## 基于方位波数域聚束模式 PFA 的运动补偿新方法研究

杨磊唐禹 孙光才 邢孟道 保 铮 (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:** 该文在对聚束模式 SAR 数据进行极坐标算法(PFA)形式成像的过程中,通过研究载机运动误差对散射点 方位向波数表达式的影响,给出了一种基于方位波数域进行运动误差估计及相关补偿的新方法。该方法首先应用距 离匹配滤波和方位 dechirp 实现对原始数据的 2 维调频率去斜处理,同时经过距离 FFT 和极坐标算法的操作将原 来极坐标下的数据重采样到直角坐标系下的 2 维波数域,最后对数据进行距离和方位的分块误差估计及补偿。这种 方法能很好地针对运动误差造成的方位二次及高次误差相位项进行精确补偿,同时也能处理误差相位的空变性问 题,因此可以获得相对传统时域补偿方法更好的图像聚焦效果。实测数据的处理和分析,验证了该文所述方法的有 效性,证明了与传统时域运动补偿方法相比的优越性。

关键词:聚束式合成孔径雷达;运动补偿;波数域;极坐标算法

中图分类号: TN958 文献标识码: A DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01423 文章编号: 1009-5896(2010)11-2661-07

# Study on Azimuth Wavenumber Domain Spotlight Mode Motion Compensation Based on PFA

Yang Lei Tang Yu Sun Guang-cai Xing Meng-dao Bao Zheng (Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In this paper, the motion compensation of spotlight mode SAR data processing is studied with Polar Format Algorithm (PFA). A new approach for motion error estimation and compensation in azimuth wavenumber domain is proposed. The framework applies range matched filtering and azimuth dechirp processing to obtain the two dimensional wavenumber data support. First, range compression via fast Fourier transform and PFA interpolation to transform the polar coordinate support to rectangular one is performed. Then the error phase is estimated and compensated in sub-apertures respectively. This framework can both compensate the second or high order motion error accurately, and solve the spatial-variant errors. Compared with the traditional time domain motion compensation, the proposal can achieve better performance for focusing synthetic aperture radar imagery. Experiment with real data is done to verify the effectiveness and advantage of the proposal.

Key words: Spotlight SAR; Motion compensation; Wavenumber domain; Polar Format Algorithm (PFA)

## 1 引言

聚束式合成孔径雷达<sup>[1-3]</sup>通过控制天线相位中 心(APC)的指向使得雷达波束在整个合成孔径时间 内始终照射地面的固定区域,增加了成像的相干积 累时间,从而提高了方位向分辨率,因此是一种有 效的高分辨成像手段。目前针对聚束式 SAR 主要的 成像算法有 RMA, PFA 及 WPFA<sup>[4]</sup>等。从应用角 度来看,PFA 算法以其较高的运算效率成为研究的 热点<sup>[3,5,6]</sup>。经典的极坐标算法根据聚束模式的成像特 点,通过以场景中心为成像处理的参考点,分别进 行距离向和方位向的去斜率处理,再将数据进行极

2009-11-02 收到, 2010-03-03 改回 国家部委基金资助课题 通信作者:杨磊 xdthomasyl@gmail.com 坐标到直角坐标的 2 维插值,最后进行 2 维 IFFT 从而有效地重建聚束式 SAR 图像。但是机载 SAR 在飞行过程中容易受到大气湍流的影响,使得载机 不可能做理想的匀速直线飞行,从而导致回波相位 畸变,最终造成成像质量的恶化。载机的运动误差 可以分为两类<sup>[7]</sup>:第1类是转动误差,这类误差随着 现代雷达伺服系统对雷达射线的精确控制已经比较 小,可以忽略不计,而且这种误差一般引起的是幅 度调制;第2类是平动误差,主要是由于载机的非 匀速直线运动造成的,这种平动的运动误差会造成 回波相位的畸变,影响方位向相位的相干性,其中 一次相位误差将造成图像的几何形变;二次相位误 差将造成主瓣展宽及旁瓣电平升高,使得图像轮廓 模糊,分辨率下降;三次及更高次的相位误差将使 压缩波形产生非对称畸变,旁瓣电平升高等一系列 问题,严重时产生虚假目标。

