

# 一种小型机载低频 UWB SAR 的 三级运动补偿方法

安道祥, 黄晓涛, 周智敏

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 本文建立了小型机载 UWB SAR 运动误差模型, 分析了低频 UWB SAR 与高频窄带 SAR 间的运动误差不同点, 找出了传统运动补偿方法失效的原因. 为此, 本文提出一种三级运动补偿方法. 该方法的具体措施为: 第一级, 采用基于低精度传感器的运动补偿, 消除回波包络误差和部分相位误差, 提高回波数据距离弯曲校正精度; 第二级, 采用基于多普勒调频率估计的补偿方法, 消除回波中的二次相位误差; 第三级, 基于图像域数据, 采用自聚焦算法消除高阶相位误差, 最终获得聚焦 UWB SAR 图像. 实测数据成像结果证明了该运动补偿方法的有效性.

**关键词:** 超宽带; 合成孔径雷达; 运动补偿

**中图分类号:** TN957.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2011) 12-2776-08

## A Three-Stage Motion Compensation Method for Small Size Airborne Low Frequency UWB SAR

AN Dao-xiang, HUANG Xiao-tao, ZHOU Zhi-min

(School of Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** This paper derives the motion errors model of small size airborne low frequency ultra-wideband synthetic aperture radar (UWB SAR), and analyze the difference of the motion errors between the low frequency UWB SAR and the high frequency narrow band SAR as well as the reason of the traditional motion compensation (MoCo) method failure. To resolve this problem, a three-stage MoCo method is proposed. The procedure of the proposed MoCo method is as follows: At the first stage, removing the echo envelope error completely and the phase error partly by the MoCo based on the sensor data. Then, compensating the second-order phase error by the MoCo based on the Doppler chirp rate estimation at the second stage. At last, the residual high-order phase error is compensated by applying the autofocus algorithm in the image domain at the third stage, and the focused UWB SAR image is obtained. Experiment results on real data prove the validity of the proposed MoCo method.

**Key words:** ultra-wideband; synthetic aperture radar; motion compensation

### 1 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 的运动补偿方法主要有两类: 一是基于高精度传感器的运动补偿<sup>[1~3]</sup>. 该方法具有简单、高效等优点, 适于实时成像处理. 缺点是高精度传感器价格昂贵, 不易购买, 增加了 SAR 系统的研发成本. 另一是基于回波数据的运动补偿<sup>[4~7]</sup>. 该方法具有成本低、精度高的优点, 并已成功应用于高频窄带 (瞬时相对带宽约小于 1%) SAR<sup>[5]</sup> 和某些大/中型机载 (如“运-7”) 低频超宽带 (Ultra-WideBand, UWB) (瞬时相对带宽大于 25%) SAR 系统<sup>[4~8]</sup> 中. 其缺

点是算法复杂, 运算量大, 不利于实时处理. 本文所要处理的小型机载 (“运-12”) UWB SAR 数据具有两个特点: (1) 与高频窄带 SAR 相比, 低频 UWB SAR 波束角宽、合成孔径长, 运动误差更加复杂<sup>[4~8]</sup>. (2) 与大/中型运输机相比, 小型运输机机体小, 飞行高度低, 飞行速度慢, 受气流干扰大, 载机的运动平稳性不能控制到 SAR 成像所要求的状态. 实际中, 小型机载 UWB SAR 运动误差具有幅度大、频率高的特点, 属于大幅度高频运动误差<sup>[6]</sup> 情况, 极大地增加了实施精确运动补偿的难度.

本文首先建立了机载 UWB SAR 运动误差模型, 分析低频 UWB SAR 与高频窄带 SAR 间运动误差的差别,

并提出一种三级运动补偿方法.在该方法中,首先采用基于低精度传感器的粗补偿(第一级),消除回波包络误差和部分相位误差,减小运动误差对回波距离弯曲校正(Range Cell Migration Correction, RCMC)处理的影响,提高 RCMC 精度.其次,采用基于多普勒调频率估计的精补偿(第二级),消除对图像聚焦质量影响最大的二次相位误差.最后,采用基于 SAR 图像域的自聚焦算法(第三级),补偿残余高阶相位误差,得到聚焦 UWB SAR 图像.该方法的优点是成本低,精度高,实用性强.

## 2 UWB SAR 回波信号模型及运动误差建模

机载 SAR 平台的运动误差主要包括三方面<sup>[5]</sup>:转动误差,平动误差和航向速度误差.由于 UWB SAR 波束角较宽,对转动误差不敏感.此外,在数据录取过程中,可通过实时调整波束指向来削弱转动误差影响.因此,本文假设载机转动误差已被精确,仅考虑平动误差与航向速度的补偿问题.

图 1 是 UWB SAR 成像几何关系.其中  $X$  轴为理想航迹,曲线为实际航迹.  $[\bar{v}t_a + \Delta X(t_a), \Delta Y(t_a), \Delta Z(t_a)]$  表示雷达天线相位中心(Antenna Phase Center, APC)实际位置,  $t_a$  为方位慢时间,  $\bar{v}$  为载机理想速度,  $\Delta X(t_a)$ 、 $\Delta Y(t_a)$  和  $\Delta Z(t_a)$  分别为雷达平台在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向上的运动误差分量.  $\theta$  为目标  $P(X_n, Y_n, Z_n)$  处的俯仰角.

