式(4)及式(7)可知, 当载体存在运动误差时, 第  $n$  个距离单元回波的瞬时多普勒调频率为

$$f_n(t) = - \frac{V_R^2(t)}{2 \lambda R_{BR0} + \mu_R (R_{B\Sigma} - R_{B\Sigma0})}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{V_T^2(t)}{\lambda R_{BT0} + \mu_T(R_{B\Sigma} - R_{B\Sigma 0})} \\
& - \frac{a(t)}{\lambda} - \frac{b(t)}{\lambda} \Delta r_n + \delta Y(t)
\end{aligned} \quad (8)$$

其中  $a(t) = -a_{yR}(t) \sin \beta_0 + a_{zR}(t) \cos \beta_0$   
 $- a_{yT}(t) \sin \alpha_0 + a_{zT}(t) \cos \alpha_0$

$$\begin{aligned}
b(t) = & -\mu_R[a_{yR}(t) \cos^2 \beta_0 + a_{zR}(t) \cos \beta_0] / R_{BR0} \\
& - \mu_T[a_{yT}(t) \cos^2 \alpha_0 + a_{zT}(t) \cos \alpha_0] / R_{BT0}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\delta Y(t) = & - \frac{[X_R(t) - x_n]}{\lambda R_{BR0} + \mu_R(R_{B\Sigma} - R_{B\Sigma 0})} \frac{d[V_R(t)]}{dt} \\
& - \frac{[X_T(t) - x_n]}{\lambda R_{BT0} + \mu_T(R_{B\Sigma} - R_{B\Sigma 0})} \frac{d[V_T(t)]}{dt},
\end{aligned}$$

$\Delta r_n$  为第  $n$  个距离单元对应的距离变化量。

在一定条件下,  $\delta Y(t)$  的影响可以忽略(证明可参考文献[8, 9])

$$\begin{aligned}
L \leq & \left[ 3 N_d^2 / R_{BR0} + \mu_R(R_{B\Sigma} - R_{B\Sigma 0}) \right. \\
& \left. \cdot [R_{BT0} + \mu_T(R_{B\Sigma} - R_{B\Sigma 0})] / (a_{x\max} R_{B\Sigma}) \right]^{1/3} \quad (9)
\end{aligned}$$

其中  $L$  为合成孔径长度,  $a_{x\max}$  为收发雷达沿航向加速度的最大值。由于载机机械惯性大, 沿航向的速度变化一般较慢, 因而  $a_{x\max}$  很小, 条件(9)容易满足。

根据惯导提供的收发平台的前向速度、 $\mu_T$  和  $\mu_R$  的值、以及目标所处的距离单元  $R_{B\Sigma}$  从式(8)中消去前两项, 可得第  $n$  个距离单元瞬时多普勒调频率的残余项为

$$\Delta Y_n(t) = -a(t) - b(t) \Delta r_n / \lambda \quad (10)$$

由于  $V_T(t)$  和  $V_R(t)$  的测量误差会造成  $\Delta Y_n(t)$  的误差, 由式(8)和式(10), 通过微分, 可以计算  $V_T$  和  $V_R$  的误差  $\sigma_{V_T}$ ,  $\sigma_{V_R}$  引起的  $\Delta Y_n(t)$  的误差

$$\begin{aligned}
\sigma_{\Delta Y_n} = & \frac{2 V_R \sigma_{V_R}}{\lambda R_{BR0} + \mu_R(R_{B\Sigma} - R_{B\Sigma 0})} \\
& + \frac{2 V_T \sigma_{V_T}}{\lambda R_{BT0} + \mu_T(R_{B\Sigma} - R_{B\Sigma 0})} \quad (11)
\end{aligned}$$

一般前向速度的测量精度较高, 若  $\sigma_{V_T} = \sigma_{V_R} = 0.1 \text{ m/s}$ ,  $V_T = V_R = 110 \text{ m/s}$ ,  $R_{BR0} = 45 \text{ km}$ ,  $R_{BT0} = 50 \text{ km}$ ,  $R_{B\Sigma} = R_{B\Sigma 0} = 47.5 \text{ km}$ , 则  $\sigma_{\Delta Y_n} = 0.03 \text{ Hz/s}$ , 可见  $\sigma_{\Delta Y_n}$  较小, 一般可以忽略。实际上, 当  $\sigma_{V_T}$  和  $\sigma_{V_R}$  符号相反时, 式(11)会相互抵消而更小, 另外随着波长和斜距的变大,  $V_T$ ,  $V_R$  测量误差的影响也将减弱, 下面的讨论将假定  $V_T$  和  $V_R$  不存在测量误差。

