

# 弹载曲线轨迹双基SAR反向滤波PFA成像与图像畸变校正算法

邓欢 李亚超\* 梅海文 全英汇 邢孟道  
(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:** 在弹载曲线轨迹双基SAR成像中, 三轴速度与加速度降低了传统的双基等效斜距模型精度, 也使得基于匀速直线平飞轨迹模型的极坐标格式算法(PFA)不再适用。受双平台加速度引入的空变运动误差影响, 传统的分子块补偿方法会造成图像子块间地物景象不连续问题, 影响后续的图像匹配应用。针对这些问题, 该文提出一种新的双基SAR成像算法——反向滤波PFA算法(BFPFA), 该算法是基于改进的通用化双基等效斜距模型(IGBERM), 利用PFA插值将频谱投影到地距平面, 通过构建空变相位误差与图像畸变联合补偿滤波器, 并采用反向映射插值, 实现在斜地转换过程中对运动误差、波前弯曲与图像畸变进行局部联合补偿, 获得的无畸变双基SAR地距图更有利于后续的图像匹配应用。最后, 仿真实验验证了所提算法的有效性。

**关键词:** 弹载双基SAR; 等效斜距模型; 双基极坐标格式算法; 空变运动误差; 畸变校正

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)11-2638-07

DOI: 10.11999/JEIT170994

## New Back-filtering PFA Imaging Algorithm and Distortion Correction Method for Missile-borne Bistatic SAR with Curved Track

DENG Huan LI Yachao MEI Haiwen QUAN Yinghui XING Mengdao

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

**Abstract:** The traditional bistatic equivalent range model has low accuracy and make the traditional Polar Format Algorithm (PFA) are inapplicable in missile-borne bistatic Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging with curved track due to the existing of three-axis velocity and acceleration. In addition, due to the existing of space-variant motion error introduced by acceleration, the traditional 2-D sub-block compensation method will cause the discontinuities between the image sub-blocks, thus affecting the subsequent image matching application. In view of these problems, this paper proposes a Back-Filtering PFA algorithm (BFPFA) which is based on the Improved Generalized Bistatic Equivalent Range Model (IGBERM). Constructing the combined compensating filter of space-variant phase error and geometric distortion, as well as reverse mapping interpolation, can realize the combined compensation of motion error, wavefront bending and geometric distortion in the process of oblique conversion, and obtain the SAR distance map without distortion, which is more conducive to the subsequent image matching applications. Finally, the simulations validate the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** Missile-borne bistatic SAR; Equivalent slanting distance model; Bistatic Polar Format Algorithm (PFA); Space-variant motion error; Distortion correction

### 1 引言

弹载双基SAR成像可有效提升导弹对前方复杂场景目标的高分辨探测能力, 在导弹寻的制导、静默打击等方面具有重要的军事应用价值<sup>[1]</sup>。在末制

导阶段, 导弹存在较大的三轴速度和加速度, 使得传统的基于匀速直线平飞轨迹建立的等效斜距模型<sup>[2,3]</sup>不再适用, 也使得基于该模型的成像算法难以与现有的运动补偿算法<sup>[4,5]</sup>相结合。针对双基SAR成像<sup>[6]</sup>, 现有的频域类成像算法有距离多普勒算法<sup>[7]</sup>、非线性变标算法及其改进算法<sup>[8-10]</sup>、频域变标算法<sup>[11]</sup>等, 这些方法利用方位平移不变性对回波数据的空变性进行统一校正, 因此运算效率较高。然而, 俯冲SAR垂直向下速度使得平移不变性不再满足, 使得这些频域类方法并不能直接应用。随着

收稿日期: 2017-10-24; 改回日期: 2018-08-13; 网络出版: 2018-08-20

\*通信作者: 李亚超 ycli@mail.xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61001211, 61303035, 61471283)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61001211, 61303035, 61471283)

成像需求的发展，更精确的2维波数域成像方法相继被提出，如距离徙动算法(RMA)<sup>[12,13]</sup>，极坐标格式算法(PFA)<sup>[14-16]</sup>以及它们的改进型。其中，RMA算法对飞行轨迹要求较高且进行1维插值；PFA算法在方位去斜(Deramp)处理后，对频谱2维线性插值处理，实现2维成像聚焦，现有的2维分离插值算法效率较高，可在高机动平台上快速实现。但现有算法均基于双基匀速直线平飞构型，不能直接应用于弹载曲线轨迹双基SAR成像中2维空变运动误差的处理。

综上所述，本文针对弹载曲线轨迹双基SAR成像中存在的诸多问题，提出了一种新的双基SAR成像算法——反向滤波PFA算法(BFPFA)。和现有文献方法相比，BFPFA具有以下创新思想，首先，提出改进的双基等效斜距模型，精度更高，且将双平台加速度与直线斜距模型分离；其次，提出的基于反向映射插值的运动误差与图像畸变局部联合补偿方法，使其算法时间复杂度小于BP算法的同时，继承了传统BP算法可以灵活地选择成像平