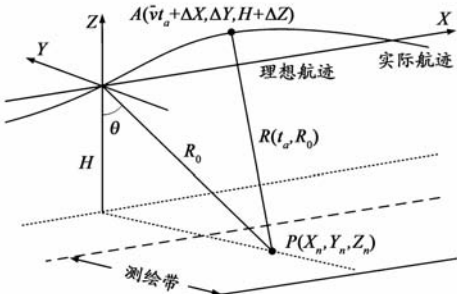


图1 机载SAR成像几何关系图

设发射信号为线性调频信号,则雷达接收到点目标  $P$  的回波基带信号为(忽略幅度信息)

$$s(\tau, t_a) = \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R(t_a)\right] \cdot \exp\left\{j\pi\kappa\left[\tau - \frac{2}{c}R(t_a)\right]\right\} \quad (1)$$

其中  $\kappa$  为信号调频率,  $R(t_a)$  为雷达 APC 与目标  $P$  之间的瞬时斜距距离,由图 1 可求得其表达式

$$R(t_a) = \sqrt{(\bar{v}t_a + \Delta X(t_a) - X_n)^2 + (\Delta Y(t_a) - Y_n)^2 + (\Delta Z(t_a) - Z_n)^2} \quad (2)$$

对式(2)作泰勒展开,并忽略二次以上高阶项,得

$$R(t_a; R_0) \approx \sqrt{(\bar{v}t_a + \Delta X(t_a) - X_n)^2 + R_0^2}$$

$$- R_0 \frac{\Delta Y(t_a) \sin\theta + \Delta Z(t_a) \cos\theta}{\sqrt{(\bar{v}t_a + \Delta X(t_a) - X_n)^2 + R_0^2}} \\ = \sqrt{(\bar{v}t_a + \Delta X(t_a) - X_n)^2 + R_0^2} - \cos\beta \cdot \Delta R(t_a; R_0) \quad (3)$$

其中  $R_0 = \sqrt{Y_n^2 + Z_n^2}$  为目标  $P$  到理想航迹的垂直斜距.  $\Delta R(t_a; R_0) = \Delta Y(t_a) \sin\theta + \Delta Z(t_a) \cos\theta$  表示斜距  $R_0$  处对应的视线方向(Line Of Sight, LOS)平动误差.此外

$$\cos\beta = \frac{R_0}{\sqrt{(\bar{v}t_a + \Delta X(t_a) - X_n)^2 + R_0^2}} \approx \frac{R_0}{\sqrt{(\bar{v}t_a - X_n)^2 + R_0^2}} \quad (4)$$

表示目标  $P$  相对于雷达的瞬时斜视角.为分离载机航向速度,利用关系式  $|\bar{v}t_a + \Delta X(t_a) - X_n| < R_0$ ,对式(3)中的第一项作泰勒展开,并忽略四次以上的高阶项得

$$R(t_a; R_0) \approx R_0 + \frac{[\bar{v}t_a + \Delta X(t_a) - X_n]^2}{2R_0} - \frac{[\bar{v}t_a + \Delta X(t_a) - X_n]^4}{8R_0^3} \\ - \cos\beta \cdot \Delta R(t_a; R_0) \quad (5)$$

由式(5)可知,如能得到  $\Delta X(t_a)$ 、 $\Delta Y(t_a)$ 、 $\Delta Z(t_a)$  的精确值,则可采用实时调整脉冲重复频率补偿航向速度误差,再采用“两步运动补偿法”<sup>[1,2]</sup>消除平动误差.如果没有高精度传感器时,上述误差又该如何补偿呢?实际上,载机运动误差除会影响回波信号的 RCMC 处理精度外,还将引起多普勒调频率误差,进而产生二次相位误差,导致目标散焦.因此可通过估计由运动误差引起的多普勒调频误差,然后构造相应的二次相位误差并补偿,以消除运动误差影响.

对式(5)求二次导数,即可得到斜距  $R_0$  处的瞬时多普勒调频率  $\gamma_m(t_a; R_0)$  为

$$\gamma_m(t_a; R_0) = -\frac{2}{\lambda} \times \frac{d^2 R(t_a)}{dt_a^2} \\ = -\frac{2\bar{v}^2(t_a)}{\lambda R_0} - \frac{2a_X}{\lambda R_0}(\bar{v}t_a + \Delta X(t_a) - X_n) \\ + \frac{3v^2(t_a)}{\lambda R_0^3}(\bar{v}t_a + \Delta X(t_a) - X_n)^2 \\ + \frac{3a_X}{\lambda R_0^3}(\bar{v}t_a + \Delta X(t_a) - X_n)^3 - \frac{2}{\lambda} a_{\text{LOS}}(t_a; R_0) \\ = \left[ -\frac{2v^2(t_a)}{\lambda R_0} + \frac{2a_X}{\lambda R_0}(\bar{v}t_a + \Delta X(t_a) - X_n) \right] \\ \cdot \left[ 1 - \frac{3}{2} \left( \frac{\bar{v}t_a + \Delta X(t_a) - X_n}{R_0} \right)^2 \right] - \frac{2}{\lambda} a_{\text{LOS}}(t_a; R_0) \quad (6)$$

其中  $a_{\text{LOS}}(t_a; R_0)$  表示目标  $P$  对应的 LOS 方向加速度

$$a_{\text{LOS}}(t_a; R_0) = \frac{d^2[\Delta R(t_a; R_0)]}{dt_a^2} \\ = \cos\beta [a_Y(t_a) \cos\theta + a_Z(t_a) \cos\theta] \quad (7)$$

$a_Y(t_a)$ 、 $a_Z(t_a)$  分别表示  $Y$  方向和  $Z$  方向加速度.而载机瞬时航向速度  $v(t_a)$  可表示为

$$v(t_a) = \bar{v} + \Delta v(t_a) \quad (8)$$

其中  $\Delta v(t_a)$  为航向速度误差. 式(6)是适用于大多数 SAR 系统的多普勒调频率形式. 下面基于式(6), 分析高频窄带 SAR 与低频 UWB SAR 间的参数估计差别.

## 2.1 高频窄带 SAR 情况

高频窄带 SAR 情况下, 有下述近似条件成立<sup>[5]</sup>:

**条件 1**  $\cos\beta \approx 1$ . 载高频窄带 SAR 中, 合成孔径较短, 近似条件  $|\bar{v}t_a + \Delta X(t_a) - X_n| \approx |\bar{v}t_a - X_n| \ll R_0$  能得到较好满足, 则由式(4)可推出  $\cos\beta \approx 1$  成立.

**条件 2** 忽略  $a_{\max}$  的影响. 在高频窄带 SAR 中, 合成孔径长度  $L_a$  通常满足下述关系式<sup>[5]</sup>:

$$L_a \leq \left( \frac{3\lambda R_0 \bar{v}^2}{a_{\max}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

其中  $a_{\max}$  为一个合成孔径内的航向加速度最大值. 当式(9)成立时, 即可忽略加速度  $a_x$  的影响<sup>[5]</sup>.