对于径向运动补偿, 实际上并不需要估计得到收发平台  $Y$ ,  $Z$  方向的加速度值, 而只需要得到合成值  $a(t)$  和  $b(t)$  即可。将式(10)写成向量形式, 有

$$\Delta Y(t) = H \theta(t) + \varepsilon \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned}
\Delta Y(t) = & [\Delta Y_1(t), \Delta Y_2(t), \dots, \Delta Y_N(t)]^T, \\
H = & [-1/\lambda, -\Delta r_1/\lambda, -1/\lambda, -\Delta r_2/\lambda, \dots, -1/\lambda, -\Delta r_N/\lambda],
\end{aligned}$$

$$\theta(t) = [a(t), b(t)]^T, \quad e(t) = [e_1, e_2, \dots, e_N]^T,$$

$N$  为从不同距离段估计得到的多普勒调频率的数目, 误差向量  $e$  中的元素  $e_n$  对应第  $n$  个距离单元多普勒调频率的估计误差。假设  $e_n$  的方差为  $\sigma_n^2$ , 由于各距离段多普勒调频率的估计过程相互独立,  $e$  的协方差矩阵可表示为

$$R_e = \text{diag}[\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_N^2] \quad (13)$$

则运动参数向量  $\theta(t)$  的最佳加权最小二乘估计为

$$\theta_{\text{opt}}(t) = (H^T W_{\text{opt}} H)^{-1} H^T W_{\text{opt}} \Delta Y(t) \quad (14)$$

其中最优权值  $W_{\text{opt}} = R_e^{-1}$ 。实际上, 多普勒调频率估计误差的方差值很难得到, 因而最优权值是得不到的。作为替代, 我们可以将多普勒调频率估计中得到的聚焦最好时图像的对比度作为权值。其合理性在于: 图像的对比度一定程度上反映了多普勒调频率的估计精度。如果某距离单元图像的对比度较低, 一种原因可能是多普勒调频率估计值还存在误差, 造成了图像散焦; 另一种原因可能是该距离单元的场景本身对比度就不高(如农田、水域等情况)。现有的多普勒调频率估计方法通常要求场景对比度较高, 因而当场景对比度不高时, 多普勒调频率的估计性能也将下降<sup>[14]</sup>。

将图像对比度作为一种准最优权值, 可得运动参数向量  $\theta(t)$  的准最优加权最小二乘估计为

$$\hat{\theta}(t) = (H^T W H)^{-1} H^T W \Delta Y(t) \quad (15)$$

其中  $W = \text{diag}[C_1, C_2, \dots, C_N]$ ,  $C_n$  为对第  $n$  个距离单元图像聚焦最好时的对比度, 定义为<sup>[15]</sup>

$$C_n = \sqrt{E\{[I^2(n) - E\{I^2(n)\}]^2\}} / E\{I^2(n)\} \quad (16)$$

其中  $I(n)$  为第  $n$  个距离单元聚焦后的图像幅度,  $E(\cdot)$  表示求平均。  $C_n$  越大, 一定程度上表明调频率的估计精度越高, 因而该估计值的加权也越大。容易证明, 采用这种准最优权值时  $\theta(t)$  的估计误差的方差为

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = (H^T W H)^{-1} H^T W R_e W H (H^T W H)^{-1} \quad (17)$$

### 3.3 径向运动误差补偿

估计得到运动参数  $a(t)$  和  $b(t)$  后, 经二次积分可得补偿量  $A(t)$  和  $B(t)$ 。由式(7)关系及  $A(t)$  和  $B(t)$   $\Delta r$  在数量级上的差别可知, 对于双站 SAR 径向运动误差的补偿, 可以采取类似单站 SAR 分两步补偿的方式: 第一步是对原始数据进行一阶运动补偿, 即相对场景中心的补偿。一方面要进行距离采样调整<sup>[7]</sup>以校正包络误差, 另一方面要补偿相位  $\exp[j2\pi A(t)/\lambda]$ 。第二步是对完成距离压缩和距离徙动校正后的数据进行二阶运动补偿, 即与距离有关的残余误差的补偿。该步骤只需补偿相位  $\exp[j2\pi B(t)\Delta Y/\lambda]$ 。

