

## 基于伪逆极坐标傅里叶变换的快速ISAR方位定标

李 东<sup>\*①②</sup> 张成祥<sup>①</sup> 赵 迪<sup>②</sup> 谭晓衡<sup>③</sup> 周喜川<sup>③</sup> 占木杨<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(重庆大学通信与测控中心 重庆 400044)

<sup>②</sup>(上海卫星工程研究所 上海 200240)

<sup>③</sup>(重庆大学通信工程学院 重庆 400044)

**摘 要:** 在逆合成孔径雷达(ISAR)成像中, 由距离多普勒或时频分析方法得到的ISAR图像方位向仅是目标的多普勒频率分布, 不能反映目标的真实形状, 需对ISAR图像进行方位定标。该文提出一种快速的ISAR方位定标方法来估计目标的旋转角速度(RAV)。首先, 该方法利用高效的伪逆极坐标快速傅里叶变换把两幅不同时刻ISAR图像的旋转运动转化为沿极角的平移运动。然后, 在极坐标域定义了一种新的积分相关代价函数来粗估目标的RAV。最后, 通过采用二分法估计得到最优的RAV, 进而实现ISAR方位定标。相比于现有方位定标算法, 所提方法避免了插值操作带来的精度损失和高计算复杂度问题。计算机仿真和实测数据实验结果证明了所提方法的有效性。

**关键词:** 逆合成孔径雷达; 旋转角速度; 伪逆极坐标快速傅里叶变换; 二分法

**中图分类号:** TN957

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2019)02-0262-08

**DOI:** 10.11999/JEIT180299

## Fast Cross-range Scaling for ISAR Imaging Based on Pseudo Polar Fourier Transform

LI Dong<sup>①②</sup> ZHANG Chengxiang<sup>①</sup> ZHAO Di<sup>②</sup> TAN Xiaoheng<sup>③</sup>  
ZHOU Xichuan<sup>③</sup> ZHAN Muyang<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Center of Communication and Tracking Telemetry Command, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

<sup>②</sup>(Shanghai Satellite Engineering Research Institute, Shanghai 200240, China)

<sup>③</sup>(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** For the Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) imaging, the ISAR image obtained by the Range-Doppler (RD) or time-frequency analysis methods can not display the target's real shape due to its azimuth relating to the target Doppler frequency, thus the cross-range scaling is required for ISAR image. In this paper, a fast cross-range scaling method for ISAR is proposed to estimate the Rotational Angular Velocity (RAV). Firstly, the proposed method utilizes efficient Pseudo Polar Fast Fourier Transform (PPFFT) to transform the rotational motion of two ISAR images from two different instant time into translation in the polar angle direction. Then, a new cost function called integrated correction is defined to obtain the RAV coarse estimation. Finally, the optimal RAV can be estimated using the Bisection method to realize the cross-range scaling. Compared with the available algorithms, the proposed method avoids the problems of precision loss and high computational complexity caused by interpolation operation. The results of computer simulation and real data experiments are provided to demonstrate the validity of the proposed method.

收稿日期: 2018-03-30; 改回日期: 2018-08-13; 网络出版: 2018-09-03

\*通信作者: 李东 lidongcuit@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61501068, 61571069), 上海航天科技创新基金(SAST2017041), 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室2017年主任基金(GXKL06170202), 重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0351)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61501068, 61571069), The Shanghai Aerospace Science and Technology Innovation Fund (SAST2017041), 2017 Director Fund of Key Laboratory of Wireless Broadband Communication and Signal Processing in Guangxi (GXKL06170202), The Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology (cstc2018jcyjAX0351)

**Key words:** Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR); Rotational Angular Velocity (RAV); Pseudo Polar Fast Fourier Transform (PPFFT); Bisection method

