

# 一种高精度的ISAR转动补偿和方位定标方法

刘鑫阁\* 邢孟道 孙光才

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

(西安电子科技大学信息感知技术协同创新中心 西安 710071)

**摘要:** 传统逆合成孔径雷达(ISAR)成像算法忽略了目标回波的高阶转动相位的影响,导致方位向聚焦效果较差,且无法直接从目标图像中获取目标尺寸信息。该文提出一种转动补偿和方位定标方法。该方法采用回波的全部方位信息,通过构造局部平均多普勒趋势(LADT)信号获取目标回波的多普勒变化趋势。进一步利用随机采样一致(RANSAC)算法估计多普勒调频率及目标有效转动速度,实现高精度转动补偿与方位定标。仿真与实测数据实验验证了该方法的有效性。

**关键词:** 逆合成孔径雷达; 转动补偿; 方位定标; 多普勒调频率; 随机采样一致

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)09-2250-08

DOI: 10.11999/JEIT171209

## A High-precision Method of the Rotation Compensation and Cross-range Scaling for ISAR Imaging

LIU Xinge XING Mengdao SUN Guangcai

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

(Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understand,

Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Traditional Inverse SAR (ISAR) imaging algorithms neglect the impact of high-order rotational phase in the signal, which may make ISAR images of a target defocused. Further, the size of a target can not be obtained from ISAR image directly. In this study, an effective method to achieve the rotation compensation and cross-range scaling for ISAR imaging is proposed. Firstly, all the signals of the target are used to form the Local Average Doppler Trend (LADT) signal. Subsequently, RANdom SAmple Consensus (RANSAC) algorithm is performed to estimate the Doppler rate and effective rotational velocity. Finally, high-precision rotation compensation and cross-range scaling can be accomplished. Simulation and real data experiments validate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** Inverse SAR (ISAR); Rotation compensation; Cross-range scaling; Doppler rate; RANdom SAmple Consensus (RANSAC)

### 1 引言

作为识别非合作目标的一种重要手段,逆合成孔径雷达(Inverse SAR, ISAR)可全天时、全天候地获取非合作目标的高分辨图像并提供其结构和形状信息<sup>[1-7]</sup>。传统ISAR成像算法,如距离-多普勒(Range-Doppler, RD)算法,忽略了目标转动引起

的距离空变相位2次项的影响,导致ISAR图像方位向聚焦效果较差<sup>[8]</sup>。又因ISAR图像常位于距离-多普勒域,目标尺寸信息无法直接从图像中获取。为获得精聚焦ISAR图像及目标尺寸,需估计目标有效转速<sup>[9-14]</sup>。可依据目标有效转速的相关估计信息构造补偿函数,完成转动补偿及方位定标,得到精聚焦ISAR定标图像。因此,高精度估计目标有效转速是ISAR转动补偿以及方位定标中的关键问题。

针对有效转速估计问题,文献<sup>[9]</sup>提出一种基于特显点提取的转动特性估计方法,该方法提取图像不同距离单元中合适的特显点,滑窗求解特显点多普勒频率历程,以此估计目标有效转速。实际操作中,提取特显点操作容易造成散射点能量损失,并

收稿日期: 2017-12-21; 改回日期: 2018-05-02; 网络出版: 2018-07-12

\*通信作者: 刘鑫阁 liuxinge1994@163.com

基金项目: 国家自然科学基金创新群体(61621005)

Foundation Item: The Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (61621005)

对特显点的质量、图像分辨率等都有较高的要求。文献[10]提出一种Radon-模糊变换(Radon-Ambiguity Transform, RAT)方法,在不同距离单元回波的模糊平面上搜索回波多普勒调频率,从而估计目标转速。其中,搜索调频率的操作可能受到初值和搜索步长等因素的影响。文献[11]提出一种基于子图像对比度最大化的转动参数估计方法,该方法通过分割目标原始RD图像,以最大化子图像对比度为准则,搜索估计各子图像散射中心的多普勒调频率,从而估计目标转速。不合理的图像分割可能使估计误差增大,搜索步长和初值的选择不当也会对估计精度产生一定的影响。文献[12]提出一种基于图像锐化度最大化的转动参数估计方法,该方法需考虑距离中心偏差对目标有效转速的影响,联合估计距离中心偏差和目标有效转速,确定使图像锐化度最大的联合参数为最优解。实际上,联合估计距离中心偏差相当于引入一个新的估计量,增加了转速估计的不确定性。

针对上述问题,本文提出一种高精度ISAR转动补偿和方位定标方法,适用于非合作目标短时间内平稳运动的情况。考虑到提取散射点相位特性的局限性,该方法利用目标平动补偿后的全部方位向信息构造局部平均多普勒趋势(Local Average Doppler Trend, LADT)信号,获得回波多普勒变化趋势,由此估计各距离单元回波的多普勒调频率。再依据多普勒调频率与散射点距离位置的关系,在参数估计操作中引入随机采样一致(RANdom SAmple Consensus, RANSAC)算法<sup>[15,16]</sup>以减少相位跳变和噪声的影响,解算出目标的有效转速,完成高精度转动补偿和方位定标,得到精聚焦的ISAR定标图像。该方法无需考虑距离中心偏差的影响,仿真与实测数据实验验证了本方法的有效性。

## 2 信号分析

ISAR成像几何模型如图1所示,雷达视线方向为Y轴正方向,坐标系XOY确定成像平面。当观测时间较短时,ISAR目标可近似看作平稳运动,即转速恒定<sup>[17-20]</sup>。设目标上某散射点p的坐标为 $(X_p, Y_p)$ ,目标在成像平面XOY上的恒定有效转速为 $\Omega$ , $t_m$ 为方位时间,波长为 $\lambda$ 。则散射点p与雷达的瞬时斜距 $R_p(t_m)$ 可表示为

$$R_p(t_m) = R_{p,0} + R_{p,v}(t_m) + R_{p,\Omega}(t_m) \quad (1)$$

其中, $R_{p,0}$ 是散射点p到雷达的初始距离, $R_{p,v}(t_m)$ 是目标平动引起的距离变化, $R_{p,\Omega}(t_m)$ 是目标转动引起的距离变化。