### 3.4 沿航向运动补偿

补偿径向运动误差后, 可以认为收发平台已沿理想航线直线飞行, 只是前向速度还不是恒定的, 需要进

一步补偿沿航向运动误差. 单站 SAR 中, 该问题可通过实时调整 PRF 的方法来解决, 但双站 SAR 的情况比较特殊. 由于收发平台是分离的, 如果收发平台瞬时前向速度始终一致(实际中不可能), 则可以通过实时调整 PRF 的方法保证方位等间隔采样; 否则, 无论是根据发射平台还是根据接收平台的前向速度实时调整 PRF, 都只能保证一个平台的方位等间隔采样, 而另一个平台仍然存在误差, 这时目标的斜距历史与没有运动误差的情况仍是有差别的. 下面本文采取基于回波数据构造相位补偿函数的方式来校正沿航向运动误差. 由式(8)可知, 完成径向运动补偿后, 目标的瞬时多普勒调频率可表示为

$$\bar{y}_n(t) = \bar{y}_n + \Delta y_n(t) \quad (18)$$

其中

$$\bar{y}_n = - \frac{2 V_0^2 R_{B\Sigma}}{\lambda [R_{BR0} + \mu_R(R_{B\Sigma} - R_{B\Sigma 0})] [R_{BT0} + \mu_T(R_{B\Sigma} - R_{B\Sigma 0})]}$$

为理想情况下的多普勒调频率,

$\Delta y_n(t) = - \frac{V_R^2(t) - V_0^2}{\lambda [R_{BR0} + \mu_R(R_{B\Sigma} - R_{B\Sigma 0})]} - \frac{V_T^2(t) - V_0^2}{\lambda [R_{BT0} + \mu_T(R_{B\Sigma} - R_{B\Sigma 0})]}$ , 为前向速度波动造成的多普勒调频率扰动.  $\Delta y_n(t)$  与目标方位位置无关, 因而所有目标的沿航向运动误差可以统一地校正. 将点目标  $P_n$  的回波相位表示为瞬时多普勒调频率的二次积分形式, 有

$$\begin{aligned} \phi(t) &= 2\pi \int_{t_n}^t \int_{s_n}^s y_n(u) du ds \\ &= \pi \bar{y}_n (t - t_n)^2 + 2\pi \int_{t_n}^t \int_{s_n}^s \Delta y_n(u) du ds \end{aligned} \quad (19)$$

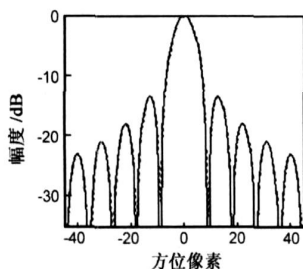
其中  $t_n$  为雷达波束中心正对点目标  $P_n$  的时刻. 式(19)中的第二项为需要补偿的相位误差项.

利用从回波数据中估计得到的  $\Delta y_n(t)$  以 0 时刻为参考点构造相位补偿函数, 得

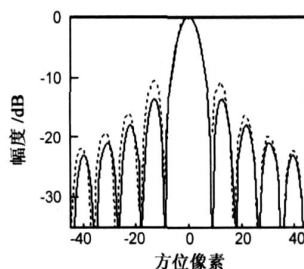
$$\phi_{\text{cmp}}(t) = 2\pi \int_0^t \int_0^s \Delta y_n(u) du ds \quad (20)$$

用式(20)补偿式(19)得

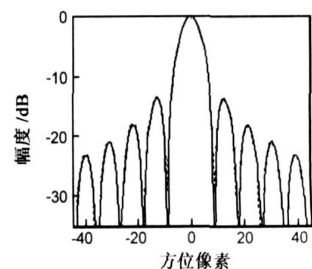
$$\phi(t) - \phi_{\text{cmp}}(t) = \pi \bar{y}_n (t - t_n - \tau_0)^2 + \phi_0 \quad (21)$$



(a) 场景中心点一阶运动补偿结果



(b) 近距点一阶运动补偿结果



(c) 近距点二阶运动补偿结果

图 4 近距点和场景中心点径向运动补偿结果

$$\text{其中 } \tau_0 = \frac{1}{\bar{y}_n} \int_0^{t_n} \Delta y_n(u) du,$$

$$\phi_0 = -2\pi \bar{y}_n t_n \tau_0 - \pi \bar{y}_n \tau_0^2 - 2\pi \int_0^{t_n} \int_{s_n}^s \Delta y_n(u) du ds.$$

可见载机运动不稳造成的相位扰动已经得到补偿, 常数相位  $\phi_0$  不影响方位压缩, 目标位置偏移  $\tau_0$  造成的形变可由图像后处理的几何校正来完成.