## 1 引言

逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)可以全天候、全天时、远距离获取非合作目标的高分辨图像,在军事和民用上都具有非常重要的应用价值<sup>[1,2]</sup>。高效的距离多普勒(Range-Doppler, RD)算法或时频分析法可以得到非合作目标的高分辨ISAR图像;然而,所得的图像位于距离多普勒域,不能反映出目标的真实尺寸。为了后续更好地对目标进行识别,需要对目标ISAR图像进行方位定标(cross-range scaling);而估计转动角速度(Rotation Angle Velocity, RAV)是方位定标的一个难点和研究热点。

针对该问题,近年来国内外学者先后提出多种ISAR方位定标算法<sup>[3-11]</sup>。文献[3]提出一种Radon-Ambiguity方法,通过在不同距离单元的平面上检测线性调频信号的调制率,进而估计出RAV;但在计算过程中需要2维搜索,计算量很大。文献[4-7]方法通过选择不同距离单元内的特显点,提取出其相位系数来估计RAV;然而在实际ISAR成像中很难找到理想的散射点,并且特显点的信噪比会影响RAV的估计精度,同时在不同距离单元估计出的RAV值起伏较大。文献[8]在转动速度、转动加速度的2维平面上以图像信息熵或对比度为准则进行搜索,当ISAR图像质量最好时,对应参数即为转动速度与转动加速度的估计值;然而,该方法需要进行多维搜索,无法兼顾算法的精度和运算效率。文献[9]提出一种基于压缩感知的方法,利用目标在成像空间内具有稀疏特性,实现目标高分辨成像和方位定标;但存在对噪声敏感且计算复杂度高等问题。文献[10]利用两幅RD图像之间的旋转相关特性估计RAV,此方法是在假设旋转中心已知的情况进行的,然而在实际图像处理中旋转中心很难获取,限制了此方法的实用性。文献[11]利用2维快速傅里叶变换(2-D FFT)以及极坐标映射估计RAV,该方法将ISAR图像的旋转变换为极坐标域中沿极角的平移,进而估计RAV。虽然避免了旋转中心的估计,但是由2维频域向极坐标转换过程中的插值操作会带来RAV估计精度损失和计算复杂度高的问题。因此,需要进一步研究高效的ISAR图像方位定标方法。

本文提出一种基于伪逆极坐标快速傅里叶变换(Pseudo Polar Fast Fourier Transform, PPFFT)的高效ISAR方位定标方法。首先利用高

效的PPFFT把两幅不同时刻ISAR图像的旋转变换为伪极坐标域中沿极角方向的平移;然后定义了一种新的代价函数-积分相关函数,来粗估目标的RAV;最后,采用二分法快速得到最优的RAV,完成方位定标。相比于现有ISAR定标算法,本文算法避免了插值操作带来的精度损失和高计算复杂度问题。

## 2 ISAR图像RD域与频域关系建模及分析

图1给出了经过平动补偿后ISAR成像的几何模型,其中目标以均匀角速度 $\omega_0$ 旋转,雷达与目标旋转中心之间的距离为 $r_a$ ;则对旋转目标上任一散射点 $P(r_0, \theta_0)$ 在 $t_k$ 时刻与雷达之间的瞬时斜距可写为

$$r(t_k) = \sqrt{r_0^2 + r_a^2 - 2r_0r_a \cos(\theta_0 + \omega_0 t_k)} \quad (1)$$

由于雷达到目标的距离远大于目标尺寸,在远场条件下照射到目标的电磁波可用平面波近似;因此,斜距表达式(1)可近似写为

$$r(t_k) \approx r_a - x_0 \cos(\omega_0 t_k) + y_0 \sin(\omega_0 t_k) \quad (2)$$