由于目前国内惯导技术尚不成熟,精度还不能 满足高分辨成像的需求,因此为了实现对运动误差 的补偿,基于回波数据的运动补偿方法是应用的主 流,传统的这类运动补偿方法大多是基于时域的条 带模式运动补偿<sup>[8-10]</sup>。文献[8]论述了沿距离向空变 的二阶运动误差的补偿问题,但是对于方位向引起 散焦的误差相位项并没有给出解决方法;文献[9]说 明了运用方位向划分子孔径来补偿沿方位向空变的 相位误差方法,但是该方法容易受到子孔径数据时 间带宽积的约束,无法补偿高频误差项,补偿精度 有限;文献[10]主要说明了运用 Extended Omega-K ( $\omega - k$ )算法在波数域实现运动补偿,但该算法应用 stolt 插值不仅运算量比较大而且成像质量受插值精 度的影响也很明显,因而不适合聚束式成像的运动 补偿。

在实际的聚束式 SAR 数据获取过程中,由于 SAR载体的运动误差同样会造成回波信号的畸变和 失真,如果不采取运动补偿会导致成像质量下降, 甚至不能成像。当前聚束模式运动补偿大多是对原 始数据直接采用传统条带式时域运动误差估计及补 偿方法,同时为了提高聚焦精度结合了 PGA 技术, PGA 是一种较为有效的自聚焦方法,在很多成像雷 达系统中被应用。但是由于聚束模式直接数据获取 为极坐标格式如果应用传统方法进行估计和补偿其 精度必然有限,而且 PGA 的引入会增加程序运算 量和处理复杂度,进而增大了成像方法的实时实现 难度,因此有必要研究聚束模式下特定的运动补偿 新方法。文献[11]论述了用多特显点方法运动补偿后 再进行 PFA 聚束成像的算法,但是其成像质量受到 特显点选取的很大制约; 文献[12]主要说明了用方位 向的非均匀插值补偿航线误差和前向速度变化的误 差,但该方法必须将方位向输出的采样间距预先计 算并存储才能减小计算量,因此增加了实时处理的 实现难度。

基于目前的研究情况和实际需求,为了实现对 聚束模式成像中的运动误差更加精确的补偿,得到 更加清晰的聚束式 SAR 图像,本文在传统 PFA 的 基础上,提出一种基于方位波数域的运动补偿新方 法,该方法在对回波进行2维调频率去斜的基础上, 通过距离向傅里叶变换和2维 sinc 插值操作将原始 数据转换到2维波数域的直角坐标系下,然后应用 距离和方位分块操作,并在方位波数域内完成对应 子块误差相位的精确估计,同时将其拟合至整个数 据域的支撑区,最后完成运动误差相位的补偿。本 文内容安排如下:第2节推导并分析了运动误差相 位的解析表达式,同时得到了需要进行补偿的相应 的散焦误差相位项; 第3节给出了结合本文方法的 PFA 成像算法流程; 第4节采用了两种不同的补偿 方法对实测数据进行处理,并对处理结果进行了有 效分析,分析证实了本文所提出方法的有效性,同 时验证了相对传统时域运动补偿方法本文所述方法 的优越性。

## 2 运动误差相位推导及分析

聚束模式 SAR 在成像过程中控制其波束中心 指向始终对准成像区域的中心,其示意图如图 1 所 示,为了方便起见下面的推导均在 2 维斜平面进行, 并且仅讨论单个目标点的情况。



图 1 带有运动误差的聚束 SAR 示意图

雷达发射线性调频(LFM)信号,经过目标点反 射后接收到的基频回波信号表达式如式(1)所示,其 中 $\sigma_n$ 为对应点目标的后向散射系数, $a_r(\cdot)$ 为距离向 窗函数, $\tau$ 为快时间变量, $\tau_n$ 为点目标时间延时并 且为方位位置变量u(即慢时间t)的函数, $T_p$ 为发射 脉冲宽度, $K_r$ 为发射信号调频斜率, $f_c$ 为雷达中心 频率, $(x_n,Y_c + y_n)$ 为点目标位置坐标,天线波束中 心始终指向 $(0,Y_c)$ 处。

$$s(\tau, u) = \sigma_n a_r \left( (\tau - \tau_n) / T_p \right) \exp\left( j\pi Kr \left( \tau - \tau_n \right)^2 \right)$$
$$\cdot \exp\left( -j2\pi f_c \tau_n \right) \tag{1}$$

$$\tau_n = 2\sqrt{\left(x_n - \left(u + \Delta u\right)\right)^2 + \left(Y_c + y_n + \Delta Y\right)^2} / c \quad (2)$$