整个机载双站 SAR 三维运动误差的估计和补偿流程如图 3 所示, 其中距离压缩和距离徙动校正可采用双站 SAR 的 R-D 算法<sup>[4]</sup>或者 CS 算法<sup>[5]</sup>来完成. 可见, 整个运动补偿过程可与双站 SAR 成像算法有效结合, 增加的运算量很小.

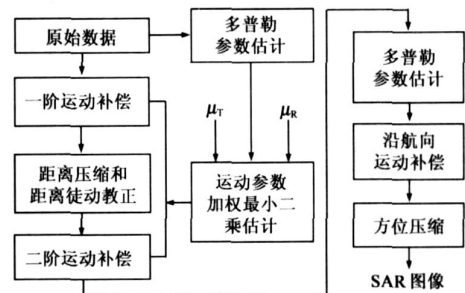


图 3 机载双站 SAR 三维运动误差的估计和补偿流程

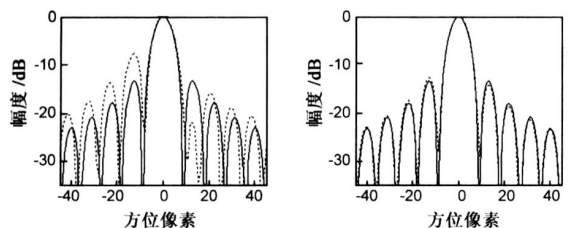
## 4 仿真及实测数据处理

### 4.1 径向运动补偿实验

仿真参数为:  $H_T = 7\text{km}$ ,  $H_R = 6\text{km}$ ,  $R_{BT0} = 25\text{km}$ ,  $B_y = 5\text{km}$ , 波长  $0.03\text{m}$ , 信号带宽  $150\text{MHz}$ , 条带宽度  $8\text{km}$ , 收发载机沿航向速度为  $110\text{m/s}$ , 在收发系统的 Y, Z 方向加入正弦波动的位置误差(收发系统不同), 仿真中设置了两个点目标. 图 4(a) 中的实线为场景中心点在没有运动误差时的成像结果(方位未加权), 虚线为存在运动误差时, 经过一阶运动补偿的结果, 可以看出成像效果较好; 图 4(b)(c) 中的实线为近距点在没有运动误差时的成像结果, 图 4(b) 中的虚线为存在运动误差时经过一阶运动补偿的结果, 可以看出成像效果并不理想, 表明近距点的径向运动误差还没有得到完全补偿; 进行二阶运动补偿, 校正剩余的径向运动误差后, 其结果如图 4(c) 中的虚线所示, 成像质量有了较大改善.

## 4.2 沿航向运动补偿实验

仿真参数与上节相同, 仿真中设置了一个点目标, 图 5(a) 和图 5(b) 中的实线是没有运动误差时的成像结果. 在收发系统的沿航向加入正弦起伏的速度误差, 图 5(a) 中的虚线是未进行运动补偿的结果, 由于存在着较大的运动误差, 方位压缩时信号失配, 目标散焦严重. 利用多普勒调频率构造相位函数补偿收发平台的速度波动后, 成像结果如图 5(b) 中的虚线所示, 可见成像质量有了较大改善.



(a) 未进行沿航向运动补偿的结果 (b) 进行沿航向运动补偿的结果

图 5 目标沿航向运动补偿结果

## 4.3 运动参数估计及补偿实验

由于目前还没有机载双站 SAR 的实测数据, 这里利用单站 SAR 的实测数据进行实验. 一方面单站 SAR 可看作双站 SAR 的特殊情况, 另一方面本文的运动参数估计是基于回波数据的多普勒调频率, 而单站 SAR 的多普勒调频率估计与双站 SAR 是一致的, 因而采用单站 SAR 实测数据也能验证该方法的合理性. 该数据为运 12 平台录取的一段正侧视数据, X 波段, 带宽 250MHz, PRF 为 1000Hz, 场景中心斜距 16km, 载机的惯导能提供较为准确的前向速度, 图 6 中的实线是惯导记录的雷达径向加速度值(经中值滤波), 虚线是从回波数据估计的雷达径向加速度值, 可以看出二者的趋势基本一致, 但仍存在差别, 部分时间段的差别超过了  $0.05\text{m/s}^2$ .

