

## 一种高分辨率聚束 SAR 运动补偿算法研究

麻丽香<sup>①</sup> 程黎<sup>①</sup> 唐禹<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(中国航天科工集团三十五研究所 北京 100013)

<sup>②</sup>(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 聚束 SAR 模式是获得高分辨率雷达图像的一种有效的方法。由于合成孔径时间较长, 载机在合成孔径时间内飞行的非平稳性造成图像严重散焦, 并且高分辨率 SAR 的距离向信号也存在相位误差。该文提出一种新的基于回波数据的运动补偿方法对载机的位置误差、距离向相位误差以及残余包络误差进行有效的估计, 得到高分辨率的聚束 SAR 图像, 并通过实测数据验证了该文方法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达(SAR); 运动补偿; 极坐标算法(PFA)

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)03-0599-05

DOI:10.3724/SP.J.1146.2009.00197

## Research on Motion Compensation Algorithm for High Resolution Spotlight SAR

Ma Li-xiang<sup>①</sup> Cheng Li<sup>①</sup> Tang Yu<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(The 35th Research Institute of China Aerospace Science & Industry Corp, Beijing 100013, China)

<sup>②</sup>(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Spotlight SAR is an efficiency way to obtain high resolution radar image. The non-stability of the aircraft motion during the long synthetic aperture time can make the image suffer the severe defocus, and there is phase error in the range direction in the high resolution SAR system. This paper presents a novel signal processing method based on echo signal to get high definition resolution spotlight SAR image, which can make an effective estimation on the aircraft position error, the phase error in range direction and the residual envelop error. The experiment results show that the proposed approach can get the high quality SAR image from raw data.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Motion compensation; Polar Formatted Algorithm (PFA)

### 1 引言

合成孔径成像雷达具有全天时、全天候、作用距离远及分辨率高等特点, 能够大大提高战场的信息获取能力。目前, 国内对条带SAR的研究已经比较成熟, 对条带SAR的成像算法以及基于数据的运动补偿算法都进行了充分的研究, 得到了比较理想的成像结果<sup>[1]</sup>。随着SAR分辨率的不断增加, 聚束SAR的成像及运动补偿的研究成为近年来SAR研究的一个热点之一。聚束SAR成像模式是通过控制天线照射地面固定区域来增加合成孔径的累积时间, 从而获得很高的方位向分辨率<sup>[2]</sup>。与条带SAR相比, 聚束SAR模式下合成孔径时间大大增加, 这要求更加精细的运动补偿算法。如何对聚束SAR进行运动补偿是聚束SAR成像的一个关键技术, 国外在聚束

SAR成像中主要利用高精度的惯导系统和GPS定位系统输出的运动参数来控制载机和天线波束的平稳性, 并且通过惯导和GPS数据对SAR回波数据进行预先补偿, 然后进行自聚焦处理获得高质量的聚束SAR图像<sup>[3]</sup>。

针对国内SAR研究现状, 特别是在天线指向不稳定以及惯导精度不高的情况下, 聚束SAR运动补偿的效果受到很大限制<sup>[4-6]</sup>。因此, 本文详细推导了飞行载体的非理想运动引入的运动误差模型并分析其对成像质量的影响, 提出了一种有效的基于回波数据的运动补偿方法, 结合经典的极坐标算法, 从飞机位置误差的估计、距离向相位误差的估计以及残余包络误差的估计3方面进行了运动补偿, 实测数据表明该方法具有良好的运动补偿效果, 成像质量有较大提高。

### 2 聚束 SAR 的运动误差分析

载机在空中的运动误差按照对SAR成像的影响

可以分为两类,即影响天线相位中心到目标距离,以及不影响天线相位中心到目标距离的运动误差。其中前一种运动误差会影响回波的多普勒中心频率以及多普勒调频率,使得方位向处理困难;后一种的运动误差会影响天线波束的照射区域,在图像上表现为图像灰度和信噪比的变化,但并不影响图像的聚焦。