式(2)中 $u = v_a t$ 表示载机沿航线方向的理想位置变量, $v_a$ 为载机理想飞行速度,t为慢时间变量, $\Delta u$ 表示沿航线方向的位置误差, $\Delta Y$ 表示垂直航线方向的位置误差。下面对式(1)中的距离向快时间变量 $\tau$ 进行傅里叶变换可以得到

$$s(f_r, u) = \sigma_n a_r(f_r) \exp\left(-j\pi f_r^2 / K_r\right)$$
$$\cdot \exp\left(-j2\pi \left(f_c + f_r\right)\tau_n\right) \tag{3}$$

其中fr为距离向频率变量,然后对式(3)乘以距离向

参考函数 
$$\exp(j\pi f_r^2/K_r)$$
, 并忽略窗函数可以得到  
 $s(f_r, u) = \exp(-j2\pi(f_c + f_r)\tau_n)$  (4)

由平面波假设,忽略距离和方位位置的二阶及二阶 以上变化,对式(2)的距离位置变量 y<sub>n</sub>和方位位置变 量 x<sub>n</sub> 在零处进行一阶泰勒展开后代入式(4)可以得 到下式

$$S(k,u) \approx \exp\left(-j \cdot k \left(\sqrt{\left(u + \Delta u\right)^2 + \left(Y_c + \Delta Y\right)^2} + a \left(\Delta Y, \Delta u\right) y_n + b \left(\Delta Y, \Delta u\right) x_n\right)\right)$$
(5)

$$a\left(\Delta Y, \Delta u\right) = \left(\left(Y_c + \Delta Y\right) / \sqrt{\left(u + \Delta u\right)^2 + \left(Y_c + \Delta Y\right)^2}\right)$$
(6)

$$b(\Delta Y, \Delta u) = -\left(\left(u + \Delta u\right) / \sqrt{\left(u + \Delta u\right)^2 + \left(Y_c + \Delta Y\right)^2}\right)$$
(7)

其中 $k = (4\pi/c)(f_c + f_r)$ 。

由于在实际运动补偿处理中,需对距离和方位 进行分块操作,这样实际处理中每个子块的 $\Delta u$ 和  $\Delta Y$ 相对斜距 $Y_e$ 一般都比较小,所以分别对式(6) 和式(7)在 $\Delta u$ 和 $\Delta Y$ 等于零处进行一阶泰勒展开可 以得到

$$a(\Delta Y, \Delta u) \approx \frac{Y_c}{\sqrt{u^2 + Y_c^2}} + \frac{u^2}{\left(u^2 + Y_c^2\right)^{\frac{3}{2}}} \Delta Y - \frac{uY_c}{\left(u^2 + Y_c^2\right)^{\frac{3}{2}}} \Delta u$$
(8)

$$b(\Delta Y, \Delta u) \approx -\frac{u}{\sqrt{u^2 + Y_c^2}} + \frac{uY_c}{\left(u^2 + Y_c^2\right)^{\frac{3}{2}}} \Delta Y - \frac{Y_c^2}{\left(u^2 + Y_c^2\right)^{\frac{3}{2}}} \Delta u$$
(9)

同时假设在每个方位子块时间内沿航线的速度变化 量 $\Delta v_a$ 和垂直航线的加速度 $a_y$ 均为常数,所以此时 沿航线方向位置误差可以表示为 $\Delta u = \Delta v_a \cdot t$ ,垂直 航线方向的位置误差量可以表示为 $\Delta Y = a_y t^2/2$ , 在这里认为方位子块内垂直航线方向的初速度为 零。接下来根据经典 PFA 算法将式(5)乘以方位向 dechirp 函数得

$$S_{\text{comp}}\left(k,u\right) = \exp\left(j \cdot k\left(\sqrt{u^2 + Y_c^2}\right)\right) \tag{10}$$

从而得到

$$S(k,u) \approx \exp\left(-j \cdot k \left( \left(\sqrt{\left(u + \Delta u\right)^2 + \left(Y_c + \Delta Y\right)^2} - \sqrt{u^2 + Y_c^2} \right) + a \left(\Delta Y, \Delta u\right) y_n + b \left(\Delta Y, \Delta u\right) x_n \right) \right)$$
(11)