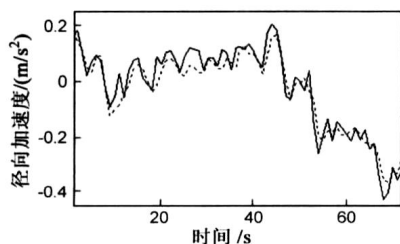


图 6 径向加速度估计(相对场景中心)

为了比较运动参数的精度, 采用一样的运动补偿和成像流程(见第 3 节), 第一次实验采用惯导测量的参数进行运动补偿, 成像结果如图 7(a) 所示, 可以看出目标散焦严重, 表明惯导的测量精度不高; 第二次实验采用从回波数据估计的参数进行运动补偿, 成像结果如图 7(b) 所示, 聚焦状况有了较大改善.

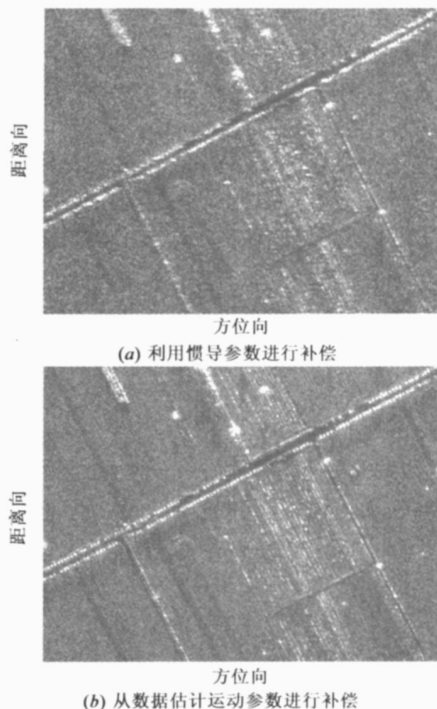


图 7 基于惯导和基于回波数据进行运动补偿的效果对比

## 5 结论

本文通过对机载双站 SAR 运动误差几何模型的分析, 推导出了径向运动误差随距离变化的解析式, 提出了一种有效的收发平台三维运动误差的估计和补偿方法. 该方法直接从回波数据中估计运动参数, 可有效降低双站 SAR 系统对惯导的要求. 利用估计的运动参数, 通过一阶和二阶运动补偿可校正收发平台的径向运动误差. 利用多普勒调频率构造相位函数, 可补偿收发平台的沿航向运动误差. 理论分析、仿真和实测数据实验表明, 该方法可有效校正双站 SAR 系统的三维运动误差. 本文的运动补偿方法主要适用于正侧视(斜视角度很小时仍可使用)工作模式下的双站 SAR, 对其它工作模式下双站 SAR 的运动补偿方法还有待进一步研究.

### 附录 目标到收发系统最近距离的近似表达式

图 2 中  $d$  为收发系统基线,  $M$  为基线中点,  $M$  点到场景中心  $O$  点和目标  $P_n$  的距离分别为  $R_{B0}$  和  $R_B$ , 基线与直线  $MO$  的夹角为  $\varphi_0$ , 基线与直线  $MP_n$  的夹角为  $\varphi$ , 直线  $MO$  与地面的夹角为  $\theta_0$ , 收发系统到  $O$  点的最近距离分别为  $R_{BR0}$  和  $R_{B70}$ . 假设收发系统到目标  $P_n$  的最近距离差的一半  $R_{B\Delta} = (R_{B7} - R_{BR})/2$ , 当  $R_{B\Delta} \gg d$ , 且雷达距离向波束为窄波束时, 有<sup>[13]</sup>

$$R_B \approx R_{B\Delta} - d^2 \sin^2 \varphi_0 / (8R_{B\Delta}) \quad (A1)$$

另外, 由余弦定理易得

$$2R_{B\Sigma}R_{B\Delta} = R_B d \cos \varphi \quad (A2)$$

将式(A2)代入式(A1),并考虑到测绘带宽度一般远小于斜距,有

$$R_{B\Delta} \approx (d \cos \varphi) / 2 - d^2 \sin^2 \varphi_0 \cos \varphi / (16R_{B\Sigma}^2) \quad (A3)$$