对目标回波作平动补偿<sup>[17-19]</sup>后,目标平动对应的斜距 $R_{p,v}(t_m)$ 项被去除,目标可等效为平面转台

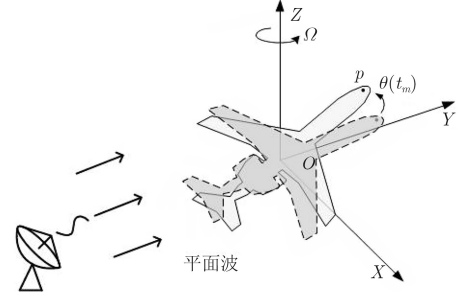


图1 ISAR成像几何模型

目标。假设目标逆时针旋转一个微小角度 $\theta(t_m) = \Omega t_m$ ,对 $\sin \theta(t_m)$ 和 $\cos \theta(t_m)$ 分别进行泰勒二阶展开,忽略常数项 $R_{p,0}$ ,则平动补偿后散射点的瞬时斜距表达式可近似表达为

$$\begin{aligned} R_p(t_m) &\approx R_{p,\Omega}(t_m) \approx X_p \sin \theta(t_m) + Y_p \cos \theta(t_m) \\ &\approx X_p \Omega t_m + Y_p \left( 1 - (\Omega t_m)^2 / 2 \right) \end{aligned} \quad (2)$$

设第k个距离单元下存在P个散射点,则平动补偿后的目标回波可近似表示为

$$\begin{aligned} s_k(t_m) &= \sum_{i=1}^P A_i \exp(j\varphi_{i0}) \cdot \exp(-j4\pi/\lambda \cdot R_p(t_m)) \\ &= \sum_{i=1}^P A_i \exp(j\varphi_{i0}) \cdot \exp\left(-j4\pi/\lambda \cdot \left(X_i \Omega t_m + Y_i \left(1 - (\Omega t_m)^2 / 2\right)\right)\right) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $A_i$ 为该距离单元内第i个散射点对应的复幅度, $\varphi_{i0}$ 为散射点起始相位。对于第k个距离单元下的所有散射点,其纵坐标相等并可用 $Y_k$ 统一表示,则式(3)可改写为

$$\begin{aligned} s_k(t_m) &= \sum_{i=1}^P \tilde{A}_i \exp\left(-j4\pi/\lambda \cdot \left(X_i \Omega t_m - Y_k (\Omega t_m)^2 / 2\right)\right) \\ &= \sum_{i=1}^P \tilde{A}_i \exp(j2\pi(f_{dc,i} + \gamma_k t_m / 2) \cdot t_m) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\tilde{A}_i = A_i \exp(j\varphi_{i0}) \cdot \exp(-j4\pi/\lambda \cdot Y_k)$ , $f_{dc,i} = -2X_i \Omega / \lambda$ , $\gamma_k = 2Y_k \Omega^2 / \lambda$ , $k = 1, 2, \dots, N$ ,N为距离向采样点数。

由式(4)可知,回波相位包含一个距离空变的2次项 $2\pi \cdot (\gamma_k t_m^2 / 2)$ ,即存在多普勒调频率 $\gamma_k = 2Y_k \Omega^2 / \lambda$ 使回波多普勒随方位时间变化,回波表现为方位向线性调频信号形式。依据多普勒调频率与目标转速的关系,可通过估计各距离单元回波的多普勒调频率 $\hat{\gamma}_k$ 解算出目标有效转速估计值 $\hat{\Omega}$ 。再利用 $\hat{\gamma}_k$ 构造补偿函数,补偿目标回波距离空变相

位2次项, 得到精聚焦ISAR图像。进一步利用 $\hat{\Omega}$ 计算方位分辨率 $\hat{\rho}_a = \lambda / (2\hat{\Omega}T_a)$ , 其中,  $T_a$ 为相干积累时间, 将ISAR图像由距离-多普勒域转换到距离-方位距离域, 完成定标, 获得尺寸。

### 3 转动补偿及方位定标方法

#### 3.1 LADT信号特性分析

考虑目标回波相位难以解析表示这一特性, 本文方法针对回波的各方位时间段构造多个LADT信号, 以获取回波的对应局局部平均多普勒趋势信息, 从而反映出回波多普勒变化趋势。将方位时间 $t_m$ 离散化为 $m \cdot \Delta T$ , 其中,  $m = 1, 2, \dots, M$ 为方位向采样位置,  $\Delta T = T_a/M$ ,  $M$ 为方位向采样总点数。第 $k$ 个距离单元目标回波信号形式可由式(4)改写为

$$s_k(m) = \sum_{i=1}^P \tilde{A}_i \exp\left(-j4\pi/\lambda \cdot \left(X_i \Omega m \cdot \Delta T - Y_k \Omega^2 (m \cdot \Delta T)^2 / 2\right)\right) \quad (5)$$