其中 $a(\Delta Y, \Delta u)$ 和 $b(\Delta Y, \Delta u)$ 分别为式(8)和式(9) 所示,再令距离向波数变量 $k_y$ 和方位向波数变量 $k_x$ 分别为

$$k_y = kY_c / \sqrt{u^2 + Y_c^2} \tag{12}$$

$$k_x = -ku \left/ \sqrt{u^2 + Y_c^2} \right. \tag{13}$$

由式(12),式(13)可以得到  
$$u = -(k_x/k_y)Y_c$$
 (14)

$$S(k_{y}, u) \approx \exp\left(-j \cdot k_{y} \left( \left(\sqrt{\left(u + \Delta u\right)^{2} + \left(Y_{c} + \Delta Y\right)^{2}} - \sqrt{u^{2} + Y_{c}^{2}}\right) \frac{\sqrt{u^{2} + Y_{c}^{2}}}{Y_{c}} + c \left(\Delta Y, \Delta u\right) y_{n} + d \left(\Delta Y, \Delta u\right) x_{n} \right) \right)$$
(15)

其中

$$c\left(\Delta Y, \Delta u\right) \approx 1 + \left(\frac{u^2}{\left(u^2 + Y_c^2\right)}Y_c\right)\Delta Y$$
$$-\left(\frac{u}{\left(u^2 + Y_c^2\right)}\Delta u\right) \qquad (16)$$

$$d\left(\Delta Y, \Delta u\right) \approx -\left(u/Y_{c}\right) + \left(u/\left(u^{2} + Y_{c}^{2}\right)\right)\Delta Y - \left(Y_{c}/\left(u^{2} + Y_{c}^{2}\right)\right)\Delta u \qquad (17)$$

再将 $u = v_a t$ 代入式(14)得到 $t = -(Y_c/v_a)(k_x/k_y)$ ,并 将其代入 $\Delta Y = a_y t^2/2$ ,便得到

$$\Delta Y = \left( a_y Y_c^2 / 2v_a^2 \right) \left( k_x / k_y \right)^2 \tag{18}$$

下面将  $\Delta u = \Delta v_a \cdot t$  和  $t = -(Y_c/v_a)(k_x/k_y)$  以及式 (14),式(18)代入式(15)可以得到  $S(k_y,k_x) \approx \exp\left(-j \cdot \left(f(k_y,k_x) + k_y y_n + g(k_y,k_x) + k_x x_n + h(k_y,k_x)\right)\right)$  (19)

$$f(k_{y},k_{x}) = k_{y}Y_{c} \left( \sqrt{\left(\frac{k_{x}}{k_{y}}\right)^{2} \left(1 + \frac{\Delta v_{a}}{v_{a}}\right)^{2} + \left(1 + \frac{a_{y}Y_{c}}{2v_{a}^{2}} \left(\frac{k_{x}}{k_{y}}\right)^{2}\right)^{2}} - \sqrt{\left(\frac{k_{x}}{k_{y}}\right)^{2} + 1} \right) \sqrt{\left(\frac{k_{x}}{k_{y}}\right)^{2} + 1}$$
(20)

$$g(k_y, k_x) = \left(\frac{k_x^2}{\left(k_x^2 + k_y^2\right)} \frac{a_y Y_c}{2v_a^2} \frac{k_x^2}{k_y} - k_y \frac{k_x^2}{\left(k_x^2 + k_y^2\right)} \frac{\Delta v_a}{v_a}\right) y_n$$
(21)

$$h\left(k_{y},k_{x}\right) = \left(-\frac{k_{x}^{2}}{\left(k_{x}^{2}+k_{y}^{2}\right)}\frac{a_{y}Y_{c}}{2v_{a}^{2}}k_{x}+k_{x}\frac{k_{y}^{2}}{\left(k_{x}^{2}+k_{y}^{2}\right)}\frac{\Delta v_{a}}{v_{a}}\right)x_{n}$$
(22)