载机的偏航和俯仰,都会影响天线到目标的位置变化,造成SAR图像的散焦;载机的横滚不会引起载机到目标距离的变化,不会引起SAR图像的散焦,而天线平台的运动会引起天线波束中心发生改变,不会影响天线到目标的位置。天线平台的横滚运动也是会影响天线相位中心的变化,在图像上表现为距离向的两边会产生明暗相间的变化,使得图像在距离向的信噪比不均匀。

载机的偏航和俯仰运动引起图像的散焦,使回波的多普勒中心和多普勒调频率随时间变化,造成方位向处理的困难。因此基于回波数据的运动补偿主要是从原始数据中获得时变的多普勒信息,从而去除载机偏航和俯仰的影响。

在成像几何关系中,我们只考虑斜平面的情况,聚束SAR工作模式的示意图如图1所示,带误差项的SAR回波方程可以写为

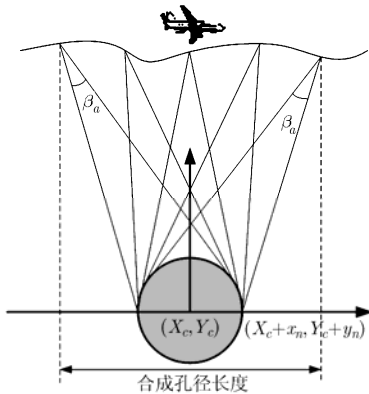


图1 聚束SAR示意图

$$S_{\text{spotlight}}(t, u) = \sum_n \exp\left(j \cdot Kr \cdot (t - t_0)^2\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{t - t_0}{T_s}\right) \cdot \exp(-j \cdot 2\pi f_c t_0) \quad (1)$$

$$\text{其中 } t_0 = \frac{2\sqrt{(X_c + x_n - u + \zeta(u))^2 + (Y_c + y_n + \xi(u))^2}}{c},$$

$T_s$ 是发射脉冲持续时间,  $Y_c$ 是中心作用距离,  $\zeta(u)$ 和 $\xi(u)$ 分别是沿航向和沿径向的位置误差,此位置

误差会引起图像的散焦,在数据处理中应去除 $\zeta(u)$ 和 $\xi(u)$ 对成像的影响。

对式(1)做关于 $t$ 的傅里叶变换可得

$$S_{\text{spot}}(\omega, u) = \sum_n P(\omega) \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2(\omega + \omega_c)}{c} \cdot \sqrt{(X_c + x_n - u + \zeta(u))^2 + (Y_c + y_n + \xi(u))^2}\right) \quad (2)$$

其中 $P(\omega)$ 是 $\exp(-j\pi K_r \cdot t^2)\text{rect}(t/T_s)$ 的傅里叶变换。

对上式指数项进行进一步简化,利用如下关系: $\|r + \eta\| \approx \|r\| + \|\eta\|$ 当 $\|\eta\| \ll \|r\|$ 时成立。在SAR中,由于位置误差远远小于天线到目标的作用距离,即满足

$$\sqrt{\zeta^2(u) + \xi^2(u)} \ll \sqrt{(X_c + x_n - u)^2 + (Y_c + y_n)^2}$$

因此有如下关系:

$$\begin{aligned} & \sqrt{(X_c + x_n - u + \zeta(u))^2 + (Y_c + y_n + \xi(u))^2} \\ & \approx \sqrt{(X_c + x_n - u)^2 + (Y_c + y_n)^2} + \sqrt{\zeta^2(u) + \xi^2(u)} \end{aligned} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)可得

$$S_{\text{spot}}(\omega, u) = \sum_n P(\omega) \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2(\omega + \omega_c)}{c} \cdot \left(\sqrt{(X_c + x_n - u)^2 + (Y_c + y_n)^2} + \varepsilon(u)\right)\right) \quad (4)$$

其中 $\varepsilon(u) = \sqrt{\zeta^2(u) + \xi^2(u)}$ 。式(4)中的指数项有两个部分组成,第1个部分是无运动误差时的回波方程,第2部分是由载机的运动误差引起的,它导致图像的散焦。式(4)表明,由于载机运动误差引入的误差在距离向和方位向有某种锁定的关系,方位向由于运动误差所产生的相位误差和距离向由于运动误差所产生的距离迁移现象等效。