为获取目标回波的局部平均多普勒趋势信息, 对其在方位向第 $l$ 个采样点处加短时窗处理, 构造对应回波方位 $l$ 采样位置的LADT信号。其中, 设短时窗长度为 $L$ , 加窗位置 $l = 1, 2, \dots, M - L + 1$ , 加窗后的回波信号为 $s_k(m) (m = l + 1, l + 2, \dots, l + L - 1)$ 。则对应回波方位向 $l$ 位置的LADT信号, 其形式如式(6):

$$\begin{aligned} S_k(m) &= s_k(m) \cdot s_k^*(m-1) \\ &= \sum_{i=1}^P \tilde{A}_i \exp\left(-j4\pi/\lambda \cdot \left(X_i \Omega m \cdot \Delta T - Y_k (\Omega m \cdot \Delta T)^2 / 2\right)\right) \\ &\quad \cdot \sum_{h=1}^P \tilde{A}_h^* \exp\left(j4\pi/\lambda \cdot \left(X_h \Omega (m-1) \cdot \Delta T - Y_k \Omega^2 (m-1)^2 \cdot \Delta T^2 / 2\right)\right) \\ &= \exp(j\varphi_a(m)) \cdot A_r \exp(j\varphi_r(m)) \end{aligned} \quad (6)$$

其中,

$$\varphi_a(m) = 4\pi/\lambda \cdot \left(Y_k \Omega^2 \cdot (2m-1) \Delta T^2 / 2\right) \quad (7)$$

$$A_r \exp(j\varphi_r(m))$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^P \left| \tilde{A}_i \right|^2 \exp(-j4\pi/\lambda \cdot X_i \Omega \cdot \Delta T) \\ &\quad + \sum_{i=1}^P \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq i}}^P \tilde{A}_i \tilde{A}_h^* \exp(-j4\pi/\lambda \cdot X_h \Omega \cdot \Delta T) \\ &\quad \cdot \exp(-j4\pi/\lambda \cdot ((X_i - X_h) \Omega m \cdot \Delta T)) \end{aligned} \quad (8)$$

$A_r$ 为随机变量,  $\varphi_r(m)$ 为随机过程。为进一步获得LADT信号的相位解析表示, 令 $A_r = |A_r| \exp(j\varphi_{A_r})$ , 可将式(6)改写为

$$\begin{aligned} S_k(m) &= |A_r| \exp(j(\varphi_a(m) + \varphi_{A_r} + \varphi_r(m))) \\ &= |A_r| \exp(j\varphi_k(m)) \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $\varphi_{A_r}$ 为随机相位,  $|A_r|$ 为随机实变量。则 $S_k(m)$ 的相位表达式为

$$\varphi_k(m) = \varphi_a(m) + \varphi_{A_r} + \varphi_r(m) \quad (10)$$

观察式(10)可知, LADT信号相位由随机量和确定量两部分组成, 其中, 确定量 $\varphi_a(m)$ 隐含目标回波的局部多普勒变化趋势, 随机量形式复杂, 无法得到其解析表达式, 故采用1阶Gauss-Markov过程<sup>[21]</sup>描述LADT信号相位 $\varphi_k(m)$ 如式(11):

$$\varphi_k(m) = C_k + \varphi_a(m) + \sum_{i=1}^m \eta_{k,i} \quad (11)$$

其中,  $C_k$ 是一个未知常数,  $\eta_{k,i}$ 为高斯随机变量, 服从均值和方差分别为 $\mu_{k,i}$ 和 $\sigma_{k,i}^2$ 的高斯分布, 写作 $\eta_{k,i} \sim N(\mu_{k,i}, \sigma_{k,i}^2)$ 。因 $\varphi_k(m)$ 的高度相关性和 $\varphi_k(m)$ 的连续性, 可认为 $\mu_{k,i} = 0$ ,  $\sigma_{k,i}^2 = \sigma_k^2$ , 高斯随机变量 $\eta_{k,i} \sim N(0, \sigma_k^2)$ 独立同分布<sup>[21]</sup>。

为减少高斯随机变量对LADT信号相位信息的干扰, 并进一步提取目标回波局局部平均多普勒趋势的相位信息, 将 $\varphi_k(m)$ 沿方位向平均, 得LADT信号的相位平均值如式(12):

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{mean}}^k(l) &= \sum_{m=l+1}^{l+L-1} \varphi_k(m) / (L-1) \\ &= C_k + \sum_{m=l+1}^{l+L-1} \varphi_a(m) / (L-1) \\ &\quad + \sum_{m=l+1}^{l+L-1} \sum_{i=1}^m \eta'_{k,i} \end{aligned} \quad (12)$$

其中,

$$\begin{aligned} \sum_{m=l+1}^{l+L-1} \varphi_a(m) / (L-1) &= 4\pi/\lambda \cdot (2l+L-1) \\ &\quad \cdot (Y_k \Omega^2 \cdot \Delta T^2 / 2) \end{aligned} \quad (13)$$

则式(12)可改写为

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{mean}}^k(l) &= 2\pi(2Y_k \Omega^2 / \lambda) (l \cdot \Delta T) \cdot \Delta T \\ &\quad + (L-1) \cdot 4\pi/\lambda \cdot (Y_k \Omega^2 \cdot \Delta T^2 / 2) \\ &\quad + C_k + \sum_{m=l+1}^{l+L-1} \sum_{i=1}^m \eta'_{k,i} \end{aligned} \quad (14)$$

其中,第1项包含目标回波的调频率信息 $\gamma_k = 2Y_k\Omega^2/\lambda$ ,隐含目标回波在方位 $l$ 采样位置的局部平均多普勒趋势信息,第2项为未知常数项,第3项为噪声干扰项。对于不同的距离单元 $k$ 和时刻 $m$ ,高斯随机变量 $\eta_{k,i} \sim N(0, \sigma_k^2/(L-1)^2)$ ,相位的方位向平均降低了随机变量的方差,减少了噪声干扰项对相位的影响。

进一步由 $\varphi_{\text{mean}}^k(l)$ 提取目标回波局部平均多普勒趋势信息,计算LADT信号的局部多普勒质心,其表达式为

$$f_{\text{cent}}^k(l) = \varphi_{\text{mean}}^k(l) / (2\pi \cdot \Delta T) \\ = \gamma_k \cdot (l \cdot \Delta T) + C'_k + \eta''_k \quad (15)$$