其中,  $x_0 = r_0 \cos \theta_0$ ;  $y_0 = r_0 \sin \theta_0$ , 根据距离时间延迟和多普勒频率变化特性,则该散射中心 $P$ 在距离多普勒域上的坐标可表示为<sup>[10,11]</sup>

$$\begin{aligned} X(t_k) &= -f_s \frac{2r(t_k)}{c} \\ &= X_0 + [x_0 \cos(\omega_0 t_k) - y_0 \sin(\omega_0 t_k)] / \eta_r \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Y(t_k) &= \frac{M}{\text{PRF}} \frac{2}{\lambda} \frac{dr(t_k)}{dt_k} \\ &= \frac{x_0 \sin(\omega_0 t_k) + y_0 \cos(\omega_0 t_k)}{\eta_a} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $X_0 = -r_a / \eta_r$ 为常数项,  $f_s$ 是距离向采样频率, PRF是脉冲重复频率,  $c$ 是光速,  $\lambda$ 是波长,  $M$ 是累积脉冲数,  $\eta_r = c / (2f_s)$ 和 $\eta_a = \lambda \text{PRF} / (2M\omega_0)$ 分别是距离向尺度因子和方位向尺度因子。

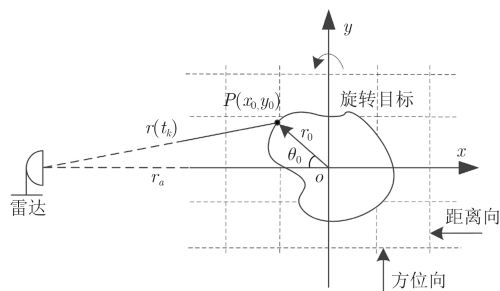


图1 ISAR成像的几何模型示意图

把式(3)和式(4)表示为矩阵形式,可得散射点 $P$ 在不同时刻 $t_{k1}$ 和 $t_{k2}$ 得到的两幅RD图像 $I_1$ 和 $I_2$ 中的位置具有式(5)关系<sup>[10,11]</sup>:

$$\begin{bmatrix} X_c(t_{k2}) \\ Y_c(t_{k2}) \end{bmatrix} = \mathbf{S} \mathbf{R}(t_{k2}) \mathbf{R}^{-1}(t_{k1}) \mathbf{S}^{-1} \begin{bmatrix} X_c(t_{k1}) \\ Y_c(t_{k1}) \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \cos(\theta_d) & -C_r \sin(\theta_d) \\ \sin(\theta_d)/C_r & \cos(\theta_d) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_c(t_{k1}) \\ Y_c(t_{k1}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $\theta_d = \omega_0(t_{k2} - t_{k1}) = \omega_0 \Delta t_k$  是两幅RD图像之间的旋转角度,  $C_r = \eta_a/\eta_r$  为相对尺度因子。从式(5)可知, 第2幅RD图像 $I_2$ 是由第1幅RD图像 $I_1$ 经过旋转-拉伸变换得到的。下面就不同时刻得到的两幅RD图像在频域的关系进行分析; 对给定的  $N \times N$  大小的RD图像  $I(u, v)$ , 其2维傅里叶变换  $\hat{I}(\omega_x, \omega_y)$  可表示为

$$\hat{I}(\omega_x, \omega_y) = \sum_{u, v=-N/2}^{N/2-1} I(u, v) e^{-\frac{2\pi i}{M}(u\omega_x + v\omega_y)} \quad (6)$$

根据傅里叶变换性质可知, 对频率变量 $(\omega_x, \omega_y)$ 在不同坐标下, 可以得到不同的2维傅里叶变换形式; 如2维频率变量在卡迪尔坐标采样网格下,  $(\omega_x, \omega_y) = (k, l)$ ,  $k, l = (-M/2, M/2 - 1)$ ,  $M$  为采样点数, 其2维傅里叶变换频域形式可写为

$$\hat{I}_c(k, l) \triangleq I(k, l) = \sum_{u, v=-N/2}^{N/2-1} I(u, v) e^{-\frac{2\pi i}{M}(u\omega_x + v\omega_y)} \quad (7)$$