从上面推导可得,式(19)为散射点回波信号的2维 波数域表达式,如果运动误差 $\Delta v_a$ 和 $a_u$ 均为零,则 式(20)-式(22)也均等于零,此时式(19)退化为标准 经典极坐标算法下的回波信号表达式,再对其进行 2维IFFT 后就可以得到清晰的聚束模式 SAR 图像。 但是由于运动误差的存在,导致回波表达式中引入 了3个运动误差相位项,进而造成图像的几何形变 以及散焦等变化,如果可以分别对其进行补偿,则 可以重建原来的聚束式 SAR 图像,从而解决由于运 动误差造成的图像质量下降问题。其中式(20)为运 动误差的非空变项,表示与目标的距离位置和方位 位置无关的误差项, 在对该项运动误差进行精确估 计后,可以对数据进行统一的补偿;式(21)为沿距 离向空变的误差项,表示在方位位置相同而距离位 置不同的目标点,相同运动误差对回波相位具有不 同影响的误差项,该项会引起沿距离向空变的方位 散焦,对于该误差项的处理可以在方位分块的基础 上再对距离进行分块处理,假设在距离小块内运动 误差的空变性可以忽略,并对该小块内的运动误差 精确估计,然后在方位向将误差拟合至全孔径下, 此时不但得到了每个距离单元内沿整个合成孔径的 相位误差变化曲线,即方位误差相位项,而且也拟 合出方位子块内沿距离向的空变变化曲线,这样可 以得到沿距离向空变的误差相位项,最后沿距离向 进行补偿就可以消除该项所引起的散焦影响。式(22) 为沿方位向空变的误差项,表示在距离位置相同而 方位位置不同的目标点,相同运动误差对回波相位 影响不同的误差项,由于方位向在处理过程中没有 进行类似距离压缩的处理,所以该项是无法进行估 计和补偿的,而且在方位向上采用子孔径技术进行 成像,其方位空变误差相位比较小,可以忽略其影 响。继续观察式(19)可见,此时得到的该表达式为2 维波数域下带有运动误差的回波表达式,其中变量  $k_u$ 和 $k_x$ 分别为距离向波数变量和方位向波数变量, 这里需要说明的是在传统意义下的波数变量应该是 与频率相对应的,例如距离波数变量应与距离向频 率相对应,方位波数变量应与方位向多普勒频率相 对应,但是本文中并没有进行方位向 FFT 因此所涉 及的方位向波数变量与传统的波数变量有所不同, 根据式(13)在进行方位插值后可以将本文所提及的 方位波数变量与传统波数变量一样对待进行处理, 在运动补偿后运用方位向 IFFT 实现成像,后面的 实测数据处理证实了这种方法的可行性。

下面继续分析式(20)-式(21)进而导出引起方位 散焦的误差相位项,令式(20)中

$$p(k_y, k_x) = \sqrt{p(1 + (\Delta v_a/v_a))^2 + (1 + (a_y Y_c/2v_a^2)p)^2}$$
(23)

其中 $(k_x/k_y)^2 = p$ , 对式(23)在p = 0处一阶泰勒展 开得到

$$p(k_y, k_x) \approx 1 + \frac{\left(1 + \Delta v_a / v_a\right)^2 + a_y Y_c / v_a^2}{2} p$$
$$= 1 + \frac{\left(1 + \Delta v_a / v_a\right)^2 + a_y Y_c / v_a^2}{2} \left(\frac{k_x}{k_y}\right)^2 \quad (24)$$

再由泰勒展开,近似可得

$$\sqrt{\left(k_x/k_y\right)^2 + 1} \approx 1 + \frac{\left(k_x/k_y\right)^2}{2}$$
 (25)

分别将式(24)和式(25)代入式(20),并仅取 k<sub>x</sub>的平方项得到

$$f\left(k_{y},k_{x}\right) \approx \frac{Y_{c}}{2k_{y}} \left(\frac{a_{y}Y_{c} + \Delta v_{a}^{2}}{v_{a}^{2}} + \frac{2\Delta v_{a}}{v_{a}}\right) k_{x}^{2} \quad (26)$$

另外沿距离向空变的运动误差推导中,同样令  $(k_x/k_y)^2 = p$ 则式(21)可以化简为

$$g\left(k_{y},k_{x}\right) = \frac{p}{1+p} \left(\frac{a_{y}Y_{c}}{2v_{a}^{2}}p - \frac{\Delta v_{a}}{v_{a}}\right)k_{y}y_{n}$$
(27)

为了得到关于 $k_x$ 的二次项,对式(27)在p = 0处一阶 泰勒展开得到

$$g(k_y, k_x) \approx -(\Delta v_a / v_a) p k_y y_n$$
  
=  $-(\Delta v_a / v_a) (k_x^2 / k_y) y_n$  (28)