其中, $C'_k = (L-1/\lambda) \cdot (Y_k\Omega^2\Delta T) + C_k / (2\pi \cdot \Delta T)$ 为一未知常数, $\eta''_k \sim N(0, \sigma_k^2 / ((L-1)(2\pi \cdot \Delta T))^2)$ 为高斯随机变量。可认为 $f_{\text{cent}}^k(l)$ 代表目标回波在方位 $l$ 采样位置处的多普勒趋势。考虑高斯随机变量 $\eta''_k$ 的均值为零, $f_{\text{cent}}^k(l)$ 的变化主要受 $\gamma_k$ 和 $l$ 的影响。

针对第 $k$ 个距离单元下的目标回波,令 $l = 1, 2, \dots, M-L+1$ ,沿方位时间滑窗,构造针对回波不同方位采样位置的LADT信号,得到对应的局部多普勒质心序列如下: $[\hat{f}_{\text{cent}}^k(1), \hat{f}_{\text{cent}}^k(2), \dots, \hat{f}_{\text{cent}}^k(M-L+1)]$ ,可反映出回波的多普勒变化趋势。对其关于方位时间 $[\Delta T, 2\Delta T, \dots, (M-L+1)\Delta T]$ 线性拟合

$$\hat{f}_{\text{cent}}^k(l) = \hat{\gamma}_k \cdot (l \cdot \Delta T) + \hat{C}'_k \quad (16)$$

其中,线性模型的斜率参数 $\hat{\gamma}_k$ 对应第 $k$ 个距离单元回波的多普勒调频率估计值, $\hat{C}'_k$ 为线性模型对应的常数参数。

尽管相位平均可降低噪声影响,但随机噪声干扰仍无法彻底消除。对于针对不同方位采样位置的LADT信号,其相位估计值可能因随机噪声发生跳变,导致 $\hat{f}_{\text{cent}}^k(l)$ 的值严重偏离式(16)所示的线性模型,为进一步降低噪声对模型拟合的影响,本文引入RANSAC算法实现多普勒调频率估计以及目标有效转速估计。

### 3.2 多普勒调频率与目标有效转速估计

结合上节分析,本方法采用RANSAC算法实现线性模型拟合,并依据模型参数估计多普勒调频率与目标有效转速。不同于传统参数估计方法,RANSAC不采用全部数据拟合,而是将全部数据分为局外点和局内点。在一定误差范围内,最佳拟合模型对应的数据称为局内点,失配最佳模型的数据称为局外点。RANSAC通过在全局数据集中随

机采样,得到最小局内点数据集及其对应模型,逐步扩大局内点集,迭代寻找最佳拟合数据模型,可有效避免局外点导致的较大拟合偏差。

结合式(16)所示模型,针对第 $k$ 个距离单元,默认 $[\hat{f}_{\text{cent}}^k(1), \hat{f}_{\text{cent}}^k(2), \dots, \hat{f}_{\text{cent}}^k(M-L+1)]$ 为全部样本数据,RANSAC拟合线性模型的具体操作如下:

(1) 从 $[\hat{f}_{\text{cent}}^k(1), \hat{f}_{\text{cent}}^k(2), \dots, \hat{f}_{\text{cent}}^k(M-L+1)]$ 中随机选取两个样本数据作为局内点,记为 $[\hat{f}_{\text{cent}}^k(i), \hat{f}_{\text{cent}}^k(j)]$ ,利用该最小局内点集构造关于方位时间的初始线性模型;

(2) 计算其余样本点到初始线性模型的距离 $d(l), l \neq i, j$ ;

(3) 计算全部样本数据的方差 $\sigma^2 = \text{var}(\hat{f}_{\text{cent}}^k(l))$ ,若 $d(l) \geq \sigma$ ,则判定对应的数据点 $\hat{f}_{\text{cent}}^k(l)$ 为随机噪声导致的局外点,删除。若 $d(l) < \sigma$ ,则判定对应的 $\hat{f}_{\text{cent}}^k(l)$ 为局内点,保留并计数;

(4) 重复上述步骤 $K$ 次,包含局内点数目最多的线性模型,可认为是最佳拟合线性模型。

算法迭代次数 $K$ ,可由式(17)确定

$$K = \lg(1-p) / \lg(1-w^n) \quad (17)$$

其中, $p$ 代表整个迭代过程中随机选择的数据均为局内点的概率, $w$ 为每次迭代选到一个局内点的概率, $n$ 为每次迭代需要随机选取的点数。

依据上述步骤可获得形如式(16)的最佳拟合线性模型。对全部距离单元回波重复上述操作,可得调频率序列 $[\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2, \dots, \hat{\gamma}_N]$ 。由表达式 $\gamma_k = 2Y_k\Omega^2/\lambda$ 可知,多普勒调频率 $\gamma_k$ 与散射点距离向坐标 $Y_k$ 成线性关系,斜率为 $\kappa = 2\Omega^2/\lambda$ 。再次应用RANSAC算法拟合“多普勒调频率-距离向位置”线性模型,得到斜率参数估计值 $\hat{\kappa}$ ,则有效转速估计值可表示为 $\hat{\Omega} = \sqrt{\hat{\kappa} \cdot \lambda/2}$ 。