从式(7)可知, 由于在时域和频域都是均匀采样, 因此可用2维快速傅里叶变换(2-D FFT)实现。如果2维频率变量 $(\omega_x, \omega_y)$ 是在极坐标网格下采样, 则在极坐标网格中:  $\omega_x = r_k \cos \theta_l$ ,  $\omega_y = r_k \sin \theta_l$ ,  $r_k = k$ ,  $\theta_k = 2\pi l/L$ ,  $k, l = (-M/2, M/2 - 1)$ ; 其中,  $M$  和  $L$  分别表示沿极径 $r_k$ 和极角 $\theta_l$ 方向的采样点数, 在极坐标网格下其2维傅里叶变换形式为

$$\hat{I}_p(\omega_x, \omega_y) = F_p(r_k \cos \theta_l, r_k \sin \theta_l) \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(u, v) e^{-j2\pi r_k(u \cos \theta_l + v \sin \theta_l)} du dv \quad (8)$$

根据式(5)和式(8), 对不同时刻得到的两幅RD图像 $I_1$ 和 $I_2$ , 在极坐标采样网格下做2维傅里叶变换, 其在极坐标域的关系式为

$$\hat{I}_2(r, \theta) = \frac{1}{C_r^2} \hat{I}_1\left(\frac{r}{|C_r|}, \theta + \theta_d\right) \quad (9)$$

从式(9)可知, 两幅ISAR图像 $I_1$ 和 $I_2$ 在RD域的旋转和拉伸分别对应于极坐标中极角的平移和极径的伸缩, 然而当2维频率变量 $(\omega_x, \omega_y)$ 处于极坐标网格时, 其2维傅里叶变换没有相应的快速变换, 计算复杂度急剧增加, 给数据的实时处理带来困难。因此需要进一步研究高效的ISAR图像定标方法。

### 3 本文提出的ISAR方位定标方法

根据第2节分析可知, 不同时刻得到的两幅ISAR图像在RD域旋转对应为极坐标傅里叶变换域极角的平移; 在此基础上, 本节提出一种基于PPFFT的快速方位定标方法。

#### 3.1 PPFFT原理

伪逆极坐标傅里叶变换(PPFT)是一种在伪逆极坐标采样网络下的2维傅里叶变换, 其2维频率变量在伪逆极坐标网格下采样形式为<sup>[12, 13]</sup>

$$P \triangleq P_1 \cup P_2 \quad (10)$$

式中,  $P_1$ 和 $P_2$ 满足的条件为:  $P_1 \triangleq \left\{ \left( -\frac{2l}{N}k, k \right) \mid -\frac{N}{2} \leq l \leq \frac{N}{2}, -N \leq k \leq N \right\}$ ,  $P_2 \triangleq \left\{ \left( k, -\frac{2l}{N}k \right) \mid -\frac{N}{2} \leq l \leq \frac{N}{2}, -N \leq k \leq N \right\}$ , 其中 $k$ 表示“伪极径”,  $l$ 表示“伪角”。图2(a)和图2(b)分别表示式(10)中的伪逆极坐标网格下采样区域 $P_1$ 和 $P_2$ , 完整的伪逆极坐标采样网格如图2(c)所示。根据对应的关系伪逆极坐标采样网格用 $(r, \theta)$ 表示可写为

$$P_1(k, l) = (r_k^1, \theta_l^1), P_2(k, l) = (r_k^2, \theta_l^2) \quad (11)$$

其中,  $r_k^1, r_k^2, \theta_l^1, \theta_l^2$ 满足的条件为:  $r_k^1 = k\sqrt{4\left(\frac{l}{N}\right)^2 + 1}$ ,  $r_k^2 = k\sqrt{4\left(\frac{l}{N}\right)^2 + 1}$ ,  $\theta_l^1 = \pi/2 - \arctan\left(\frac{2l}{N}\right)$ ,  $\theta_l^2 = \arctan\left(\frac{2l}{N}\right)$ 。