面、获得无畸变SAR地距图等优势；最后，本文利用PFA插值将信号频谱直接投影到地距平面，可以在频域实现频谱修剪与像素网格重采样，在几何失真校正过程中网格分辨率变化较小，图像质量更高，因此在图像匹配应用中更有优势。仿真实验验证了本文所提算法的有效性。

## 2 改进的通用化双基等效斜距模型

图1为弹载曲线轨迹双基SAR成像几何构型，图中 $T, R$ 分别表示雷达发射机与接收机。 $\theta_T$ 和 $\theta_R$ 分别为发射机与接收机的瞬时方位角， $R_{0T}, R_{0R}$ 分别为发射机与接收机相对于场景中心的瞬时斜距， $R_T, R_R$ 分别为发射机与接收机相对于场景中任意目标点 $P(x_p, y_p, 0)$ 的瞬时斜距。令 $t_m$ 为慢时间，设 $t_m = 0$ 时，接收机和发射机的位置分别为 $(x_R, y_R, H_R)$ 和 $(x_T, y_T, H_T)$ ，其速度矢量分别为 $(v_{xR}, v_{yR}, v_{zR})$ 和 $(v_{xT}, v_{yT}, v_{zT})$ ，加速度矢量为 $(a_{xR}, a_{yR}, a_{zR})$ 和 $(a_{xT}, a_{yT}, a_{zT})$ 。发射机与接收机到点 $P$ 的瞬时斜距为

$$R_{bf}(t_m) = \sqrt{(x_R + v_{xR}t_m + 0.5a_{xR}t_m^2 - x_p)^2 + (y_R + v_{yR}t_m + 0.5a_{yR}t_m^2 - y_p)^2 + (H_R + v_{zR}t_m + 0.5a_{zR}t_m^2)^2} + \sqrt{(x_T + v_{xT}t_m + 0.5a_{xT}t_m^2 - x_p)^2 + (y_T + v_{yT}t_m + 0.5a_{yT}t_m^2 - y_p)^2 + (H_T + v_{zT}t_m + 0.5a_{zT}t_m^2)^2} \quad (1)$$

式中， $\mu_{Ti}, \mu_{Ri}, i = 1, 2, 3, 4$ 分别表示斜距表达式中方位慢时间的各阶系数。

传统双基SAR成像算法大多采用4阶泰勒展开对式(1)中斜距进行近似处理，但其展开系数中仍包含了双平台运动参数，且其2维频谱的推导过程非常复杂，限制了一些高精度成像算法的应用。本文提出一种改进的通用化双基等效斜距模型(IGBERM)，其表达式为

$$R_{bfe}(t_m) = R_R + R_T + \sum_{i=2}^4 (A_{Ri}(x_p, y_p) + A_{Ti}(x_p, y_p)) t_m^i \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} R_R(x_p, y_p) &= \sqrt{(x_R + v_{xR}t_m - x_p)^2 + (y_R + v_{yR}t_m - y_p)^2 + (H_R + v_{zR}t_m)^2} \\ R_T(x_p, y_p) &= \sqrt{(x_T + v_{xT}t_m - x_p)^2 + (y_T + v_{yT}t_m - y_p)^2 + (H_T + v_{zT}t_m)^2} \\ A_{Ri}(x_p, y_p) &= k_{Ri} - C_{Ri} \\ A_{Ti}(x_p, y_p) &= k_{Ti} - C_{Ti} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中， $C_{Ri}, C_{Ti}$ 分别为 $R_R, R_T$ 的泰勒展开系数， $k_{Ri}, k_{Ti}$ 为 $R_{bf}(t_m)$ 的 $i$ 阶泰勒展开系数。式(2)中的

第3项为平台加速度引入的空变运动误差项，这在后续成像聚焦过程中会进行补偿。

## 3 基于IGBERM的BFPFA成像算法

首先，假设雷达发射线性调频信号，由式(2)的通用化等效斜距公式，可得双基俯冲构型SAR回波信号经过脉冲压缩处理后的波数域表达式为

$$S_{bf}(k_r, t_m) = W_r(k_r) w_a(t_m) \exp(-jk_r R_{bfe}(t_m)) \quad (4)$$

式中， $W_r(\cdot)$ 表示距离窗函数， $w_a(\cdot)$ 表示方位窗函数， $\gamma$ 为距离向调频率。 $k_r$ 为距离波数， $k_r = \frac{2\pi}{c}(f_r + f_c)$ 。