### 3.3 转动补偿与方位定标

依据本文第2节分析,不同距离单元回波存在不同的距离空变相位2次项,导致方位向成像存在一定程度的散焦,且该影响无法被统一补偿。因此,对于平动补偿后的目标回波,需构造针对不同距离单元回波的补偿函数完成转动补偿。对于第 $k$ 个距离单元回波 $s_k(m)$ ,可构造补偿函数 $h_k(m) = \exp(-j\pi(\hat{\gamma}_k \cdot (m \cdot \Delta T)^2))$ ,得到转动补偿后的对应距离单元回波 $s'_k(m) = s_k(m) \cdot h_k(m)$ 。结合上文得到的各距离单元回波的多普勒调频率估计值 $[\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2, \dots, \hat{\gamma}_N]$ ,对全部距离单元回波转动补偿

后作方位傅里叶变换,即可得到聚焦效果明显提高的图像。为获取目标尺寸信息,利用3.2节中获得的有效转速估计值 $\hat{\Omega}$ ,计算方位分辨率 $\hat{\rho}_a = \lambda / (2\hat{\Omega}T_a)$ ,可将ISAR图像由距离-多普勒域转换到距离-方位距离域,完成方位定标,估算出目标实际尺寸。

本文提出的转动补偿与方位定标算法具体流程如图2所示。

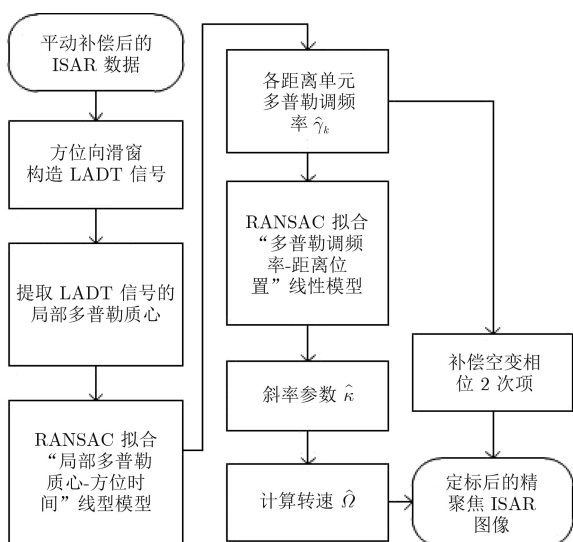


图2 算法流程图

## 4 数据处理结果与分析

### 4.1 仿真数据处理

为验证本文方法的有效性,采用图3所示飞机模型进行仿真实验。仿真实验设置飞机转速为 $\Omega = 0.0488$  rad/s,信噪比为 $\text{SNR} = 20$  dB,仿真实验的其余参数设置见表1。

表1 仿真参数设置

带宽	240 MHz	距离采样点数	349
中心频率	10 GHz	方位采样点数	512
采样频率	216 MHz	距离分辨率	0.625 m
脉冲重复频率	500 Hz	方位分辨率	0.3 m

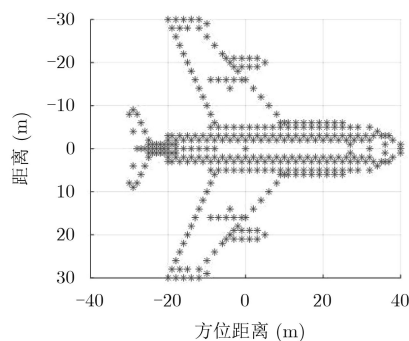


图3 仿真飞机模型

回波数据经平动补偿后,可获得目标原始RD图像,其熵值为7.9056,如图4(a)所示。应用本文方法,估计目标有效转速为 $\hat{\Omega} = 0.0491$  rad/s。方位定标后,估算飞机长度为69.77 m,翼展宽度为60.42 m。补偿回波距离空变相位2次项后,可得到如图4(b)所示的精聚焦ISAR图像。相较于原始RD图像熵值7.9056,转动补偿后的图像熵值降至7.4574,可认为转动补偿后图像聚焦效果得到提升。为进一步说明转动补偿在提升图像聚焦方面的作用,图4(c)中对比了图4(a)、图4(b)中圆圈标注部分在转动补偿前后的聚焦效果。观察图4可见,相比于原始RD图像,补偿距离空变相位2次项后,散射点的聚焦效果得到了明显提高。其中,目标转速及尺寸参数的理论值与估计值对比见表2。

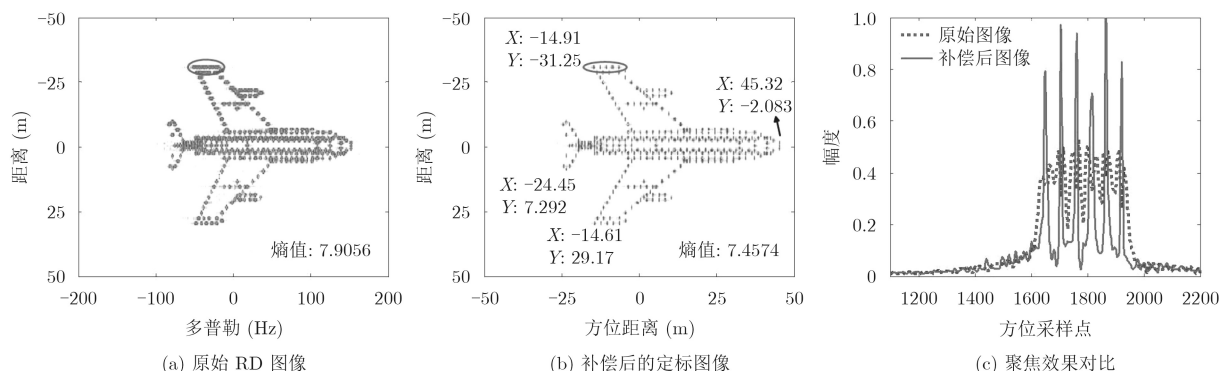


图4 飞机目标定标和高精度补偿成像结果

表2 仿真实验估计结果列表

	理论值	估计值	相对误差(%)
转动速度(rad/s)	0.0488	0.0491	0.61
飞机长度(m)	70.00	69.77	0.33
翼展宽度(m)	60.00	60.42	0.70