当上述近似条件均成立时, 式(6)可写成

$$\gamma_m(t_a; R_0) = -\frac{2v^2(t_a)}{\lambda R_0} - \frac{2}{\lambda} [a_Y(t_a)\cos\theta + a_Z(t_a)\cos\theta] \quad (10)$$

基于式(10), 即可采用多普勒调频率估计、线性拟合和低通滤波等处理<sup>[5]</sup>, 求出运动参数  $v(t_a)$ 、 $a_Y(t_a)$ 、 $a_Z(t_a)$ , 进而实施三维运动补偿<sup>[5]</sup>.

## 2.2 低频 UWB SAR 情况

基于 2.1 节, 本小节将讨论上述两个近似条件在低频 UWB SAR 中的满足情况.

**条件 1**  $\cos\beta \approx 1$ . 与高频窄带 SAR 不同, 低频 UWB SAR 的合成孔径很长, 通常与场景斜距距离处于同一数量级或仅差一个数量级, 此时近似条件  $|\bar{v}t_a + \Delta X(t_a) - X_n| \approx |\bar{v}t_a - X_n| \ll R_0$  不再满足,  $\cos\beta \approx 1$  的近似不成立. 由于  $\cos\beta \neq 1$ , 导致平动误差具有较强的方位空变性, 从而影响基于回波数据的运动参数估计和运动补偿处理<sup>[3]</sup>.

**条件 2** 忽略  $a_{\max}$  的影响. 由 2.1 节可知, 忽略航向加速度  $a_{\max}$  影响的前提条件是不等式(9)成立. 然而, 与高频窄带 SAR 不同, 但在低频 UWB SAR 中, 式(9)不一定成立. 下面通过仿真实验来说明这个问题. 设方位分辨率  $\rho_a = 1.0\text{m}$ , 斜距  $R_0 = 10\text{km}$ , 载机飞行速度  $\bar{v} = 70\text{m/s}$ . 针对高频窄带 SAR(X 波段)与低频 UWB SAR(P 波段)两种情况, 图 2 画出了航向加速  $a_{\max} = 0.01\text{m/s}^2$ 、 $0.1\text{m/s}^2$  和  $1.0\text{m/s}^2$  时,  $\rho_a$  对应的合成孔径长度  $L_a$  与  $a_{\max}$  对应的合成孔径长度(由式(9)算得)间的关系图. 由图 2 可发现, 在高频窄带 SAR 中, 当  $a_{\max} = 1.0\text{m/s}^2$  时, 式(9)依然成立; 但在低频 UWB SAR 中, 即使在  $a_{\max} = 0.01\text{m/s}^2$  的情况下, 式(9)仍然不成立. 因此在低频 UWB SAR 中, 不能忽略航向加速度  $a_{\max}$  对多普勒调频

率估计的影响.

由 2.1 节、2.2 节分析可知, 一些在高频窄带 SAR 中成立的近似条件, 在低频 UWB SAR 中不再满足, 从而使得 2.1 节中所述参数分离方法<sup>[5]</sup>在低频 UWB SAR 中不再适用. 我们曾将这种参数分离方法应用于 UWB SAR 实测数据处理, 并利用求得的参数进行三维运动补偿. 然而, 由于所分离参数精度很差, 不能得到令人满意的补偿效果. 因此, 有必要研究适用于小型机载 UWB SAR 实测数据成像处理的运动补偿方法.

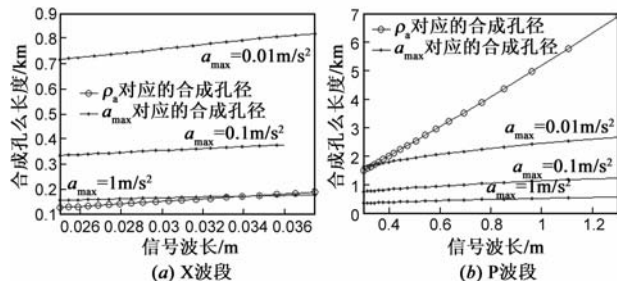


图2 航向加速度可忽略条件仿真

## 3 UWB SAR 的三级运动补偿方法

本文所提三级运动补偿方法包括基于传感器的粗补偿(第一级), 基于多普勒调频估计的二次相位误差补偿(第二级)和基于自聚焦算法的高阶相位误差补偿(第三级). 其中第二级和第三级为精补偿. 通过第一级粗补偿消除回波包络误差和部分相位误差, 提高回波 RCMC 精度, 然后利用第二、三级的精补偿, 彻底消除回波中残余相位误差.

### 3.1 第一级: 基于传感器的粗补偿

基于传感器的粗补偿包括包络误差补偿和相位误差补偿两部分. 由于 SAR 成像处理对包络误差的补偿精度要求较低, 因此可认为包络误差补偿是精确的. 包络误差补偿因子为

$$E(t_a, f_r) = \exp\left[ j2\pi f_r \frac{2\Delta R(t_a; R_c)}{c} \right] \quad (11)$$

其中  $f_r$  为距离频率,  $c$  为光速,  $R_c$  场景中心斜距. 包络误差补偿后, 还需进行相位误差补偿.

与高频窄带 SAR 不同, 小型机载 UWB SAR 运动误差有两个特点: 一是运动误差以高频误差为主; 二是运动误差存在沿方位向的空变性. 其中高频运动误差是由于小型机载 UWB SAR 同时具有雷达工作平台小, 运行不平稳和大波束角, 长合成孔径的特点. 这就使得一个合成孔径内雷达平台波动幅度更大, 波动周期更多, 误差频率更高. 而由于 UWB SAR 具有大波束角, 位于同一波束内不同方位位置目标对应的视线误差不同(见 2.2 节), 从而导致运动误差产生方位空变. 小型机载 UWB SAR 运动误差的上述两个特点会降低常规运动补

偿方法的补偿效果.