类似于式(7)和式(8)定义的迪卡尔坐标和极坐标下2维傅里叶变换, ISAR图像在式(10)和图2表示的伪逆极坐标采样网格中, 其2维傅里叶变换形式分别为<sup>[12,13]</sup>

$$\hat{I}_{PP}^1(k, l) \triangleq I\left(-\frac{2l}{N}k, k\right) \\ = \sum_{u, v=-N/2}^{N/2-1} I(u, v) e^{-\frac{2\pi i}{M}\left(-\frac{2l}{N}ku + kv\right)} \quad (12a)$$

$$\begin{aligned} \hat{I}_{PP}^2(k, l) &\triangleq I\left(k, -\frac{2l}{N}\right) \\ &= \sum_{u, v=-N/2}^{N/2-1} I(u, v) e^{-\frac{2\pi i}{M}(ku - \frac{2l}{N}kv)} \quad (12b) \end{aligned}$$

幸运的是伪逆极坐标采样网格下的2维傅里叶变换能够快速实现。图3描述了式(12a)快速实现的示意图；首先对原始图像沿 $y$ 轴方向补零，接着做快速傅里叶变换(FFT)；然后，沿 $x$ 轴方向做Chirp-Z变换<sup>[13]</sup>，得到了2维频率在伪逆极坐标采样网格下对应的区域 $P_1$ ；同理，可以得到对应的区域 $P_2$ 。将 $P_1$ 和 $P_2$ 叠加就可得到整个图像的在伪逆极坐标采样网格下2维傅里叶变换结果。实现过程仅需进行2次1维FFT和2次1维Chirp-Z变换<sup>[12,13]</sup>，避免了2维插值操作。因此PPFFT具有高的精度和较低的计算复杂度。

### 3.2 基于PPFFT的RAV快速估计

根据3.1节的PPFFT的原理，首先对不同时刻 $t_{k1}$ 和 $t_{k2}$ 得到的两幅RD图像 $I_1$ 和 $I_2$ 进行PPFFT，用 $P_{k1}$ 和 $P_{k2}$ 分别表示两幅RD图像PPFFT后的幅度信息，则其具有式(13)关系：

$$\begin{aligned} P_{k2}(r_k, \theta_l) &= (\omega_{x0}, \omega_{y0}) \\ &+ \frac{1}{C_r^2} P_{k1}\left(\frac{r_k}{|C_r|}, \theta_l + \Delta\theta\right) \quad (13) \end{aligned}$$

其中， $(\omega_{x0}, \omega_{y0})$ 为旋转中心，其位于2维频域零频处；式(13)表明两幅RD图像旋转对应伪逆极坐标

系下沿伪极角 $\theta$ 的平移。因此，只要估计出 $t_{k2} - t_{k1}$ 时间段内两幅图像的旋转角度 $\Delta\theta$ ，就可以得到目标的RAV。为了估计两幅ISAR图像的旋转角度 $\Delta\theta$ ；本文定义了一种新的1维代价函数-径向积分相关函数，其表达式为

$$\text{Cor}(k) = \sum_{i=1}^N \varphi_1(\theta_i) \times \varphi_2(\theta_{i-k}) \quad (14)$$

其中， $\varphi_m(\theta_i) = \sum_{j=1}^N P_{k,m}(r_j, \theta_i)$ ， $m=1,2$ 为两幅RD图像经PPFFT后沿径向进行积分的结果；根据式(14)，两幅RD图像的旋转角度 $\Delta\theta$ 可通过式(14)取最大值时的位置 $k$ 获得。为了简化计算，利用傅里叶变换的卷积特性，最大值对应的位置 $k$ 可由式(15)获得。

$$k = \arg \max_k \{F_\theta^{-1}[F_\theta(\varphi_1(\cdot)) F_\theta^*(\varphi_2(\cdot))]\} \quad (15)$$