### 3 基于数据的运动补偿算法

在第2节中,分析了载机运动引入的误差对成像的影响,本节提出一种基于原始数据的运动补偿技术。聚束SAR的运动补偿主要包括下面3个方面:飞机位置误差的估计、距离向相位误差的估计以及残余包络误差的估计。由于经典极坐标算法是聚束SAR成像的一种快速有效的算法,本节将结合极坐标算法讨论聚束SAR的运动补偿问题。

#### 3.1 飞机位置误差的估计

在极坐标成像中,首先要将数据沿方位向进行

去斜处理, 去斜函数如下:

$$S_{\text{comp}}(\omega, u) = P^*(\omega) \exp\left\{j(\omega + \omega_c) \frac{2\sqrt{(X_c - u)^2 + Y_c^2}}{c}\right\} \quad (5)$$

用式(5)对式(4)进行相位校正, 可得

$$S_{\text{spot}}(\omega, u) = \sum_n |P(\omega)|^2 \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{2(\omega + \omega_c)}{c} \cdot \frac{Y_c}{\sqrt{(X_c - u)^2 + Y_c^2}} \cdot \left(\frac{X_c - u}{Y_c} x_n + y_n + \frac{\sqrt{(X_c - u)^2 + Y_c^2}}{Y_c} \varepsilon(u)\right)\right] \quad (6)$$

此时对回波数据进行距离向插值, 令

$$k = \frac{2(\omega + \omega_c)}{c} \frac{Y_c}{\sqrt{(X_c - u)^2 + Y_c^2}} \quad (7)$$

将式(7)带入式(6)并整理得

$$S_{\text{spot}}(k, u) = \sum_n |P(k)|^2 \cdot \exp\left[-j \cdot k \cdot \left(\frac{X_c - u}{Y_c} x_n + y_n + \varepsilon(u)\right)\right] \quad (8)$$

其中  $\varepsilon(u) = \frac{\sqrt{(X_c - u)^2 + Y_c^2}}{Y_c} \varepsilon(u)$ 。

如果我们能够对  $\varepsilon(u)$  做出估计, 那么就可以去除由于载机非理想运动所引起的相位误差。直接对整块数据进行相位估计并不能得到很好的结果, 聚束 SAR 的合成孔径时间很长, 载机的运动误差已经扩散在若干个距离门中。因而, 在实际中, 将方位向数据分成若干个子孔径, 对每个子孔径运用 MD 方法或最小熵法对子孔径的调频率进行估计, 可以得到对  $\varepsilon(u)$  二次导数的估计, 通过如下积分, 可以得到对飞机位置误差  $\varepsilon(u)$  的估计值。

$$ee(u) = 2 \int_0^u \int_0^p e''(s) ds dp \quad (9)$$

式(8)是进行了距离向插值后的信号, 此时还存在距离向和方位向的耦合, 这会降低估计的精度, 影响成像的质量。因此在对各个子孔径进行调频率估计时, 本文采用 CZT(Chirp-Z Transform)变化来消除子孔径内部的距离向和方位向的耦合<sup>[7,8]</sup>, 然后运用 MD(Map Drift)方法进行子孔径调频率估计。图 2 为子孔径内调频率估计的流程图。

### 3.2 距离向相位误差的估计

在高分辨率 SAR 中(如分辨率小于 0.2 m), 距

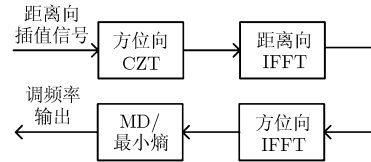


图 2 子孔径内调频率估计流程图

离向信号的带宽非常宽, 雷达信号经发射、调制、接收及 AD 采样量化后, 形成数字信号。然而, 在没有采用去斜接收技术的接收机中, 要使接收机在 1 GHz 以上的频带宽度内有平坦的幅度响应及非常小的相频响应(通常要求小于  $\pi/4$ ), 是不现实的。此外距离向的线性调频信号一般是用 DDS 产生的, 要使信号始终保持理想的线性调频是非常困难的, 实际中如此大带宽的线性调频信号其相位并不是非常稳定的, 通常会随着时间做缓慢的变化。上面的两个原因都会引起接收后的信号在距离向上产生畸变, 影响压缩效果。在有的系统中, 采用了记录接收机的漏信号波形的方法来改善距离向压缩的效果。但有时系统并没有记录这样的漏信号, 这就需要从信号中提取距离向相位误差。