为解决上述问题,在相位误差粗补偿中采取了以下改进措施:

(1)在本文的粗补偿中,将“二阶补偿”的实施位置由 RCMC 后<sup>[1,2]</sup>提前到距离压缩后、RCMC 前的回波域内进行.改进补偿法在保持对中/低频误差良好补偿性能的同时,提高对高频运动误差的补偿效果.限于文章篇幅,这里省略详细的理论推导,但通过仿真实验证明该方法有效性.设载频  $f_c = 500\text{MHz}$ ,带宽  $B = 150\text{MHz}$ ,采样率  $f_s = 200\text{MHz}$ ,PRF = 100Hz,速度  $v = 50\text{ m/s}$ ,方位分辨率  $\rho_a = 1.0\text{m}$ ,中心斜距  $R_c = 1.0\text{km}$ .在  $200\text{m} \times 200\text{m}$  的成像区域放置九个目标,两维间隔均为 70m.实验中,分别加入低/中/高频运动误差:低频: $\Delta r_y(t_a) = 5\sin(2\pi t_a \cdot 0.3/T_a)$ , $\Delta r_z(t_a) = 5\sin(2\pi t_a \cdot 0.5/T_a)$ ;中频: $\Delta r_y(t_a) = 5\sin(2\pi t_a \cdot 0.8/T_a)$ , $\Delta r_z(t_a) = 5\sin(2\pi t_a \cdot 1.0/T_a)$ ;高频: $\Delta r_y(t_a) = 5\sin(2\pi t_a \cdot 1.2/T_a)$ , $\Delta r_z(t_a) = 5\sin(2\pi t_a \cdot 2.1/T_a)$ .其中  $T_a$  表示全孔径时间.图 3 给出加入误差后的目标散焦情况和采用不同补偿方法后得到的成像结果.

由图 3 可发现,当加入低频误差时,传统方法与改

进方法的补偿效果相当.随着运动误差频率的提高,目标散焦情况愈加严重,两种方法补偿效果的差别逐渐显现.当运动误差为高频时,改进方法的补偿效果则明显好于传统方法.此外,由上述分析可知,本文所提改进方法适于结合距离压缩和 RCMC 处理相分离的成像算法,如 Omega-K 类算法<sup>[2,9]</sup>.

(2)方位子块补偿法.为减小空变性影响,可采用回波数据子块补偿法<sup>[3]</sup>.实施步骤为:首先,将时域回波数据沿方位向分成若干个子块.由于子块脉冲数较少,可认为子块内目标相对雷达视角和载机运动误差恒定不变.此外,方位频率与斜视角间存在关系  $f_a = 2v\sin\beta/\lambda$ ,因此若将子块回波变换到方位频域,则不同方位频率对应于不同的斜视角,利用这种视频对应关系即可进行与斜视角相关的方位空变相位误差(式(7))补偿.对子块回波作方位 FFT,则第  $i$  个子块回波对应的相位补偿因子为

$$C_i(f_a; R_0) = \exp\left[j \frac{4\pi\cos\beta_i}{\lambda} \Delta R(t_{\text{mid}}^i; R_0)\right], \quad 0 \leq i \leq I-1 \quad (12)$$

其中  $t_{\text{mid}}^i$  为第  $i$  个子块的方位中心时刻,  $I$  为划分的子

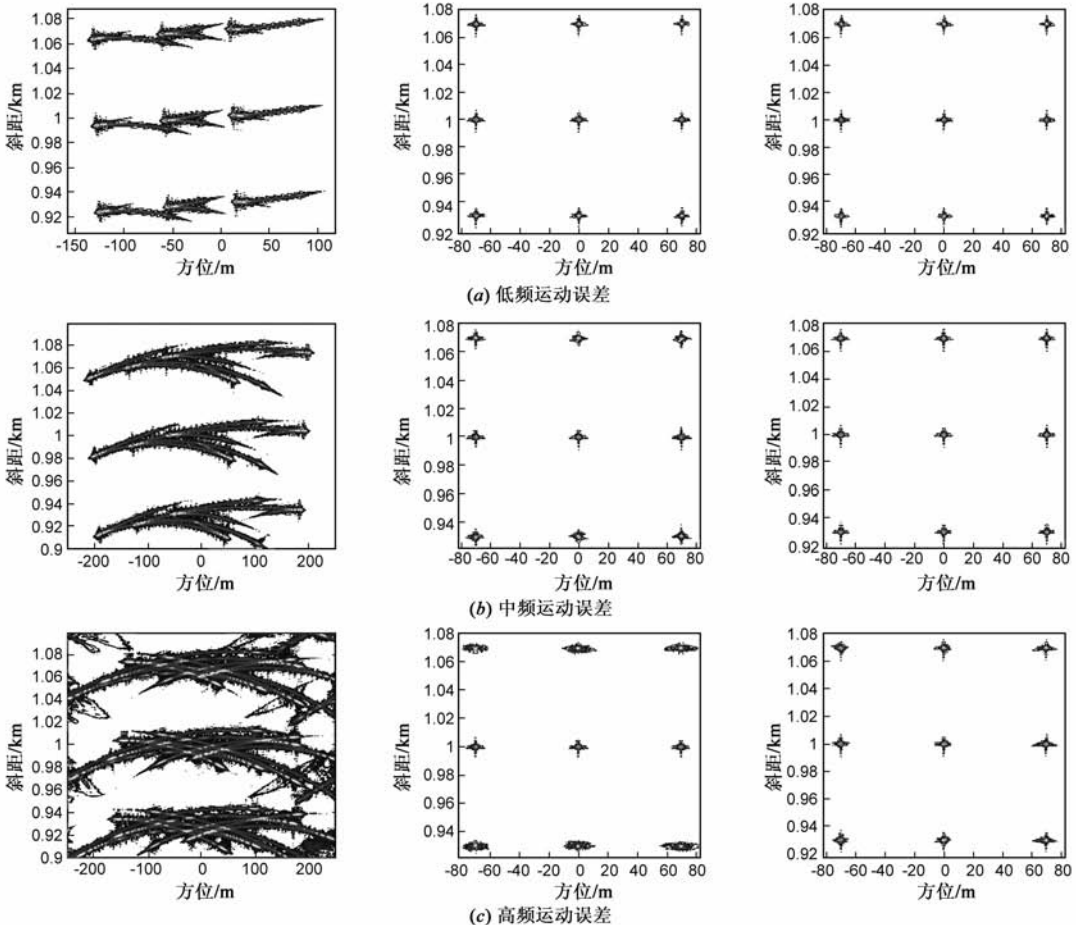


图3 运动补偿效果仿真.左列:未补偿补偿,中列:原始补偿方法;右列:改进方法

块总数.  $\cos\beta_i = \sqrt{1 - (\lambda f_a / 2v)^2}$  表示第  $i$  个子块回波对应的斜视角,  $f_a$  表示方位频率. 相位误差补偿后, 对子块回波作方位 IFFT 变回到方位时域. 最后, 将所有补偿后的子块回波合并, 即得到粗补偿回波. 在进行回波子块划分时, 单个子块的脉冲数不能太大, 以保证子块回波对应运动误差恒定不变的条件能够满足. 此外, 为提高运算效率, 子块回波长度通常选择成 2 的幂次, 例如 32 点或 64 点.