式中， $F_\theta(\cdot)$ 表示傅里叶变换， $F_\theta^{-1}(\cdot)$ 表示傅里叶逆变换，下标 $\theta$ 表示沿极角方向。根据获得的两幅RD图像的旋转角度 $\Delta\hat{\theta}$ ，就可得到RAV的估计值 $\hat{\omega} = \Delta\theta / (t_2 - t_1)$ 以及相对尺度因子 $C_{r0}$ 。

然而从式(5)可知，两幅图像之间除了旋转以外还存在尺度伸缩；尺度伸缩会对RAV的估计精度产生影响，所以为了更精确地估计RAV，需要粗估RAV对原始图像做旋转-拉伸补偿，从而精确估计出旋转角度。这里使用二分法求解最优的RAV；二分法是一种能够重新分配搜索区间并选择根所在

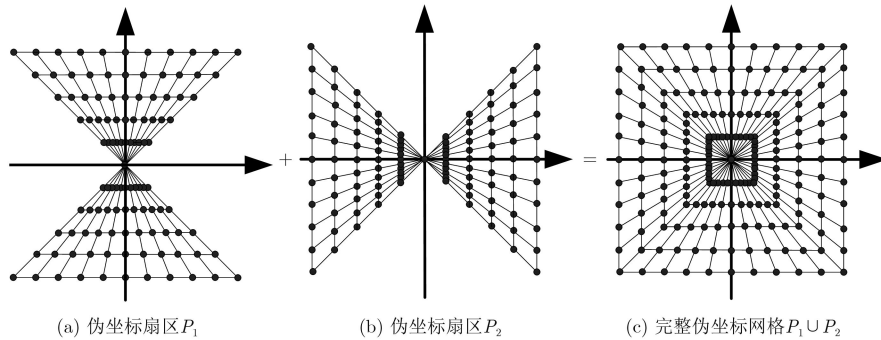


图2 伪逆极坐标采样网格

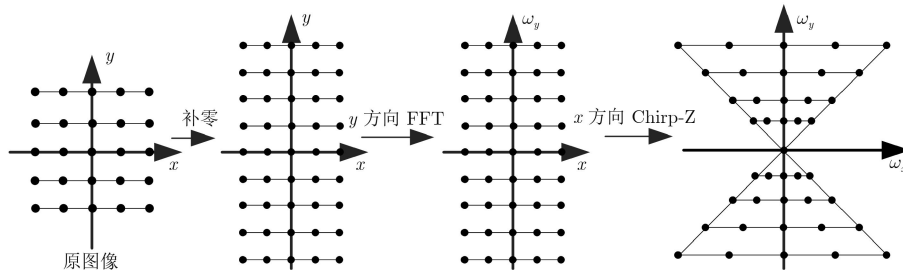


图3 伪逆极坐标采样区域 $P_1$ 的2维傅里叶变换快速实现示意图

的子区间进行2次搜索,进一步寻找真实根的经典优化算法<sup>[14]</sup>。本文利用二分法来得到最优的旋转角度,选择合适的搜索区间 $[a, b]$ ,在小区间内实现迭代搜索,在完成多次迭代搜索就可得到目标精确RAV,从而完成ISAR图像方位定标。整个算法的实现过程如图4所示。