根据式(26)和式(28)在对其进行距离 IFFT 后其中的 波数域变量  $k_y$  项可以用  $k_c = 4\pi/\lambda$  来近似代替,因 而推导出式(20)和式(21)对应的引起方位散焦的误 差项,所以需要进行补偿的误差相位为两项:其中 一项为误差的非空变相位项  $f(k_y,k_x)$ 中的关于波数 域变量  $k_x$ 的二次误差项;另一项为沿距离向空变相 位项  $g(k_y,k_x)$ 中关于波数域变量  $k_x$ 的二次误差项。

#### 3 算法流程

通过上面的理论分析和推导我们已经得到带有 运动误差的雷达回波在 PFA 下的2维波数域显式表 达式,从中得到了需要进行补偿的误差非空变项和 误差空变项,从而得出对应于本文提出的基于极坐 标算法(PFA)聚束模式运动补偿的具体实现流程, 如图2所示。

在图 2 所示的算法流程中,首先将得到的回波 数据做距离向 FFT 如式(3)所示,变化到距离频率 域,再与距离参考函数相乘完成距离向的频率去斜, 并按方位单元依次和式(10)相乘完成方位向 dechirp 操作,然后根据经典极坐标算法(PFA)完成距离和



图 2 本文所述方法流程图

方位的重采样,将原始极坐标数据应用式(12)和式 (13)插值到直角坐标系的2维波数域内,即距离向k<sub>y</sub> 维和方位向k<sub>x</sub>维,在这里插值操作应用 sinc 插值, 其插值精度较高,接下来的运动误差估计<sup>[3,7,13,14]</sup>和 误差的补偿都是基于上面推导的2维波数域下实现 的。其中运动误差估计应用图像偏置(MD)法,该方 法估计性能稳定,能够实现对二次运动误差较精确 的估计,即引起散焦的运动误差。

运动误差的估计和补偿分两步进行,并且在估 计和补偿过程中采用分块技术实现,以达到估计精 度较高的目的。第1步在数据的2维波数域下先进 行距离向 IFFT 以及方位重叠分块,按方位块估计 方位向多普勒参数进而得到对应相位误差的估计 值,并在2维波数域完成相应的包络(包括由于平台 径向运动引起的距离包络偏移)补偿和粗的相位补 偿;第2步再在此基础上进行距离 IFFT 对每个方 位子块进行距离分块,在方位波数域下估计随距离 空变的运动误差,将各距离子块的误差沿方位向拟 合得到整个方位支撑区的误差变化曲线,同时得到 在距离向上的空变误差变化规律,完成沿距离空变 的更加精细的相位补偿,此时距离向已变化到时域。 最后通过方位向逆傅里叶变换操作输出聚焦效果良 好的聚束式 SAR 图像。

## 4 实测数据分析

实际中由于载机运动的不稳定性,使得录取回 波数据时运动误差会导致图像严重的散焦。下面将 应用上一节提出的算法流程进行实测数据分析验 证,所处理数据为机载聚束模式 X 波段数据,距离



方位单元 图 3 未运动补偿的聚束图像



方位单元 图 4 传统时域运动补偿的聚束图像

和方位分辨率均为 0.3 m,距离向经距离压缩后为 4096 点,方位向为 32768 点,重复频率为 1250 Hz, 由此可得方位向的合成孔径时间达 32768/1250=26.2144 s,处理时方位向经过截取输出结果图像方位为 8192 点。该合成孔径时间相对一般条带 SAR 10 s 左右的合成孔径时间比较大,并且由于该时间的增加,会导致较小的运动误差在飞行过程中逐渐积累增大,进而造成对回波数据相位严重的影响,难以满足距离和方位高分辨成像的要求。

图 3 所示为没有采用运动补偿,而直接应用 PFA 进行成像的结果,其方位散焦非常严重。图 4 为应用时域运动补偿和极坐标算法并结合距离和方 位 PGA 方法得到的聚束 SAR 图像,其成像效果有 很大改善,对图像散焦的抑制有明显效果。图 5 为 应用本文所述方法,在数据的方位波数域下进行误 差估计和补偿且并没有应用 PGA 所得到的聚束 SAR 图像。通过与图 4 的对比可见该方法比传统的 时域补偿方法结果有明显提高,并且在实际处理中 该方法的计算时间仅为处理图 4 结果所需时间的一 半。下面将对传统时域运动补偿方法和本文方法进 行细节的对比分析。