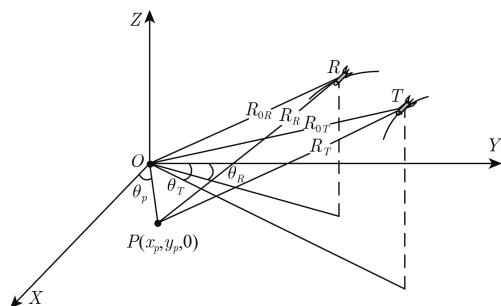


图1 弹载曲线轨迹双基SAR成像几何构型

### 3.1 方位频谱恢复与压缩

由式(3)中等效斜距模型可知, 双基SAR瞬时斜距模型包括匀速直线斜距模型和加速度带来的运动误差扰动项。对于波长较短的弹载SAR平台来说, 空变运动误差扰动项会带来回波信号多普勒调频率的剧烈变化, 从而严重影响方位频谱宽度<sup>[3]</sup>。方位频谱恢复与压缩包括空变运动误差粗补偿和方位Deramp处理, 其目的在于消除非空变的运动误差扰动和非空变的方位解析相位项, 使信号频谱方位压缩, 方便后续频谱旋转插值到地距平面。本文以场景中心点(0,0)为参考点构建运动误差粗补偿函数与方位去斜Deramp函数为

$$H_{\text{Acc}}(k_r, t_m) = \exp\left(jk_r \sum_{i=2}^4 (A_{Ri0}(0,0) + A_{Ti0}(0,0)) t_m^i\right) \quad (5)$$

$$H_{\text{Drmp}}(k_r, t_m) = \exp(jk_r(R_{0R} + R_{0T})) \quad (6)$$

式中, 下标含“0”的变量表示该变量在场景中心点(0,0)位置的取值。经过频谱恢复与方位压缩处理后, 忽略与成像聚焦无关的幅度项, 回波信号表达式为

$$S_{\text{bf}}(k_r, t_m) = \exp\left(-jk_r(R_R - R_{0R} + R_T - R_{0T}) - jk_r \sum_{i=2}^4 D_i(x_p, y_p) t_m^i\right) \quad (7)$$

$$D_i(x_p, y_p) = (A_{Ri} - A_{Ri0} + A_{Ti} - A_{Ti0})|_{i=2,3,4} \quad (8)$$

式(7)中第1项为信号相位解析项, 令其对应的斜距项为 $R_{\text{Drmp}}$ ; 第2项表示2维空变的运动误差校正残留项。

$$\Phi(k'_x, k'_y) \approx -\left(\Delta_{10}(k'_x - k'_{xc}) + \Delta_{11}k'_y + \Delta_{20}(k'_x - k'_{xc})^2 + \Delta_{21}k'^2_y + \Delta_{22}(k'_x - k'_{xc})k'_y\right) \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{10} &= \frac{R_{\text{Drmp}}\Gamma'_y - R'_{\text{Drmp}}\Gamma_y}{\Gamma_x\Gamma'_y - \Gamma'_x\Gamma_y} \cos\beta + \frac{R_{\text{Drmp}}\Gamma'_x - R'_{\text{Drmp}}\Gamma_x}{\Gamma_y\Gamma'_x - \Gamma'_y\Gamma_x} \sin\beta \\ \Delta_{11} &= -\frac{R_{\text{Drmp}}\Gamma'_y - R'_{\text{Drmp}}\Gamma_y}{\Gamma_x\Gamma'_y - \Gamma'_x\Gamma_y} \sin\beta + \frac{R_{\text{Drmp}}\Gamma'_x - R'_{\text{Drmp}}\Gamma_x}{\Gamma_y\Gamma'_x - \Gamma'_y\Gamma_x} \cos\beta \\ \Delta_{21} &= \frac{1}{2(\Gamma'_x\Gamma_y - \Gamma_x\Gamma'_y)k_{rc}} (\Gamma_y F'_y \sin^2\beta - \Gamma_y F'_y \sin\beta \cos\beta - \Gamma_x F'_y \cos^2\beta + \Gamma_x F'_x \sin\beta \cos\beta) \\ \Delta_{20} &= \Delta_{22} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} R'_{\text{Drmp}} &= \partial R_{\text{Drmp}} / \partial t_m \\ \Gamma'_x &= \partial \Gamma_x / \partial t_m, \Gamma'_y = \partial \Gamma_y / \partial t_m \\ F'_x &= \frac{\partial}{\partial t_m} \left( \frac{R_{\text{Drmp}}\Gamma'_y - R'_{\text{Drmp}}\Gamma_y}{\Gamma_x\Gamma'_y - \Gamma'_x\Gamma_y} \right), F'_y = \frac{\partial}{\partial t_m} \left( \frac{R_{\text{Drmp}}\Gamma'_x - R'_{\text{Drmp}}\Gamma_x}{\Gamma_y\Gamma'_x - \Gamma'_y\Gamma_x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

### 3.2 2维频谱极坐标插值

在方位频谱恢复与Deramp操作后, 频谱仍然存在距离和方位耦合, 无法通过2维IFT聚焦成像。本文通过构建地平面距离和方位波数 $k_x, k_y$ , 将回波数据投影到地距平面, 避免了文献[2]中在等效斜距平面成像聚焦带来的双平台运动参量耦合与空变等问题。地平面距离和方位波数 $k_x, k_y$ 定义如式(9):

$$\left. \begin{aligned} k_x &= k_r \Gamma_x(t_m) \\ k_y &= k_r \Gamma_y(t_m) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_x(t_m) &= -\left(\frac{(x_R + v_{xR}t_m)}{R_{0R}} + \frac{(x_T + v_{xT}t_m)}{R_{0T}}\right) \\ \Gamma_y(t_m) &= -\left(\frac{(y_R + v_{yR}t_m)}{R_{0R}} + \frac{(y_T + v_{yT}t_m)}{R_{0T}}\right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