### 3.2 第二级: 基于多普勒调频率估计的二次误差补偿

多普勒参数估计通常是在 RCMC 后的时域回波内进行的. 在进行参数估计前, 应先将回波信号沿方位向划分成若干个子孔径. 在子孔径回波对应的短时间内, 可认为载机运动状态恒定不变, 然后即可估计每个子孔径回波对应的多普勒参数. 常用的多普勒调频率估计方法有图像漂移法<sup>[5]</sup>和对比度最优法<sup>[6]</sup>, 两种方法都具有较好的性能. 此外, 为提高参数估计精度, 可采用子孔径重叠的划分方式. 在子孔径内进行多普勒参数估计具有以下优点: 首先, 子孔径回波的有效多普勒带宽远小于全孔径回波多普勒带宽. 参数估计前, 可先通过方位低通滤波抑制子孔径回波的带外杂波, 消除杂波对参数估计的影响; 其次, 子孔径回波方位积累角与等效合成孔径长度均小于全孔径回波, 这样本文第 2.2 节提到的近似条件 1 就能得到满足. 由于在粗补偿中, 已考虑了平动误差的方位空变性, 因此可认为近似条件  $\cos\beta \approx 1$  在子孔径回波中成立.

设第  $m$  个距离单元(对应于斜距  $R_0$ )、第  $n$  个子孔径回波(即目标  $P$  所在的区域)对应的多普勒调频率为  $\gamma_{mn}(t'_a; R_0)$ , 则有

$$\gamma_{mn}(t'_a; R_0) = -\frac{2v^2(t'_a)}{\lambda R_0} + \frac{2a_X(t'_a)}{\lambda R_0}(\bar{v}t'_a + \Delta X(t'_a) - X_n) - \frac{2}{\lambda}(a_Y(t'_a)\sin\theta + a_Z(t'_a)\cos\theta) \quad (13)$$

其中  $t'_a \in [-T_s/2, T_s/2]$  为子孔径回波对应的方位慢时间,  $T_s$  为子孔径时间. 利用关系式  $H \ll R_0$ ,  $\frac{1}{R_0} \approx \frac{2}{R_c} - \frac{R_0}{R_c^2}$ , 对式(13)进行整理, 得

$$\begin{aligned} \gamma_{mn}(t'_a; R_0)R_0 &= \left[ -\frac{2v^2(t'_a)}{\lambda} + \frac{2a_X(t'_a)}{\lambda}(\bar{v}t'_a + \Delta X(t'_a) - X_n) \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{\lambda}a_Z(t'_a)H + \frac{2}{\lambda}a_Y(t'_a)\frac{H^2}{R_c} \right] \\ &\quad + \left[ -\frac{2}{\lambda}a_Y(t'_a) - \frac{2}{\lambda}a_X(t'_a)\frac{H^2}{2R_c^2} \right]R_0 \\ &= A(t'_a) + B(t'_a)R_0 \end{aligned} \quad (14)$$

其中  $A(t'_a)$  为常数项,  $B(t'_a)$  为一次项系数. 由式(14)可

发现,  $\gamma_{mn}(t'_a; R_0)R_0$  与  $R_0$  成线性关系, 因此可采用线性拟合的方法求取每条距离单元对应的多普勒调频率值, 并求解出侧向加速度  $a_Y(t'_a)$ . 然而, 与文献[5]中的多普勒调频率式相比, 式(14)中的常数项  $A(t'_a)$  中多了一个航向加速度  $a_X(t'_a)$  的相关项, 这导致不能够再再利用低通滤波的方法分离参数  $v(t'_a)$  与  $a_Z(t'_a)$ . 由于粗补偿已经消除了部分运动误差, 因此这里我们不再采用参数分离的方法. 而是通过精确估计多普勒调频率误差来补偿二次相位误差. 实测数据成像结果表明这种方式获得的补偿效果更好.

下面通过仿真实验证明线性拟合法求取每条距离单元对应多普勒调频率值的有效性, 并将其与文献[4]所提多距离单元平均方法进行比较. 设信号波长  $\lambda = 0.6\text{m}$ , 载机飞行高度  $H = 3\text{km}$ , 航向速度  $\bar{v} = 70\text{m/s}$ . 子孔径回波内, 载机侧向与法向加速度分别为  $a_Y = a_Z = 0.25\text{m/s}^2$ , 航向加速度  $a_X = 0.05\text{m/s}^2$ , 航向加速的加权系数  $\bar{v}t'_a + \Delta X(t'_a) - X_n = 2\text{m}$ . 图 4(a) 给出每个距离单元的真实多普勒调频率, 及采用线性拟合法和多距离单元平均方法<sup>[4]</sup>获得的多普勒调频率值.

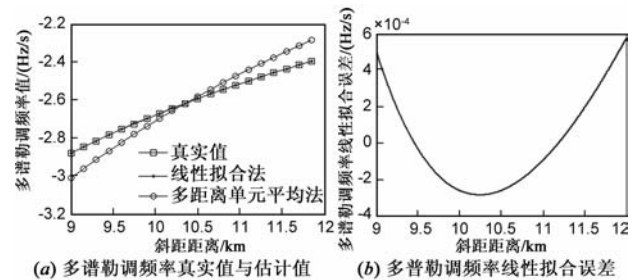


图4 多普勒调频率估计方法仿真

由图 4(a) 可发现, 线性拟合法的精度要远好于多距离单元平均法. 其实, 由式(14)可知:  $a_Y$  值越大, 一次项系数  $B(t'_a)$  越大, 即  $\gamma_{mn}(t'_a; R_0)R_0$  斜率越大, 则多距离单元平均法精度越低. 此外, 图 4(b) 给出了不同斜距处多普勒调频率的线性拟合误差, 可发现随着测绘带宽度的增加, 线性拟合法精度将有所下降. 因此, 在处理大测绘带回波数据时, 应采用距离向分块处理的方法, 以提高参数估计精度和补偿效果.