首先提取图 4 和图 5 所示的圆圈处场景进行对 比,结果图像如图 6 和图 7 所示。在对比中可以看 到本文方法在补偿精度和补偿效果上比传统时域运 动补偿有很大提高。其中图 6 传统时域补偿将方位 向由于运动误差导致的散焦和图像失配等现象有所 抑制和消除,但是在补偿之后图像聚焦效果(如图中 圈 1 所示)还不是很理想,地物轮廓(如图中圈 2 所 示)还不是很清晰。图 7 基于方位波数域 PFA 的运 动补偿,在对运动误差的估计和补偿精度上更为精 确,处理的结果图像聚焦效果明显提高,地物轮廓 分明而且对比度和信噪比更高,图像锐化度更好, 从而证明了本文提出方法有着更加良好的补偿效 果。

然后讨论运动补偿对方位向相位的补偿效果。 根据理论分析可知,在没有任何运动误差的情况下, 场景中某一孤立点其距离单元所对应的方位向相位 在方位向 IFFT 之前应该是一条标准的斜直线,该 直线的斜率代表了该距离单元方位向多普勒频率



方位单元 图 5 本文方法运动补偿的聚束图像



值,此时对该点方位向进行 IFFT 则可以完全对点 目标进行聚焦成像,但是由于运动误差的存在,导 致该相位曲线偏离直线,其线性程度下降,所以在 运动补偿过程中对相位误差补偿的越彻底越完全,

得到该点最终的方位向相位越趋近于直线,进而可 以获得质量较好的聚束式 SAR 图像。基于以上讨 论,本文在图6和图7中选取了同一场景特显点(如 圈 3 所示)对应的距离单元分析其方位向相位,分析 时需要在处理流程中方位 IFFT 之前的数据域提取 该距离单元对应的方位向 4096 点,讨论其相位变 化。图 8 为没有运动补偿时该特显点对应的方位向 相位,其相位偏离标准斜直线的程度较大,可见运 动误差对相位的影响很明显,也就直接导致了图像 的模糊和散焦;而图 9 为时域运动补偿的相位结果 和本文方法运动补偿的相位结果对比,其中时域运 动补偿效果明显,消除了运动误差引起的大部分非 线性项,但相位中还包含了一定的残余相位误差, 导致补偿效果不能满足聚束高分辨成像的要求,而 基于方位波数域 PFA 的运动补偿方法实现了对相 位误差更加精细的补偿。

最后,对于 SAR 图像聚焦效果的衡量可以用图 像对比度<sup>[15]</sup>和图像信息熵<sup>[16]</sup>来表示。图像对比度越 大,信息熵越小表示图像的聚焦效果越好,图像的 信息量越充足。本文对图 3-图 5 对应的场景图像应 用对比度和信息熵进行计算分析,结果如表 1 所示, 对应图像方位向 8192 点,距离向 4096 点。从表中



方位单元 图 7 本文方法运动补偿细节图像



图 9 两种方法补偿相位的结果对比

数据可见,相比传统的时域运动补偿,基于方位波数域 PFA 的运动补偿方法在图像对比度和图像信 息熵的改善上都有很明显的效果。

另外本文给出另一组数据处理的对比结果,证 明本文提出的方法具有广泛的适用性。从下面图 10-图 12 可见,由于时域运动补偿对运动误差高次项的 估计和补偿不够精确,导致场景点目标对应信号旁

表1 运动补偿效果对比

指标名称	没有 运动补偿	时域运动补偿	本文运动 补偿方法
图像对比度 (10 <sup>4</sup> )	30.3830	32.9650	34.6930
图像信息熵 (10 <sup>4</sup> )	1.4814	1.4496	1.3858

瓣电平较高,图像轮廓模糊。而运用本文提出的运 动补偿方法即图2所示处理流程得到的聚束SAR图 像其清晰度和对比度都明显优于传统时域补偿的结 果,对比图 11 和图 12 中对应的圆圈处场景效果更 加明显。

#### 5 结束语

本文首先通过聚束模式的成像几何模型得到存 在运动误差情况下回波信号的表达式,并且在极坐 标算法下推导得到2维波数域直角坐标系下需要进 行补偿的运动误差非空变相位项和空变相位项,从 而提出相应相位误差项的估计和补偿方法。然后在 此基础上提出了基于方位波数域 PFA 的运动补偿 第11期