其中用到了  $1/R_{B\Sigma}^2 \approx 1/R_{B\Sigma0}^2 - 2\Delta r/R_{B\Sigma0}^3$  的近似. 假设  $R_{B\Sigma} = R_{B\Sigma0} + \Delta r$ , 将该关系式代入式(A1)有

$$R_B = R_{B0} + [1 + d^2 \sin^2 \varphi_0 / (8R_{B\Sigma0}^2)] \Delta r \quad (A4)$$

其中用到了  $1/R_{B\Sigma} \approx 1/R_{B\Sigma0} - \Delta r/R_{B\Sigma0}^2$  的近似, 并有  $R_{B0} = R_{B\Sigma0} - d^2 \sin^2 \varphi_0 / (8R_{B\Sigma0}^2)$ .

由式(A3)知  $R_{B\Delta}$  只是  $\varphi$  的函数, 表示为  $R_{B\Delta}(\varphi)$ . 以一组具体的参数为例, 假设条带宽度为 8km,

$R_{B\Sigma0} = 30\text{km}$ ,  $H_T = 7\text{km}$ ,

$d = 5.22\text{km}$ , 图 A1 画出了

$R_{B\Delta}$  随  $\varphi$  的变化曲线, 可见

$R_{B\Delta}$  与  $\varphi$  呈近似线性关系. 将  $R_{B\Delta}$  在  $\varphi = \varphi_0$  处展开, 得其近似表达式为

$$R_{B\Delta}(\varphi) \approx R_{B\Delta}(\varphi_0) + \left. \frac{dR_{B\Delta}(\varphi)}{d\varphi} \right|_{\varphi=\varphi_0} \Delta\varphi \quad (A5)$$

其中  $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$ , 由式(A4)及图 2 的几何关系有

$$\sin \Delta\varphi \approx \Delta\varphi \approx \left[ 1 + \frac{d^2 \sin^2 \varphi_0}{8R_{B\Sigma0}^2} \right] \frac{\Delta r \tan \theta_0}{R_{B0}^2} \quad (A6)$$

则

$$R_{B\Delta}(\varphi) = R_{B\Delta0} + \left[ -\frac{d}{2} \sin \varphi_0 + \frac{d^3 \sin^3 \varphi_0}{16R_{B\Sigma0}^2} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{d^2 \sin^2 \varphi_0}{8R_{B\Sigma0}^2} \right] \frac{\Delta r \tan \theta_0}{R_{B0}} \quad (A7)$$

其中  $R_{B\Delta0} = R_{B\Delta}(\varphi_0)$ . 由式(A7)及  $R_{B\Sigma} = R_{B\Sigma0} + \Delta r$  得

$$R_{BT} = R_{BT0} + \mu_T \Delta r, \quad R_{BR} = R_{BR0} + \mu_R \Delta r \quad (A8)$$

其中

$$\mu_T = 1 + \left[ -\frac{d}{2} \sin \varphi_0 + \frac{d^3 \sin^3 \varphi_0}{16R_{B\Sigma0}^2} \right] \left[ 1 + \frac{d^2 \sin^2 \varphi_0}{8R_{B\Sigma0}^2} \right] \frac{\tan \theta_0}{R_{B0}},$$

$$\mu_R = 1 - \left[ -\frac{d}{2} \sin \varphi_0 + \frac{d^3 \sin^3 \varphi_0}{16R_{B\Sigma0}^2} \right] \left[ 1 + \frac{d^2 \sin^2 \varphi_0}{8R_{B\Sigma0}^2} \right] \frac{\tan \theta_0}{R_{B0}},$$

$\mu_T$  和  $\mu_R$  为常数, 可由雷达系统参数计算得到, 并有  $\mu_T + \mu_R = 2$ . 当  $d = 0$  时  $\mu_T = \mu_R = 1$ , 与单基的情况相符.

式(A5)的近似误差主要为二次项(高次项很小)

$$\varepsilon = \left| \frac{1}{2} R_{B\Delta}''(\varphi_0) \Delta\varphi^2 \right| \approx \frac{d \cos \varphi_0 \tan^2 \theta_0 \Delta r^2}{4R_{B0}^2} \quad (A9)$$

可见条带宽度越窄, 误差越小; 目标到收发系统基线中点的距离越远, 误差越小. 若  $d = 5\text{km}$ ,  $R_{B0} = 30\text{km}$ ,  $\varphi_0 = 0$ , 条带宽度 5km, 可知  $\varepsilon$  的最大值一般小于 1m. 上述参数较为严格, 实际中一般误差小得多. 容易证明,  $R_{BR}$  和  $R_{BT}$  的近似误差对成像和运动补偿的影响都可忽略.