为比较本文方法与其他参考方法的性能,下面对本文方法与文献[9-12](TVAR<sup>[9]</sup>, RAT<sup>[10]</sup>, LPFT\_IC<sup>[11]</sup>和ISSM<sup>[12]</sup>)中的4种方法在不同信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)条件下分别进行50

次蒙特卡洛实验。图5中绘出各方法在不同信噪比条件下的相对误差 $E\left[\left|\hat{\Omega}-\Omega\right|/\Omega\right]$ 和均方误差 $E\left[\left(\hat{\Omega}-\Omega\right)^T\left(\hat{\Omega}-\Omega\right)\right]$ 变化情况，其中， $\hat{\Omega}$ 为每次实验得到的转速估计值。

由图5可知，各方法在信噪比较高时，估计精度相当。其中，TVAR法在挑选散射点时受噪声影响较大，导致其抗噪性能相对较差。RAT法和LPFT\_IC法在SNR>0 dB时，算法相对稳定，但相比本文方法，其估计精度较低。ISSM法基于图像质量评价准则，算法较为稳定。在SNR>5 dB时，本文方法的估计精度要高于ISSM法，低信噪比时，两方法性能相近。

下面进一步比较本文方法与各参考方法的运算效率，取SNR=20 dB，在主频为2.20 GHz的i3 4核

CPU内存6 GB计算机平台下，将各方法的运算时间列于表3。其中，TVAR法提取特显点距离单元回波估计目标转速，故其运算效率较高。本文方法与TVAR法运算效率相近，但估计精度和算法稳定性方面表现更好。RAT法和LPFT\_IC法算法耗时较长，其原因在于，LPFT\_IC法需分割图像并针对每幅子图像最大化对比度求解，RAT法需要在模糊平面上搜索回波多普勒调频率，上述两种方法均需要搜索参数，故运算效率较低。ISSM法基于图像锐化度最大求解，算法采用高斯牛顿方法优化搜索，其运算效率中等。在低信噪比条件下，相比ISSM法，本文方法与其性能相近，但运算效率更高，算法耗时较少。

综合考虑上述性能分析结果，本文方法在运算效率与估计精度方面的表现较为优秀，在低信噪比条件下稳定性表现较好。

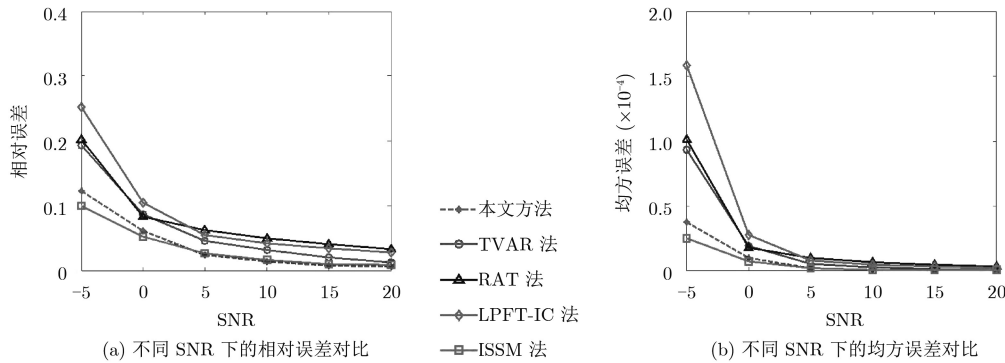


图5 不同信噪比条件下的估计误差对比

表3 本文方法与其他方法运算时间对比(s)

本文方法	TVAR法	RAT法	LPFT_IC法	ISSM方法
11.023539	9.916357	144.723539	249.244348	56.348508

### 4.2 实测数据处理

为进一步说明本文所提方法的有效性，下面采用舰船实测数据验证。实测数据的系统参数见表4。实测数据经过包络对齐、初相校正以及最小熵自聚焦处理后，可得到图6(a)所示的原始RD图像。应用本文所提方法，得到舰船目标的有效转速估计值 $\hat{\Omega} = 0.0402$  rad/s，估计目标长度为41.4373 m，宽度为8.3281 m。完成转动补偿及方位定标后，可得到如图6(b)所示的精聚焦图像。相比图6(a)的原始RD图像，补偿距离空变相位2次项后，图像聚焦效果得到了明显提升。为证明本算法的优越性，将文献[9~12](TVAR<sup>[9]</sup>, RAT<sup>[10]</sup>, LPFT\_IC<sup>[11]</sup>和ISSM<sup>[12]</sup>)所述方法作为参考方法分别处理该数据，得到如图6(c)~图6(f)所示图像。观察图6中圆圈标

注部分，并比较各方法图像聚焦情况及对应图像熵值，可发现本文方法的图像聚焦效果相比原始RD图像有显著提高，且优于其他方法的图像聚焦效果。由此可认为，本文方法能够有效补偿距离空变相位2次项并提高成像效果。为进一步验证上述结论，我们选取图中标注的舰船尾部第61个距离单元进行分析，得到如图7所示的结果，从中可看出本文方法图像聚焦效果更好，进一步验证了本文方法的有效性。其中，各方法获得的图像熵值列于表5。