图 3 是距离向信号失真的一个示意图, 可以看出距离向的失真其实是一个时变系统, 在已知  $p(t)$  的情况下, 对时变系统进行辨识, 对  $p_0(t)$  做出估计。在 SAR 成像中, 对系统的相位误差更为敏感, 而幅度误差只影响 SAR 图像的旁瓣, 相位误差不仅会影响 SAR 图像的旁瓣, 而且会使图像的主瓣展宽, 降低图像的分辨率。

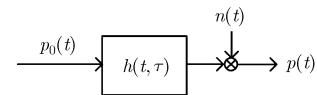


图 3 距离向失真框图

对时变系统  $h(t, \tau)$  的辨识比较困难, 距离向信号的相位误差是一个随时间慢变的量, 但可认为在合成孔径时间内不随时间变化, 将其退化成一个时变系统的辨识问题。从上面的分析可知, 我们可以只对系统的相频响应进行估计, 而忽略幅频响应对成像的影响。

在高分辨率聚束 SAR 成像中, 可以采用 PGA 算法对系统的相频响应进行辨识, 在辨识中必须要补偿载机的非理想运动, 来提高精度。载机非理想运动的估计采用了 3.1 节中的方法。图 4 是距离向插值后对距离向相位估计误差的流程图。

### 3.3 残余包络误差的估计

经过距离向相位估计以及载机位置误差估计

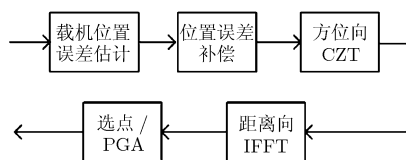


图 4 距离向相位误差估计流程图

后, 进行极坐标算法的方位向插值操作, 但此时距离向压缩信号的包络仍然存在误差, 这会影响成像的效果。此时包络误差主要由下面两个原因引起: 其一是由于在载机位置估计中采用了两次积分的形式, 在两次积分中初值都选为零, 这样不能估计载机非理想运动引入的线性的位置误差, 当这种线性位置误差超过一个距离门时, 会引起包络误差; 另外一个因素是利用子孔径的方法来估计多普勒调频率时, 由于受子孔径大小的限制, 使估计值存在误差, 经过二次积分后, 产生残余的包络误差。

由于在 SAR 图像中存在一些强散射的孤立点, 因此可以根据这些特显点来跟踪信号包络的变化, 其基本思想与 PPP<sup>[9]</sup>自聚焦算法有些相似。在实际中采用如下的步骤来进行残余包络误差的估计:

(1) 先进行方位向 IFFT 变换, 对数据进行成像。

(2) 将图像分成子块: 如  $32 \times 64$  大小。以每个子块的最大值与中值的比作为选择孤立点的标准, 选择若干个特显点。

(3) 将选中的每个小块的数据最大值循环移动到中心位置, 并在方位向进行傅里叶变换。将所有选择的特显点按此操作进行非相干累加。

(4) 将第 3 步得到的图像, 距离向进行插值后, 求出每个方位向上的最大值的位置。

(5) 将所得到的曲线用多项式进行拟合, 来求出残余包络误差。

图 5 是残余包络误差估计的信号流程图。

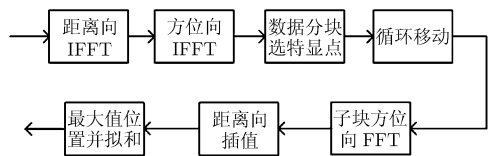


图 5 残余包络误差估计流程图

经过残余包络误差校正后, 此时在距离已经没有包络误差, 但在方位向仍然有残余的相位误差, 聚束 SAR 成像的最后步骤是去除方位向残余误差对成像的影响, 在理想的聚束 SAR 中, 不存在包络误差时对方位向相位误差的校正用标准的 PGA 算法可以得到很好的效果, 但在机械扫描的聚束 SAR