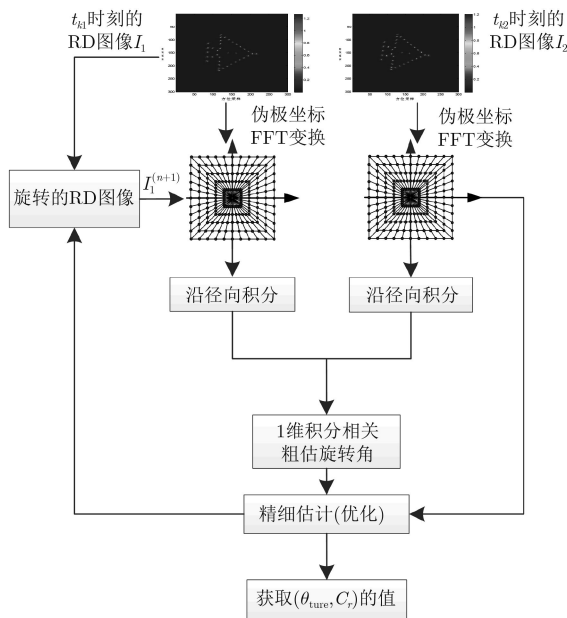


图4 提出的ISAR方位定标算法实现流程图

### 3.3 计算复杂度分析

本小节分析提出方法的计算复杂度,并与文献<sup>[11]</sup>提出的基于2维快速傅里叶变换和极坐标映射估计RAV的方法进行比较。假设距离维采样点数为 $N_r$ ,方位维采样点数为 $N_a$ ;且长度为 $N$ 的信号做1次复数相乘需要的计算量为 $O(N)$ ,做1次FFT计算复杂度为 $O(N \log_2 N)$ 。

文献<sup>[11]</sup>提出的估计RAV方法主要有以下几步构成:首先,对不同时刻得到的两幅RD图像进行2维FFT操作变到2维频域;然后,利用插值操作从2维频域映射到极坐标域;最后,在极坐标域定义2维相关函数来粗估RAV,并利用优化算法来迭代求解最优RAV。其总的计算复杂度大约为

$$C_{[11]} = O[(Q+2)((5+N_{\text{ker}}^2)N_r N_a + N_r N_a \log_2 N_r N_a + (Q+1)(3N_r N_a \log_2(N_r N_a))] \quad (16)$$

其中, $N_{\text{ker}}$ 为插值核长度, $Q$ 为算法优化过程需要的迭代次数。

根据图4提出的算法实现流程图,提出的ISAR方位定标算法主要有以下几步构成:首先对不同时刻得到的两幅RD图像进行PPFFT变换到伪逆极坐标域, $N$ 点Chirp-Z变换需要的计算复杂度

为 $O(N + 2N \log_2 N)$ <sup>[15]</sup>;然后,在伪逆极坐标域定义1维积分相关函数来粗估RAV,并利用二分法来迭代求解最优RAV。提出的算法总的计算复杂度大约为

$$C_{\text{本文}} = O[(M+2)(6N_r N_a \log_2(N_r N_a) + 4N_r N_a) + (M+1)(3N_a \log_2 N_a)] \quad (17)$$

其中, $M$ 为二分法求解过程所需要的迭代次数。

根据式(16)和式(17)可知,文献<sup>[11]</sup>的方法由于需要使用插值操作和2维代价函数,导致其计算复杂度偏高。而本文提出的方位定标算法由于避免了插值操作,且定义了新的1维代价函数-积分相关函数;因此,其计算复杂度远低于文献<sup>[11]</sup>的方法。

## 4 仿真结果分析及实测数据验证

### 4.1 计算机仿真结果及其分析

为了验证本文算法的有效性,现把所提方法应用到飞机模型的ISAR方位定标中。雷达工作参数和飞机目标运动参数见表1。图5为经过平动补偿后在 $t_{k1}$ 和 $t_{k2}$ 两个不同时刻进行RD成像所得到的ISAR图像,很明显第2幅RD图像是第1幅RD图像的旋转-拉伸结果。

表1 雷达参数和目标运动模型

| 参数     | 数值           |
|--------|--------------|
| 载波频率   | 5.6 GHz      |
| 波长     | 0.0536 m     |
| 传输信号带宽 | 400 MHz      |
| 距离采样频率 | 512 MHz      |
| 脉冲重复频率 | 150 Hz       |
| 有效回波脉冲 | 600          |
| 旋转角速度  | 0.0436 rad/s |