## 参考文献:

- [1] Ender J, Walterscheid I, Brenner A. Bistatic SAR translational invariant processing and experimental results[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig., 2006, 153(3): 177-183.
- [2] 何峰, 梁甸农, 董臻. 适于大斜视角的星载双基地 SAR 波数域成像算法[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1011-1014.  
HE Feng, LIANG Dianong, DONG Zhen. A wavenumber domain algorithm for spaceborne bistatic SAR imaging with large squint angle[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1011-1014. (in Chinese)
- [3] 闫鸿慧, 王岩飞, 于海锋, 等. 一种基于距离补偿的分布式小卫星双基 SAR 成像方法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(5): 771-774.  
YAN Honghui, WANG Yanfei, YU Haifeng, et al. An imaging method of distributed small satellites bistatic SAR based on range distance compensation[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2005, 33(6): 1011-1014. (in Chinese)
- [4] 汤子跃, 张守融. 双站合成孔径雷达系统原理[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 20-50.
- [5] 朱振波, 汤子跃, 蒋兴舟. 机载双站合成孔径雷达 Chirp Scaling 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(6): 977-981.  
ZHU Zhenbo, TANG Ziyue, JIANG Xingzhou. The chirp scaling algorithm of airborne bistatic SAR imaging[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2006, 28(6): 977-981. (in Chinese)
- [6] Blacknell D, Freeman A, Quegan S, et al. Geometric accuracy in airborne SAR images[J]. IEEE Trans Aerosp and Electro Syst, 1989, 25(2): 241-258.
- [7] Fomaro G. Trajectory deviations in airborne SAR: Analysis and compensation[J]. IEEE Trans Aerosp and Electro Syst, 1999, 35(3): 997-1009.
- [8] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 185-227.
- [9] 黄源宝, 保铮, 周峰. 一种新的机载条带式 SAR 沿航向运动补偿方法[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 459-462.  
HUANG Yuanbao, BAO Zheng, ZHOU Feng. A novel method for along track motion compensation of the airborne stripmap SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 459-462. (in Chinese)
- [10] 汤子跃, 张守融, 王卫延. 运动误差对双站 SAR 相位同步及成像的影响[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1907-1910.  
TANG Ziyue, ZHANG Shourong, WANG Weiyen. The influence of motion error on the phase synchronization and imaging of bistatic SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1907-1910. (in Chinese)
- [11] Rigling B D, Moses R L. Motion measurement errors and aut

ofocus in bistatic SAR[J]. IEEE Trans on IP, 2006, 15(4): 1008–1016.

- [12] G Yates, A M Home, A P Blake, et al. Bistatic SAR image formation[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig., 2006, 153(3): 208–213.
- [13] Pettersson M L. Extraction of moving ground targets by a bistatic ultra wideband SAR[J]. IEE Proc Radar Sonar Nav-

ig, 2001, 148(1): 35–40.

- [14] Jia Xu, Yingning Peng, Xiang Gen Xia. Parametric autofocus of SAR imaging inherent accuracy limitations and realization[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2004, 42(11): 2397–2411.
- [15] Berizzi F, Corsini G. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization[J]. IEEE Trans Aeros and Electro Syst, 1996, 32(3): 1185–1191.

#### 作者简介:



李燕平 男, 1981 年生于四川乐山, 现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室博士研究生. 主要研究方向为雷达成像及运动目标检测. E-mail: maplelyp@163.com



张振华 男, 1977 年生于内蒙古呼和浩特市, 现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室硕博连读生, 研究方向为单/双基雷达成像和干涉测量. E-mail: useusezzh@163.com

邢孟道 男, 1975 年 11 月生于浙江嵊州, 西安电子科技大学教授, 博士生导师. 主要研究方向为雷达成像、目标识别和天波超视距雷达信号处理. E-mail: xmd@mail.xidian.edu.cn

保铮 男, 1927 年 12 月生于江苏南通, 西安电子科技大学教授、博士生导师、中国科学院院士、中国电子学会会士. 主要研究方向为雷达信号处理.