中, 天线的辐照区在地面并不是静止不动, 而有一定的速度, 这种模式相当于滑动聚束的模式<sup>[10]</sup>, 此时对方位向相位误差的校正应该采用分段 PGA 的算法。图 6 是基于极坐标算法下聚束 SAR 的信号处理流程图。

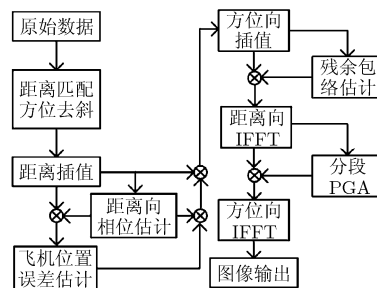


图 6 聚束 SAR 运动补偿流程图

#### 4 实测数据运动补偿结果

为了验证本文提出的聚束 SAR 运动补偿处理的效果, 对实测聚束 SAR 数据进行了成像实验, 聚束 SAR 的分辨率为 0.2 m, 雷达系统工作在 X 波段, 信号带宽为 1 GHz, 采样率为 1.5 GHz, 天线转角为  $-5^\circ \sim 5^\circ$ , 接收机没有采用去斜接收技术, 距离向信号成像为普通的脉压方式。

由于合成孔径时间比较长, 大约 20 s, 飞机在合成孔径时间内存在很大的位置误差, 并且没有采用去斜接收技术, 接收机的带宽需大于 1 GHz, 在接收机带宽内存在相频误差, 在信号处理中应予以补偿。对实测聚束 SAR 的成像结果图 7 所示。

图 7 是实测数据的成像结果, 图 7(a)是本文方法估计的距离向频域的相位误差, 图 7(b)是估计出载机位置误差, 图 7(c)是数据中残余包络误差的二维图; 图 7(d)是从图 7(c)中提取的包络误差。图 7(e)为进行运动补偿时的成像结果, 图 7(f)是运用本文方法进行运动补偿后的成像结果。

图中的成像结果表明, 利用文中提出的运动补偿方法能够准确估计出载机的位置误差、距离向的相位误差和残余包络误差, 与未进行运动补偿的图像相比, 聚焦效果显著增强, 图像质量明显提高。

#### 5 结束语

本文根据载机的运动误差形式, 提出了一种有效的聚束 SAR 的成像处理方法, 该方法利用信号处理的方法可以对载机的位置误差、距离向的相位误差以及残余包络误差进行高精度的估计。实测数据证明了本文方法的有效性, 与未补偿的图像相比图像质量有较大改善。