在完成2维频谱插值后, 信号频谱由 $(k_r, t_m)$ 域变为 $(k_x, k_y)$ 域。原坐标 $(k_r, t_m)$ 中的信号频谱由均匀采样变成非均匀采样, 对应到新坐标 $(k_x, k_y)$ 中, 频谱由非均匀变成均匀。与新坐标 $(k_x, k_y)$ 相对应的新的波数变量可以用 $(k'_x, k'_y)$ 表示, 其取值可以通过式(9)求得<sup>[16]</sup>。对于双基斜视SAR, 其2维频谱的支撑域为倾斜的平行四边形, 倾斜角为双基角 $\beta$ 。为获取最大的距离和方位带宽, 本文通过将支撑域旋转角度 $\beta$ , 将回波数据的支撑域由 $(k_x, k_y)$ 旋转到 $(k'_x, k'_y)$ 。双基角 $\beta$ 的表达式为

$$\beta = \tan^{-1}(\Gamma_y/\Gamma_x) \quad (11)$$

在斜视成像情况下, 成像坐标系由 $(k_x, k_y)$ 系旋转到 $(k'_x, k'_y)$ 坐标系, 因此空变相位误差补偿及图像畸变校正均应在 $(k'_x, k'_y)$ 坐标系中进行操作。回波信号经过2维插值处理后, 由 $(k_r, t_m)$ 域变到 $(k'_x, k'_y)$ 域, 参考文献[15]对式(7)中信号解析项关于 $(k'_x, k'_y)$ 在 $(k'_{xc}, 0)$ 位置2阶泰勒展开近似有

在式(13)、式(14)中,  $t_m = 0$ , and  $k_{rc} = 4\pi f_c/c$ 。将式(13)代入式(7), 并进行距离向IFFT, 得到

$$S_{bf}(X, k'_y) = \text{sinc}(X_{\text{img}} - \Delta_{10}) \exp(-j(\Delta_{11}k'_y + \Delta_{21}k_y^2)) \exp\left(j \frac{\cos \beta k'_{xc} - \sin \beta k'_y}{\cos \psi_R \sin \theta_R + \cos \psi_T \sin \theta_T} \sum_{i=2}^4 D_i(x_p, y_p) t_m^{*i}\right) \quad (15)$$

式(15)中第2项指数项为空变的运动误差残留项, 由于插值处理后, 该项在 $(X_{\text{img}}, k'_y)$ 域沿距离向空变误差可忽略, 因此在此做近似处理, 令  $k'_x = k'_{xc}$ ,  $k'_{xc}$ 为 $k'_x$ 在 $k_{rc} = 4\pi f_c/c$ ,  $t_m = 0$ 时的取值。在本文第4节对该项的近似进行了仿真与分析。此外, 通过波前弯曲补偿, 成像场景可以得到扩展, 扩展后的最大成像幅宽参考文献[15]。为提升算法的实时性, 对式(17)进行方位FFT, 使图像粗聚焦。2维粗聚焦图像表达式为

$$S_{bf}(X_{\text{img}}, Y_{\text{img}}) = \text{sinc}(X_{\text{img}} - \Delta_{10}) \text{sinc}(Y_{\text{img}} - \Delta_{11}) \cdot \exp(j\varphi_{\text{temp}}(X_{\text{img}}, Y_{\text{img}})) \quad (16)$$

式中,  $\varphi_{\text{temp}}(X_{\text{img}}, Y_{\text{img}})$ 为2维图像域的误差相位。

### 3.3 空变相位误差与图像畸变局部联合补偿

本文根据BP算法中反向投影的思想, 提出一种基于逆映射插值的空变相位误差与图像畸变局部联合补偿的方法, 可直接获取无畸变SAR地距图, 其步骤如下:

步骤1 在地平面沿X轴、Y轴方向铺设一组  $M \times N$  的网格;

步骤2 对地面网格点 $(x_p, y_p)$ , 通过式(13)找到其在像平面的位置点 $(x_{\text{img}}, y_{\text{img}})$ ,  $x_{\text{img}} = \Delta_{10}$ ,  $y_{\text{img}} = \Delta_{11}$ ;

步骤3 以图像域中点 $(x_{\text{img}}, y_{\text{img}})$ 为中心加窗截取  $N_m \times N_m$  个数据单元, 再进行方位IFFT, 并乘以波前弯曲补偿因子  $H_{\text{WBC}}$  及运动误差残留补偿因子  $H_{\text{MEC}}$ , 并进行方位FFT得到补偿后的局部聚焦图像。  $N_m$  取值大于sinc函数插值模板的行数  $m$  的大小, 但远小于方位采样点数;

$$H_{\text{WBC}} = \exp(j\Delta_{21}k_y^2) \quad (17)$$

$$H_{\text{MEC}} = \exp\left(-j \frac{\cos \beta k'_{xc} - \sin \beta k'_y}{(\cos \psi_R \sin \theta_R + \cos \psi_T \sin \theta_T)} \sum_{i=2}^4 D_i(x_p, y_p) t_m^{*i}\right) \quad (18)$$