待完成所有子孔径回波对应的多普勒调频率估计后, 即可采用曲线拟合的方法得到各个方位时刻对应的瞬时多普勒调频率值. 其中第  $m$  条距离单元所对应的瞬时多普勒调频率可表示为:

$$\gamma_m(t_a; R_0) = \bar{\gamma}_m(t_a; R_0) + \Delta\gamma_m(t_a; R_0), \quad -\frac{T_a}{2} \leq t_a \leq \frac{T_a}{2} \quad (15)$$

其中  $\bar{\gamma}_m(t_a; R_0)$  为理想瞬时多普勒调频率,  $\Delta\gamma_m(t_a; R_0)$  表示瞬时多普勒调频率误差. 对估计出的瞬时多普勒调频率作二次积分, 求得目标二次相位历程

$$\begin{aligned}
\varphi_m(t_a; R_0) &= \int_{t_n}^{t_a} \int_{t_n}^s \gamma_m(u; R_0) du ds \\
&= \int_{t_n}^{t_a} \int_{t_n}^s \overline{\gamma}_m(u; R_0) du ds \\
&\quad + \int_{t_n}^{t_a} \int_{t_n}^s \Delta\gamma_m(u; R_0) du ds \\
&= \overline{\varphi}_m(t_a; R_0) + \Delta\varphi_m(t_a; R_0) \quad (16)
\end{aligned}$$

式(16)中的 $\overline{\varphi}_m(t_a; R_0)$ 为理想相位,  $\Delta\varphi_m(t_a; R_0)$ 为二次相位误差. 在二维时域内乘以  $\exp[-j\Delta\varphi_m(t_a; R_0)]$ , 完成二次相位误差补偿. 为提高补偿效果, 可采用循环补偿的方法, 通常循环两次即可满足实际要求.

### 3.3 第三级: 基于自聚焦算法的高阶相位误差补偿

经过前两级的运动补偿, 回波中的大部分运动误差已被消除, 仅剩残余高阶相位误差. 为进一步消除高阶相位误差影响, 我们选择采用基于图像域的自聚焦算法—PACE (Phase Adjustment by Contrast Enhancement) 算法<sup>[7]</sup>. PACE 是一种无预设模型的自聚焦算法, 能够提取图像中任意阶相位误差. 但在将 PACE 算法应用于 UWB SAR 时存在两个问题: 一是 PACE 算法是针对聚束 SAR 推导的. 聚束 SAR 中, 场景内所有目标的合成孔径相同, 所有目标具有相同的相位误差历程. 因此可充分利用不同目标间的相位误差冗余性, 提高相位误差估计精度. 但本文所要处理的 UWB SAR 实测数据是以条带模式录取的, 不同方位位置目标对应不同的合成孔径, 具有不同的相位误差历程, 彼此间的冗余性较差, 导致相位误差估计精度较低. 二是 PACE 算法把回波相位校正矢量序列中的每个值作为估计变量, 因此参数估计所需迭代次数与图像数据方位点数成正比, 这使得 PACE 算法运算量巨大, 效率较低, 影响了算法的实用性.

为解决上述问题, 可采用下述两点改进措施:

(1) 图像分块聚焦法. 原理: 本文所处理的 UWB SAR 系统具有较宽波束角 ( $\geq 13^\circ$ ), 若将图像数据划分成若干个子块, 则每个子块图像可近似等效成聚束 SAR 图像数据. 与整个图像数据相比, 在子块图像中, 目标相位误差间具有较好冗余性, 从而提高相位误差估计精度. 实施步骤: 首先, 将整个 UWB SAR 图像数据沿距离向和方位向划分成若干个子块; 其次, 在子块图像内应用 PACE 算法估计和补偿高阶相位误差; 最后, 将聚焦后的子块图像拼接得到完整图像.

(2) 相位误差插值估计数法. 原理: UWB SAR 图像方位采样率 (即相位误差采样率) 通常远大于相位误差信号带宽. 根据 Nyquist 采样定理, 当信号采样率大于信号带宽时, 可通过插值的方法无失真地恢复出原始信号. 基于这种思想, 在利用 PACE 算法进行高阶相位误差估计时, 可对原始图像数据对应的相位误差信号作降采

样估计, 即先估计出原相位误差校正序列中的若干个点, 然后利用求得已知点, 通过曲线拟合恢复出原始相位误差. 实施步骤: 首先, 从原始回波相位校正序列中等间隔地选取若干个数作为待估计变量; 其次, 估计选取序列的相位误差值; 最后, 对估计出的相位误差值作三次样条拟合, 得到原始回波相位校正序列对应的相位误差值, 并补偿.

## 4 结合三级运动补偿方法的成像处理流程

### 4.1 成像算法选择

在成像算法选择上, 主要考虑了两点因素: 一是算法要具有强去耦合能力, 以便能够实现对低频 UWB SAR 的精确成像; 二是算法能够与本文所提三级运动补偿方法相结合. 综合上述两点, 我们最终选择了 EOK 算法<sup>[2]</sup>. 该算法有三个优点: 首先, EOK 算法具有与原始 Omega-K 算法相同的精确成像能力, 能够实现对 UWB SAR 回波的精确成像. 其次, EOK 算法中的距离压缩处理与 RCMC 是分离的, 因此与 NCS 等不存在距离压缩域回波的算法相比, EOK 算法能够结合本文提出的第一级运动补偿方法 (见 3.1 节). 最后, EOK 算法通过修正 Stolt 插值实现了距离方位的两维分离聚焦, 能够结合在距离多普勒域内进行的二阶相位误差补偿 (第二级).