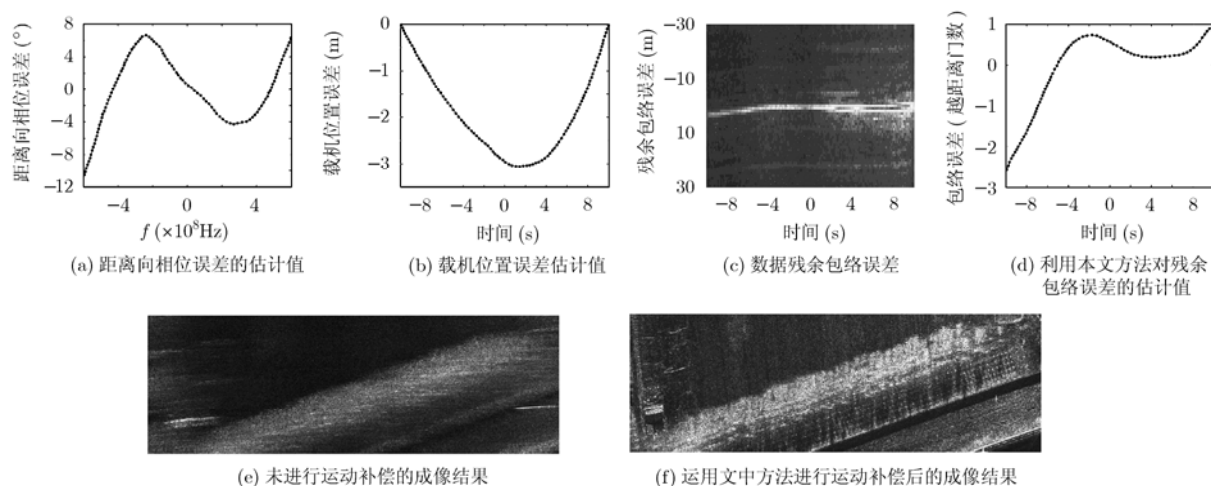


图7 实测聚束SAR成像结果

## 参考文献

- [1] 周锋, 邢孟道, 保铮. 一种无人机载SAR运动补偿的方法. 电子学报, 2006, 36(6): 1002-1007.  
Zhou Feng, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. A method of motion compensation for unmanned aerial vehicles borne SAR. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 36(6): 1002-1007.
- [2] Jakowatz C V, Walhl D E jr, and Eichel P H. *et al.* Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach. Kluwer Academic publishers. 1996: 107-113.
- [3] Tsunoda S I, Pace F, Stence J, Hensley W H, Doerry A W, and Walker B C. Lynx : A high resolution synthetic aperture radar [C] . Aerospace Conference Proceeding, USA, March, 2000, 5: 51-58.
- [4] 王鹏波, 周荫清, 陈杰, 等. 姿态指向稳定度对聚束SAR成像的影响. 现代雷达, 2007, 29(8): 18-21.  
Wang Peng-bo, Zhou Yin-qing, and Chen Jie. Effect of satellite attitude stability on spotlight SAR imaging. *Modern Radar*, 2007, 29(8): 18-21 .
- [5] 丁赤彪. 基于惯导系统的机载SAR运动补偿精度分析. 电子与信息学报, 2002, 24(1): 12-18.  
Ding Chi-biao. Error analysis of airborne SAR motion compensation using INS. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2002, 24(1): 12-18.
- [6] 盛蔚, 房建成, 韩晓英. 运动补偿用惯性器件误差对SAR成像分辨率的影响研究. 航空学报, 2007, 28(5): 1162-1167.  
Sheng Wei, Fang Jian-cheng, and Han Xiao-ying. Study on effect of inertial device error in motion compensation subsystem on SAR image resolution. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2007, 28(5): 1162-1167.
- [7] 孙进平, 袁运能, 王俊, 等. CTZ在聚束SAR极坐标格式成像算法中的应用. 系统工程与电子技术, 2002, 24(10): 4-7.  
Sun Jin-ping, Yuan Yun-neng, and Wang Jun, *et al.* Application of CZT in polar format algorithm of spotlight SAR. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24(10): 4-7.
- [8] Burns B L and Cordaro J T. A SAR image formation algorithm that compenates for the spatially variant effects of antenna motion[J]. *SPIE Proceedings*, 1994, 2230: 14-25.
- [9] Stuff M S, Sullivan R C, and Thelen B J. Automated two and three dimensional fine resolution, radar imaging of rigid targets with arbitrary unknown motion. Proceedings of the 1994 SPIE International Symposium: Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery, Orlando, FL, April 1994, 2230: 180-189.
- [10] 唐禹, 王岩飞, 张冰尘. 滑动聚束SAR成像模式研究. 电子与信息学报, 2007, 29(1): 26-29.  
Tang Yu, Wang Yan-fei, and Zhang Bing-chen. A study of sliding spotlight SAR imaging mode. *Journal of Electronics and Information Technology*. 2007, 29(1): 26-29.

麻丽香: 女, 1980年生, 工程师, 研究方向为成像雷达技术及数字信号处理.

程 黎: 男, 1963年生, 研究员, 研究方向为雷达系统理论及系统设计.

唐 禹: 男, 1976年生, 副教授, 研究方向为成像雷达技术及数字信号处理.