表4 实测数据系统参数

带宽	620 MHz	距离单元数	256
载频	5.5 GHz	方位单元数	256
PRF	50.4 Hz	采样频率	630 MHz

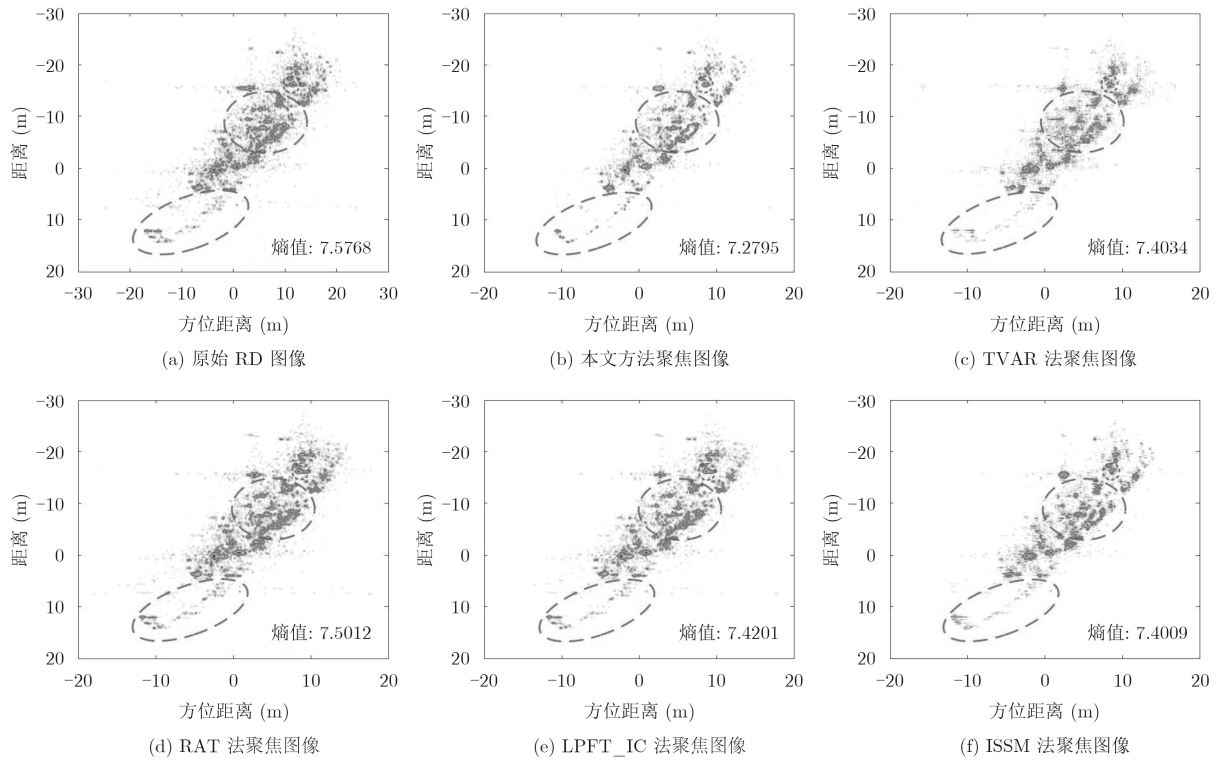


图6 舰船目标精聚焦成像结果

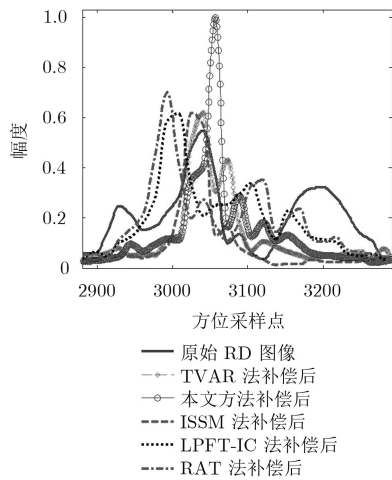


图7 第61个距离单元聚焦对比

表5 各方法图像熵值列表

RD图像熵值	7.5768	RAT法图像熵值	7.5012
本文方法图像熵值	7.2795	LPFT_IC法图像熵值	7.4201
TVAR法图像熵值	7.4034	ISSM方法图像熵值	7.4009

## 5 结束语

本文针对ISAR成像中的转动补偿和方位定标问题,提出一种高精度目标有效转速估计方法。该方法利用全部回波信息估计回波多普勒调频率与目标有效转速。为获取回波的多普勒变化趋势,针对目标回波构造LADT信号,得到回波在不同方位采

样位置的局部平均多普勒趋势信息,由此估计各距离单元回波的多普勒调频率,并在模型拟合中引入RANSAC算法减少相位跳变和噪声的影响,进一步解算出目标的有效转速,完成高精度转动补偿和方位定标。该方法无需考虑距离中心偏差的影响,仿真与实测数据实验结果均表明本文方法能够实现高精度的ISAR转动补偿以及方位定标,获得精聚焦ISAR图像。

## 参考文献

- [1] XU Gang, YANG Lei, BI Guoan, *et al.* Enhanced ISAR imaging and motion estimation with parametric and dynamic sparse bayesian learning[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2017, 3(4): 940-952. doi: 10.1109/TCLI.2017.2750330.
- [2] XU Gang, XING Mengdao, ZHANG Lei, *et al.* Bayesian inverse synthetic aperture radar imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(6): 1150-1154. doi: 10.1109/LGRS.2011.2158797.
- [3] 吴敏,张磊,刘松杨,等. OFDM-ISAR的稀疏优化成像与运动补偿[J]. *雷达学报*, 2016, 5(1): 72-81. doi: 10.12000/JR16017.
- [4] WU Min, ZHANG Lei, LIU Songyang, *et al.* OFDM-ISAR sparse optimization imaging and motion compensation[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(1): 72-81. doi: 10.12000/JR16017.
- [4] 谷文堃,王党卫,马晓岩. 分布式MIMO-ISAR子图像融合方