### 4.2 结合三级运动补偿方法的 EOK 算法成像流程

图 5 给出了本文所提小型机载 UWB SAR 实测数据成像处理流程. 其中初级 UWB SAR 图像表示方位压缩后, PACE 聚焦前的 UWB SAR 图像, 终级图像表示 PACE 后的 UWB SAR 图像. 该成像流程以两个全孔径回波为一个处理单元, 对原始回波数据进行方位划分, 处理单元间的重叠比为 1/2, 从而实现了长航程小型机载 UWB SAR 的连续成像处理.

## 5 UWB SAR 实测数据成像实验

下面通过实测数据成像实验来验证所提方法的有效性. 该数据是由安装在小型运输机“运-12”上的某 P 波段 UWB SAR 系统录取的. 系统二维分辨率均为 1.0m, 载机飞行高度 2.5km, 设计飞行速度 67m/s, 全程飞行时间约 200s, 单个全孔径时间约 80s. 实验中, 飞机上安装了 (Global Position System, GPS) 系统, 用于记录载机的飞行参数. 由于所安装的 GPS 测量精度较低 (约亚米级), 不满足成像处理要求.

### 5.1 传感器数据分析

图 6 为传感器记录的载机航向速度, 飞行航迹角, 以及由经纬高数据转换得到的侧向和法向偏航误差. 由图 6 可发现, 在 200s 的飞行过程中, 航向速度误差波动幅度将近 6m/s, 航迹角波动范围将近  $8^\circ$ , 最大侧向平

动误差达 120m,最大法向偏航误差达 20m.由此可知,载机在飞行过程中具有较大的运动误差,飞行情况很不理想.若要得到良好聚焦的 UWB SAR 实测图像,必须采取有效的补偿运动方法.

### 5.2 实测数据成像实验

图 7、图 8 分别给出了采用基于传感器数据的传统“两步式补偿法”与采用文献[5]的三维补偿法后得到的成像结果.为获得良好的 PSLR 和 ISLR 值,成像过程中,距离方位均采用了汉宁窗加权处理.

由图 7 可发现,由于传感器测量精度较低,运动补偿后,图像仍散焦严重.而由图 8 可发现,由于 UWB SAR 合成孔径长,载机运动误差对回波数据的 RCMC 处理精度影响很大,致使基于回波数据估计的运动参数精度较低.三维运动补偿后,所得图像聚焦质量依然较差.图 9 为采用本文所提结合三级运动补偿方法的 EOK 算法的成像结果.

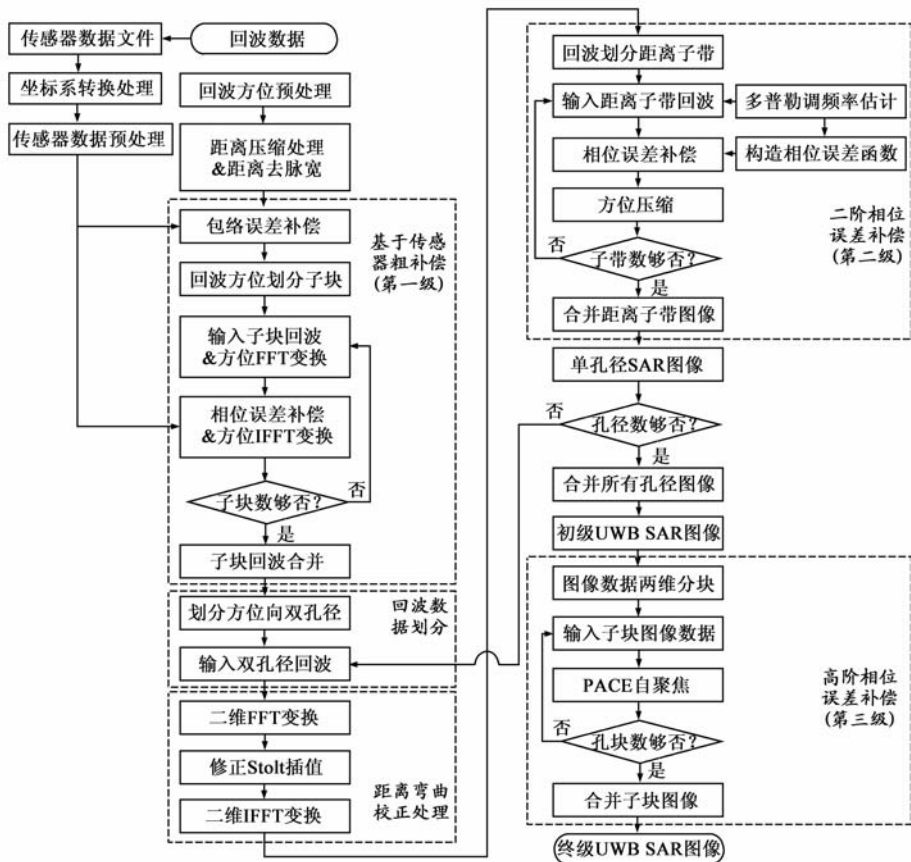


图5 小型机载UWB SAR实测数据成像处理流程图

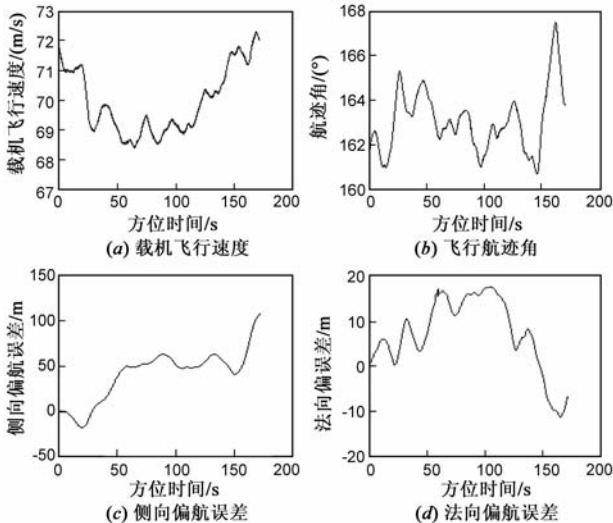


图6 传感器测得的载机飞行参数

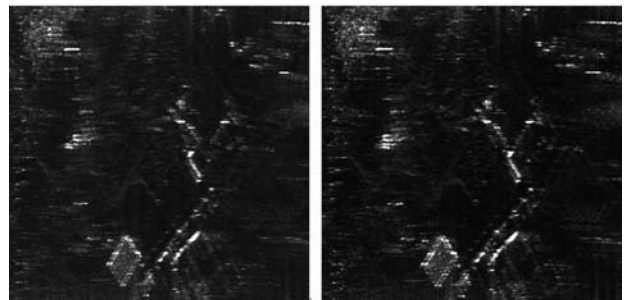


图7 采用传统“两步式补偿法”的成像结果 图8 采用三维运动补偿方法的成像结果

虚框内),然后将其放大.通过局部放大图,可以更加清晰地观察所得图像的聚焦质量.