步骤4 构建  $m \times m$  大小的sinc函数插值模板, 取位置点 $(x_{\text{img}}, y_{\text{img}})$ 周围  $m \times m$  大小的图像, 利用sinc插值, 得到地面网格 $(x_p, y_p)$ 对应的像素值;

步骤5 重复步骤1—步骤4, 直至所有地平面网格点插值完, 获得最终的地距SAR图像。

## 4 实际应用分析

这里针对3.2节中的空变误差进行处理的合理性进行量化分析, 并对所提算法总的运算量进行分析。

### 4.1 空变误差近似处理分析

为提升本文所提BFPFA算法实时性, 在式(15)中, 对空变误差残留项进行近似处理, 忽略了空变距离徙动与距离相位误差对成像的影响。以表1中参数进行仿真, 验证近似处理的合理性, 成像范围  $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 。场景边缘点的距离走动和弯曲量如图2所示。由图2(a)中结果可知, 边缘点最大距离徙动约为0.015 m, 因此当距离单元大于0.06 m时, 不会出现越距离徙动。图2(b)为边缘点距离相位误差结果, 由图可知, 残留的距离相位误差为  $\pi/4$  的  $2 \times 10^{-4}$  倍, 对距离向聚焦的影响亦可忽略。因此, 式(15)中模型近似带来的距离徙动误差和距离相位误差均可忽略。

### 4.2 运算量分析

本文所提BFPFA主要包含2次距离和3次方位FFT运算, 2次复乘, 1次2维插值, 1次2维畸变校正插值。假如采用8点sinc插值, 距离和方位采样点数为  $N_r \times N_a$  点, 地距像素点数为  $N_g \times N_g$ , 数据截取数为  $N_m \times N_m$ 。那么采用非并行执行程序总的运算量为

$$C = 3N_a N_r \log_2 N_r + 17N_r N_a + 64N_g^2 + N_m^2 N_g^2 + 2(N_m^2 \log_2 N_m) N_g^2 \quad (19)$$

表1 成像仿真参数

载频(GHz)	17	距离带宽(MHz)	200
脉冲重复频率(kHz)	10	采样率(MHz)	250
接收机坐标(km)	(4.47, 11.94, 22.08)	发射机位置(km)	(6.64, 11.28, 23.62)
接收机速度(m/s)	(1100, -680, -346)	发射机速度(m/s)	(1000, -450, -294)
接收机加速度(m/s <sup>2</sup> )	(15, 25, -10)	发射机加速度(m/s <sup>2</sup> )	(15, -35, -20)

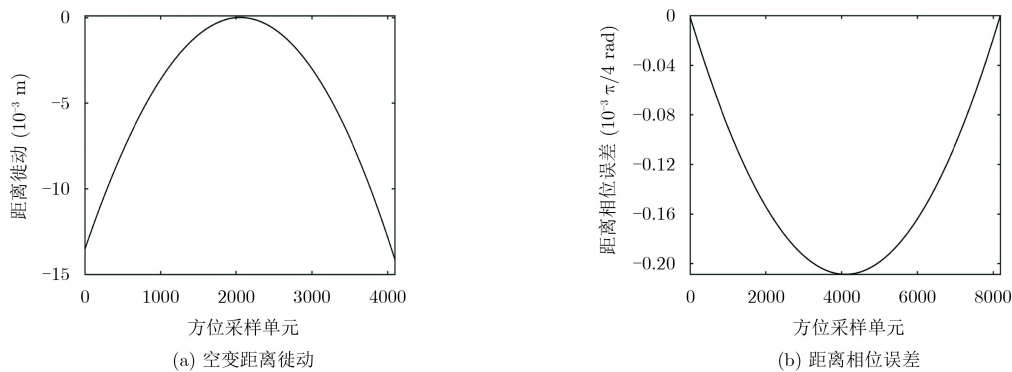


图2 空变距离徙动与距离相位误差

## 5 仿真数据结果与分析

为验证所提基于IGBERM模型的有效性，以表1中成像参数进行仿真实验，场景大小为4 km×4 km，合成孔径时间为1 s。图3为两种模型对应的相位误差结果，这里以 $\pi/4$ 的倍数作为输出。对于表1中成像参数，4阶泰勒展开斜距模型引入的相位误差远大于本文所提基于IGBERM的模型，当误差相位大于 $\pi/4$ 时，会造成目标点方位向散焦；而本文提出的基于IGBERM模型则小于 $\pi/4$ ，因此IGBERM模型更适合弹载双基SAR成像。