- 法[J]. 雷达学报, 2017, 6(1): 90–97. doi: [10.12000/JR16042](https://doi.org/10.12000/JR16042).
- GU Wenkun, WANG Dangwei, and MA Xiaoyan. Distributed MIMO-ISAR sub-image fusion method[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 90–97. doi: [10.12000/JR16042](https://doi.org/10.12000/JR16042).
- [5] 周叶剑, 张磊, 王虹现, 等. 空间轨道目标的逆合成孔径雷达成像质量分析[J]. 雷达学报, 2017, 6(1): 17–24. doi: [10.12000/JR16136](https://doi.org/10.12000/JR16136).
- ZHOU Yejian, ZHANG Lei, WANG Hongxian, *et al.* Performance analysis on ISAR imaging of space targets[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 17–24. doi: [10.12000/JR16136](https://doi.org/10.12000/JR16136).
- [6] 邢孟道, 高悦欣, 陈溅来, 等. 海上舰船目标雷达成像算法[J]. 科技导报, 2017, 35(20): 53–60. doi: [10.3981/j.issn.1000-7857.2017.20.005](https://doi.org/10.3981/j.issn.1000-7857.2017.20.005).
- XING Mengdao, GAO Yuexin, CHEN Jianlai, *et al.* A survey of the radar imaging algorithms for ship targets on the sea[J]. *Science and Technology Review*, 2017, 35(20): 53–60. doi: [10.3981/j.issn.1000-7857.2017.20.005](https://doi.org/10.3981/j.issn.1000-7857.2017.20.005).
- [7] 高悦欣, 李震宇, 邢孟道, 等. 一种海面舰船目标ISAR成像时间阶段选择方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2017, 44(2): 27–32. doi: [10.3969/j.issn.1001-4001.017.0.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4001.017.0.005).
- GAO Yuexin, LI Zhenyu, XING Mengdao, *et al.* New ISAR imaging interval selection method for ship targets on the sea[J]. *Journal of Xidian University*, 2017, 44(2): 27–32. doi: [10.3969/j.issn.1001-4001.017.0.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4001.017.0.005).
- [8] HUANG Darong, FENG Cunqian, TONG Ningning, *et al.* 2D spatial-variant phase errors compensation for ISAR imagery based on contrast maximisation[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(17): 1480–1481. doi: [10.1049/el.2016.1595](https://doi.org/10.1049/el.2016.1595).
- [9] 盛佳恋, 张磊, 邢孟道, 等. 联合运动补偿的逆合成孔径雷达成像方位定标方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(5): 859–865. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.08).
- SHENG Jialian, ZHANG Lei, XING Mengdao, *et al.* Joint method of motion compensation and cross-range scaling for inverse synthetic aperture radar imaging[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(5): 859–865. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2014.05.08).
- [10] 李玺, 顾红, 刘国岁. ISAR成像中转角估计的新方法[J]. 电子学报, 2000, 28(6): 44–47. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2000.06.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2000.06.012).
- LI Xi, GU Hong, and LIU Guosui. A method for estimating the rotation angle of the ISAR image[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(6): 44–47. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2000.06.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2000.06.012).
- [11] MARCO M. Novel approach for ISAR image cross-range scaling[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(1): 281–294. doi: [10.1109/TAES.2008.4517004](https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4517004).
- [12] SHENG Jialian, XING Mengdao, ZHANG Lei, *et al.* ISAR cross-range scaling by using sharpness maximization[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(1): 165–169. doi: [10.1109/LGRS.2014.2330625](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2330625).
- [13] XU Gang, YANG Lei, BI Guoan, *et al.* Maneuvering target imaging and scaling by using sparse inverse synthetic aperture[J]. *Signal Processing*, 2017, 137(C): 149–159. doi: [10.1016/j.sigpro.2017.01.016](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2017.01.016).
- [14] XU Gang, XING Mengdao, ZHANG Lei, *et al.* Sparse apertures ISAR imaging and scaling for maneuvering targets[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(7): 2942–2956. doi: [10.1109/JSTARS.2014.2315630](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2315630).
- [15] MARTIN F and ROBERT B. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381–395. doi: [10.1145/358669.358692](https://doi.org/10.1145/358669.358692).
- [16] IMRE E and HILTON A. Order statistics of RANSAC and their practical application[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2015, 111(3): 276–297. doi: [10.1007/s11263-014-0745-1](https://doi.org/10.1007/s11263-014-0745-1).
- [17] 邢孟道, 保铮, 李真芳, 等. 雷达成像算法进展[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 143–178.
- [18] 徐刚, 杨磊, 张磊, 等. 一种加权最小熵的ISAR自聚焦算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(8): 1809–1815. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01153](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01153).
- XU Gang, YANG Lei, ZHANG Lei, *et al.* Weighted minimum entropy autofocus algorithm for ISAR imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(8): 1809–1815. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01153](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01153).
- [19] 符吉祥, 孙光才, 邢孟道. 一种大转角ISAR二维自聚焦平动补偿方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(12): 2889–2898. doi: [10.11999/JEIT170303](https://doi.org/10.11999/JEIT170303).
- FU Jixiang, SUN Guangcai, and XING Mengdao. A two dimensional autofocus translation compensation method for wide-angle ISAR imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(12): 2889–2898. doi: [10.11999/JEIT170303](https://doi.org/10.11999/JEIT170303).
- [20] HUANG Darong, ZHANG Lei, XING Mengdao, *et al.* Doppler ambiguity removal and ISAR imaging of group targets with sparse decomposition[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(9): 1711–1719. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0036](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0036).
- [21] STEVEN K. Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory[M]. New Jersey: Prentice-Hall PTR, 1993: 419–479.
- 刘鑫阁: 女, 1994年生, 博士生, 研究方向为ISAR成像.  
邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像、动目标检测.  
孙光才: 男, 1985年生, 博士, 副教授, 研究方向为雷达成像、动目标检测.