为定量地衡量所得 UWB SAR 聚焦质量,我们提取了放置在路边 1m 角反射器(图中箭头所指处)的两维剖面图,并计算目标的距离分辨率(3dB 宽度)  $\rho_r$ 、方位分辨率(3dB 宽度)  $\rho_a$ 、峰值旁瓣比(Peak SideLobe Ratio, PSLR)、积分旁瓣比(Integrated SideLobe Ratio, ISLR)三项指标<sup>[9]</sup>,如图 10 所示.

由图 10 可发现,目标的各项指标均达到或接近理论值,从而进一步证明了所提方法的有效性.

由图 9 可发现,所得 UWB SAR 图像纹理清晰,场景对比度较高.成像场景中的城镇、道路、工厂以及道路两侧的树木、电线杆等目标清晰可见.为便于观察成像效果,从大图像中截取一段交叉路口和仓房图像(方形

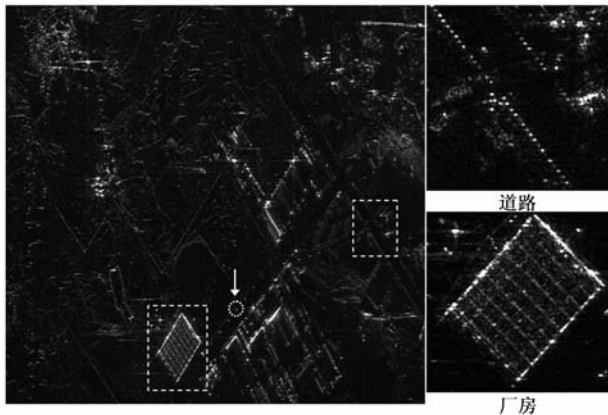


图9 采用本文所提运动补偿方法的成像结果

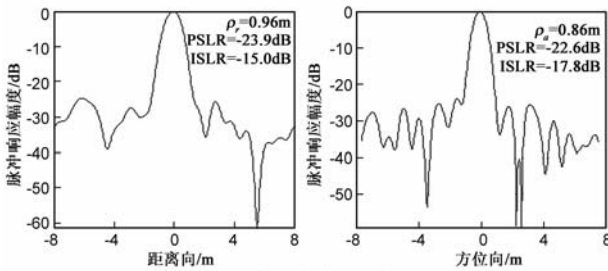


图10 点目标脉冲响应图

## 6 结论

本文提出一种结合 EOK 算法的三级运动补偿法. 通过实施运动误差的分级补偿, 有效地消除了载机运动误差对 UWB SAR 成像处理的影响. 此外, 所提方法具有成本低、精度高、实用性强等优点. 小型运输机“运-12”的机体与无人机比较相近, 其运动状态也比较相似. 因此, 本文所提方法对研发低成本无人机载低频 UWB SAR 系统具有一定的参考价值.

## 参考文献

- [1] Moreira A, Yonghong H. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(5): 1029 – 1040.
- [2] Reigber A, Alivizatos E, Potsis A, et al. Extended wavenumber domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation [J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2006, 153(2): 301 – 310.
- [3] Postis A, Reigber A, Mittermayer J. et al. Sub-aperture algorithm for motion compensation improvement in wide-beam SAR data processing [J]. Electronic Letters, 2001, 37(23): 1405 – 1406.
- [4] 王建, 王亮, 薛国义, 等. 基于数据的超宽带 SAR 的运动补偿方法 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2): 360 – 364.

WANG Jian, WANG Liang, XUE Guo-yi, et al. Signal based motion compensation for ultra-wide band SAR [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(2): 360 – 364. (in Chinese)

- [5] Xing M D, Jiang X W, Wu R B, et al. Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8): 2870 – 2882.
- [6] 常文革, 李建阳, 李悦丽. 高波段 SAR 与 UWB SAR 运动补偿效果分析 [J]. 信号处理, 2009, 25(1): 99 – 103. CHANG Wen-ge, LI Jian-yang, LI Yue-li. The analysis of motion compensation between high-band SAR and UWB SAR [J]. Signal Processing, 2009, 25(1): 99 – 103. (in Chinese).
- [7] 薛国义, 周智敏, 安道祥. 一种适用于机载 SAR 的改进 PACE 自聚焦算法 [J]. 电子与信息学报, 2008, 30(11): 2719 – 2723. XUE Guo-yi, ZHOU Zhi-min, AN Dao-xiang. An improved phase adjustment by contrast enhancement algorithm for airborne SAR [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(11): 2719 – 2723. (in Chinese)
- [8] 王亮, 练有品, 黄晓涛, 等. 大斜视角与大波束角 SAR 成像比较 [J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1672 – 1675. WANG Liang, LIAN You-pin, HUANG Xiao-tao, et al. Comparison of large squint and large beam SAR imaging [J]. Acta Electronic Sinica, 2006, 34(9): 1672 – 1675. (in Chinese)
- [9] Cumming I G, Wong F H. 合成孔径雷达成像算法与实现 [M]. 洪文, 胡东辉, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2007.

## 作者简介



安道祥 男, 1982 年 2 月出生于吉林东丰, 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院信息与通信工程专业博士研究生. 从事低频超宽带 SAR 成像与超高分辨聚束式 SAR 成像技术研究.

E-mail: daoxiangn@yahoo.com.cn



黄晓涛 男, 1972 年出生于湖北武汉, 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师. 从事阵列信号处理、现代谱估计等领域的研究.

周智敏 男, 1957 年出生于河北, 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师. 从事超宽带 SAR 信号处理、高速信号实时处理等领域的研究.