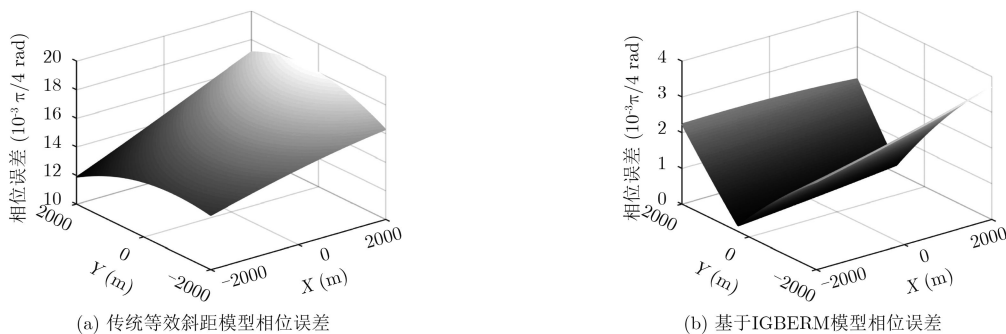


图3 相位误差结果对比

位剖面图，由于忽略了加速度运动误差的2维空变特性，因此对于边缘点，存在一个较大的方位相位误差使得方位散焦，方位分辨率严重下降。图6给出了本文所提算法的成像结果，由于对空变相位误差进行了补偿，边缘点1和点3的第1零点和第1旁瓣均被拉低，接近参考点2。图7进一步给出了所提算法结果的2维等高线图，可以看出主副瓣明显分开，与参考点相近，验证了所提算法的有效性。

(2) 在地平面沿X方向和Y方向布置一组 $11 \times 11$ 的点阵，场景大小为1 km×1 km，地距网格间距为1 m×1 m，2维sinc函数模板大小为 $8 \times 8$ 。图8给出了图像畸变校正前后的结果图，容易发现图8(a)中聚焦图像存在较大畸变，且边缘点存在一定程度的散焦，整个图像近似“菱形”。经过局部联合补偿

为验证本文所提BFPFA算法的有效性，以表1参数进行仿真。在图4所示的 $3 \times 3$ 仿真布点中，点阵大小为3.0 km×1.5 km；双基角 $\beta$ 约为 $64.57^\circ$ ，地平面向分辨率为0.5 m。在仿真示意图中选取场景中心点2作为参考点，点1和点3为最大边界点，作为对比。