图 10 未运动补偿的聚束 SAR 图像

处理算法流程,并进行了实测数据分析和验证。最 后通过与传统时域运动补偿方法进行成像比较,验 证了本文提出方法的优越性和有效性。同时该方法 避免了计算量较大的 PGA 计算过程,适用于实时 聚束成像处理,并得到了稳定清晰的聚束式 SAR 图 像。

#### 参考文献

- Eineder M, Adam N, and Brcic R. High bandwidth spotlight SAR interferometry with TerraSAR-X[C]. IGARSS 2008, Boston, USA, 2008, 2: II113–II116.
- [2] Tan Wei-xian, Li Dao-jing, and Hong Wen. Airborne spotlight SAR imaging with super high resolution based on back-projection and autofocus algorithm. IGARSS 2008, Boston, USA, 2008, 4: IV1300–IV1303.
- [3] Carrara G, Goodman S, and Majewski M. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms[M]. Boston & London: Artech House, 1995, Chapter 3.
- [4] Carrara G, Goodman S, and Ricoy M A. New algorithms for widefield SAR image formation[C]. Proc. IEEE Radar Conference 2004, Philadelphia, USA, 2004: 38–43.
- [5] Tang Yu, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. The polar format imaging algorithm based on double Chirp-Z transforms[J]. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 610–614.
- [6] Zhu Dai-yin, Ye Shao-hua, and Zhu Zhao-da. Polar format algorithm using chirp scaling for spotlight SAR image formation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic* Systems, 2008, 44(4): 1433–1448.
- [7] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版 社, 2005, 第7章.
- [8] Fornaro G. Trajectory deviation in airborne SAR: analysis and compensation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 997–1009.
- [9] Prats P, Reigber A, and Mallorqui J J. Topographydependent motion compensation for repeat-pass interferometric SAR systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2005, 2(2): 206–210.
- [10] Reigber A, Aliviazatos E, and Potsis A. Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with



图 11 时域运动补偿结果截图



图 12 本文方法运动补偿结果截图

integrated motion compensation[J]. *IEE Proceedings. Radar* Sonar and Navigation, 2006, 153(3): 301–310.

- [11] Fu Wen-xian, Li Shao-hong, and Hong Wen. Motion compensation for soptlight SAR mode imaging[C]. 2001 CIE International Conference on Radar, Beijing, China, 2001: 938–942.
- [12] Yuan Y, Sun J, and Mao S. PFA algorithm for airborne spotlight SAR imaging with nonideal motions[J]. *IEE Proceedings Radar Sonar and Navigation*, 2002, 149(4): 174–182.
- [13] Xing Meng-dao, Jiang Xiu-wei, Wu Ren-biao, Zhou Feng, and Bao Zheng. Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2009, 47(8-2): 2870–2883.
- [14] 李刚, 许稼, 彭应宁, 夏香根. 一种稳健的机载雷达杂波多普勒参数估计方法 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(12): 2867-2870.
  Li Gang, Xu Jia, Peng Ying-ning, and Xia Xiang-gen. A

robust algorithm of doppler parameters estimation for airborne radar. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(12): 2867–2870.

- [15] 刘碧丹,韩松,王岩飞.图像幅度和值最小化自聚焦算法[J]. 电子与信息学报,2009,31(4):768-771.
  Liu Bi-dan, Han Song, and Wang Yan-fei. Minimizing sum of image amplitudes autofocus algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(4):768-771.
- [16] 邢孟道,保铮. 基于运动参数估计的 SAR 成像[J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1824–1828.
  Xing Meng-dao, and Bao Zheng. Motion parameter estimation based SAR imaging[J]. Acta Electronic Sinica, 2001, 29(12): 1824–1828.
- 杨 磊: 男, 1984 年生, 博士生, 从事聚束模式 SAR 成像方面的研究工作.
- 唐 禹: 男, 1976 年生, 副教授, 从事 SAR 成像算法、运动补 偿算法以及新体制雷达的研究.
- 邢孟道: 男,1975年生,教授,博士生导师,研究方向为雷达成 像和目标识别.
- 保 铮: 男,1927年生,教授,中国科学院院士,研究方向为数
   字信号处理、阵列信号处理、自适应信号处理和雷达成像.