为了对算法进行更好的分析，将仿真验证分为两部分，分别验证所提空变运动误差补偿与所提图像畸变校正方法的有效性。

(1) 图5给出了采用文献[15]所提参考算法的方

后，整个图像呈现与仿真布点一致的“正方形”点阵，如图8(b)所示，验证了所提联合补偿方法的有效性。

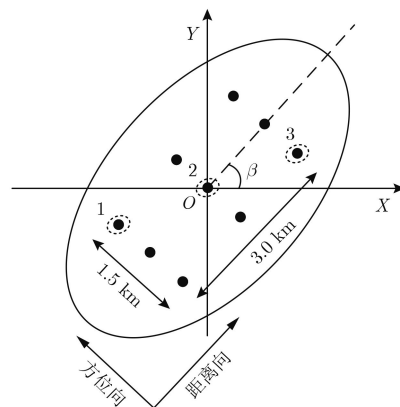


图4 仿真布点示意图

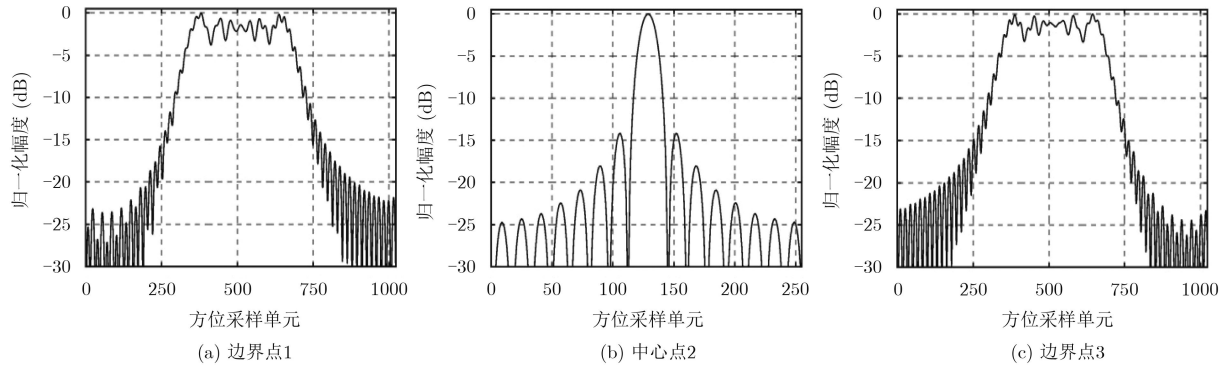


图5 参考算法方位剖面图

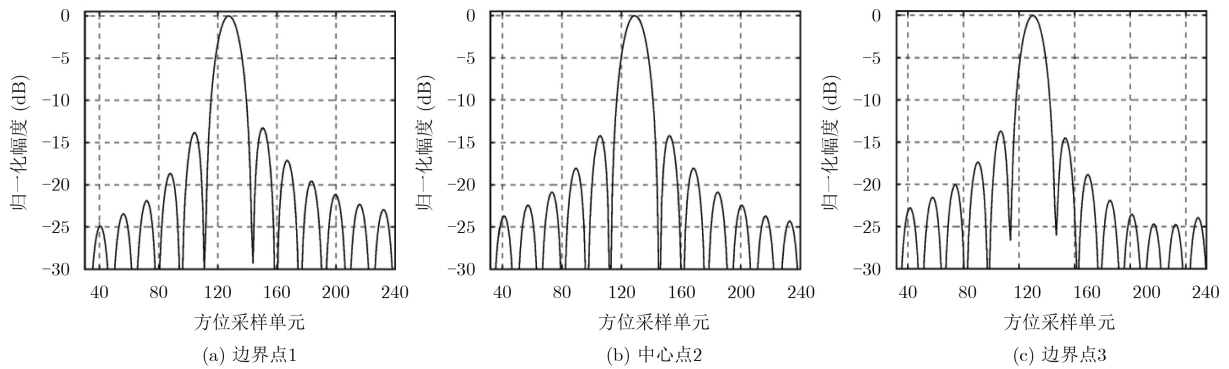


图6 所提算法点聚焦方位剖面图

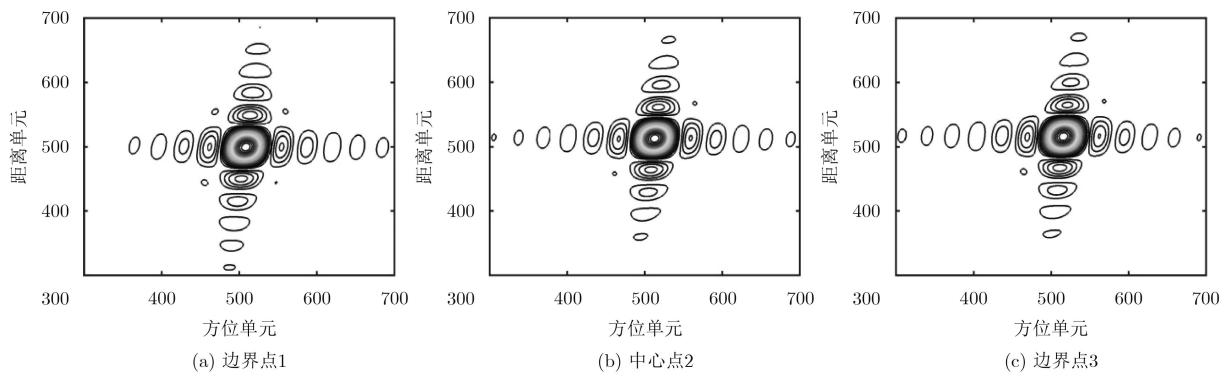


图7 所提算法点聚焦等高线图

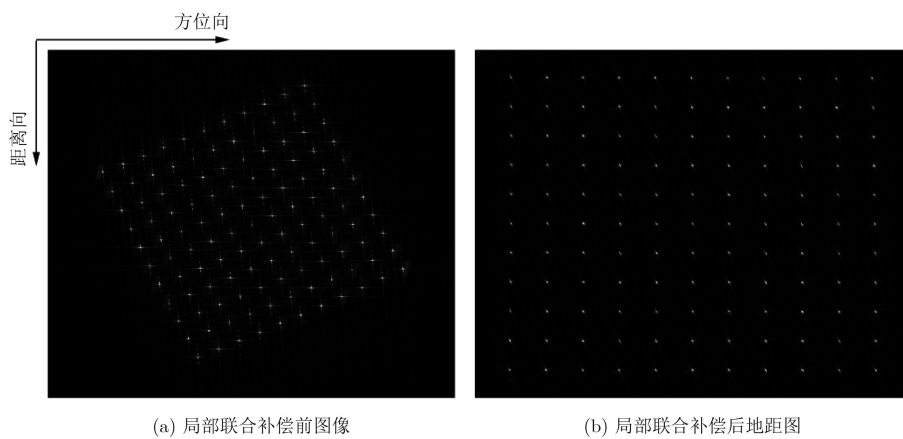


图8 空变相位误差与图像畸变联合补偿结果

## 6 结束语

本文研究了弹载曲线轨迹双基SAR成像问题,提出了一种基于双基等效斜距模型的BFPFA算法及其图像畸变校正方法。该方法采用了BP算法逆投影的方式,对空变相位误差与图像畸变进行局部联合补偿,运算量小于BP算法的同时,继承了BP算法可任意选择成像平面、易于多核并行化实现,可直接获取无畸变SAR地距图的优点。最终,仿真实验验证了所提算法的有效性。

### 参考文献

- [1] PU Wei, LI Wenchao, and LÜ Youxin, *et al.* An extended omega-K algorithm with integrated motion compensation for bistatic forward-looking SAR[C]. IEEE Radar Conference, Arlington, USA, 2015: 1291–1295. doi: [10.1109/RADAR.2015.7131194](https://doi.org/10.1109/RADAR.2015.7131194).
- [2] 孟自强, 李亚超, 邢孟道, 等. 基于斜距等效的弹载双基前视SAR相位空变校正方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(3): 613–621. doi: [10.11999/JEIT150782](https://doi.org/10.11999/JEIT150782).  
MENG Ziqiang, LI Yachao, XING Mengdao, *et al.* Phase space-variance correction method for missile-borne bistatic forward-looking SAR based on equivalent range equation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(3): 613–621. doi: [10.11999/JEIT150782](https://doi.org/10.11999/JEIT150782).
- [3] LI Zhenyu, XING Mengdao, LIANG Yi, *et al.* A frequency-domain imaging algorithm for highly squinted SAR mounted on maneuvering platforms with nonlinear trajectory[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2016, 54(7): 4023–4038. doi: [10.1109/TGRS.2016.2535391](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2535391).
- [4] ZHANG Lei, QIAO Zhijun, XING Mengdao, *et al.* A robust motion compensation approach for UAV SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2012, 50(8): 3202–3218. doi: [10.1109/TGRS.2011.2180392](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2180392).
- [5] ZENG Letian, LIANG Yi, XING Mengdao, *et al.* A novel motion compensation approach for airborne spotlight SAR of high-resolution and high-squint mode[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2016, 13(3): 429–433. doi: [10.1109/LGRS.2016.2517099](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2517099).
- [6] 丁金闪, OTMAR L, HOLGER N, 等. 双基SAR成像的点目标解析频谱研究[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 763–767.  
DING Jinshan, OTMAR L, HOLGER N, *et al.* Study of point target spectrum for bistatic SAR imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 763–767.
- [7] 孟自强, 李亚超, 邢孟道, 等. 弹载双基前视SAR扩展场景成像算法设计[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 31–37. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2016.03.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2016.03.006).  
MENG Ziqiang, LI Yachao, XING Mengdao, *et al.* Imaging method for the extended scene of missile-borne bistatic forward-looking SAR[J]. *Journal of Xidian University*, 2016, 43(3): 31–37. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2016.03.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2016.03.006).
- [8] CHEN Si, YUAN Yue, ZHANG Shuning, *et al.* A new imaging algorithm for forward-looking missile-borne bistatic SAR[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 9(4): 1543–1552. doi: [10.1109/JSTARS.2015.2507260](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2507260).
- [9] ZENG Hongcheng, WANG Pengbo, CHEN Jie, *et al.* A novel general imaging formation algorithm for GNSS-based bistatic SAR[J]. *Sensors*, 2016, 16(3): 294–308. doi: [10.3390/s16030294](https://doi.org/10.3390/s16030294).
- [10] LI Dong, WANG Wei, LIU Hongqing, *et al.* Focusing highly squinted azimuth variant bistatic SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 52(6): 2715–2730. doi: [10.1109/TAES.2016.150491](https://doi.org/10.1109/TAES.2016.150491).
- [11] LI Yanping, ZHANG Zhenhua, XING Mengdao, *et al.* Bistatic spotlight SAR processing using the frequency-scaling algorithm[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2008, 5(1): 48–52. doi: [10.1109/LGRS.2007.907306](https://doi.org/10.1109/LGRS.2007.907306).
- [12] WANG R, LOFFELD O, NIES H, *et al.* Focusing spaceborne/airborne hybrid bistatic SAR data using wavenumber-domain algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 47(7): 2275–2283. doi: [10.1109/TGRS.2008.2010852](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010852).
- [13] LIU Baochang, WANG Tong, WU Qisong, *et al.* Bistatic SAR data focusing using an omega-K algorithm based on method of series reversion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2899–2912. doi: [10.1109/TGRS.2009.2017522](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2017522).
- [14] RIGLING B D and MOSES R L. Polar format algorithm for bistatic SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2004, 40(4): 1147–1159. doi: [10.1109/TAES.2004.1386870](https://doi.org/10.1109/TAES.2004.1386870).
- [15] WANG Xin, ZHU Daiyin, MAO Xinhua, *et al.* Space-variant filtering for wavefront curvature correction in polar formatted bistatic SAR image[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(2): 940–950. doi: [10.1109/TAES.2012.6178040](https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6178040).
- [16] 唐世阳. 曲线运动轨迹SAR成像方法研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2016: 93–120.  
TANG Shiyang. Study on imaging methods for SAR on curved-path platforms[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2016: 93–120.

邓欢: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为弹载斜视SAR成像、图像匹配定位。

李亚超: 男, 1981年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达成像和实时信号处理。

梅海文: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为弹载双基SAR成像。

全英汇: 男, 1981年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达实时信号处理。

邢孟道: 男, 1975年生, 博士, 教授, 研究方向为SAR/ISAR成像、动目标检测等。