对 $t_{k1}$ 和 $t_{k2}$ 两个时刻的RD图像进行PPFFT,得到图像在伪逆极坐标下的变换结果,将图像的旋转转化为沿伪极角方向的平移;接着对伪逆极坐标域的图像沿径向积分;图6(a)为利用式(14)定义的代价函数得到的相关曲线,根据峰值检测可得旋转目标的RAV为 $\omega_0 = 0.0455$  rad/s,最后根据式(5)对RD图像进行旋转-拉伸补偿并完成方位定标。

然而,由于受两幅RD图像之间拉伸的影响,一次粗估所得的RAV存在较大的误差,需要根据粗估得到的RAV补偿图像拉伸带来的影响,再进一步精细估计最优的RAV。采用二分法求最优RAV的迭代收敛曲线如图7所示,算法迭代了10次左右就趋于收敛,计算得到最优的RAV为 $\omega_0 = 0.04358$  rad/s。

为了更好地验证本文方法优势,本文和文献[11]方法进行比较。在本文仿真参数下,文献[11]方法得到最优的RAV为 $\omega_0 = 0.04342$  rad/s,定标后ISAR图像如图8(a)所示。而利用本文方法得到最优的RAV为 $\omega_0 = 0.04358$  rad/s,定标后ISAR图像如图8(b)所示。定标结果与目标真实尺寸基本一致;在RAV估计精度方面,文献[11]方法是0.41%,而本文方法是0.05%,说明本文方法能够对图像旋转角进行更为精确的估计,定标性能更好。

为了更清晰直观比较计算复杂度,使用Intel Double-core处理器,CPU主频2.4 GHz,内存4 GB,Window 7操作系统,32位台式主机,在MATLAB 2014a环境下,分别运行了文献[11]方法和本文方法,运行时间如表2所示。由表2可知,本文提出的

定标方法计算量远小于文献[11]方法。为了验证分析噪声环境下算法的稳健性,图9给出了本文方法和文献[11]方法在不同信噪比(SNR)下RAV估计的均方根误差(RMSE);其中,RMSE获得是通过100次独立的蒙特卡罗实验。从图9可知,在SNR较高时,相比文献[11]方法,本文方法具有更好的估计精度。随着SNR的降低,本文方法和文献[11]方法RAV估计精度趋于一致,但其计算复杂度远低于文献[11]的方法,与上述的仿真结果和理论分析相吻合。

#### 4.2 实测数据处理

Yak-42飞机模型如图10(a)所示,雷达载频 $f_c$ 为5.52 GHz,脉冲重复频率PRF为25 Hz,发射信号带宽 $B_r$ 为400 MHz,方位向脉冲回波个数为128。

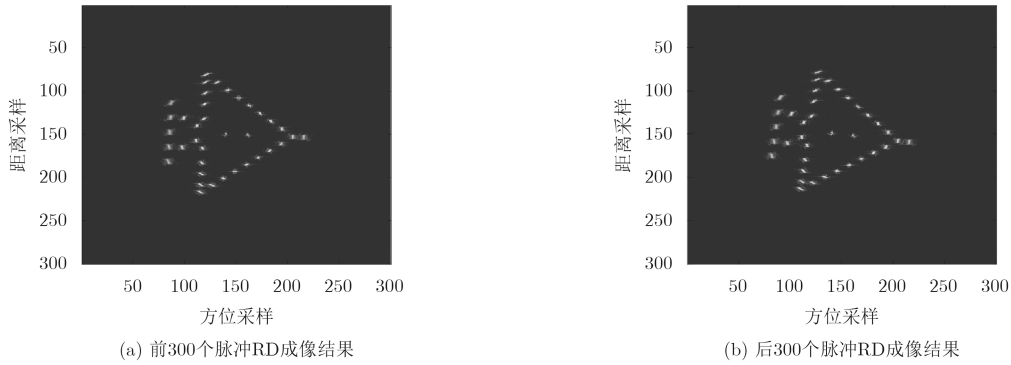


图5 两个不同时刻得到的RD图像

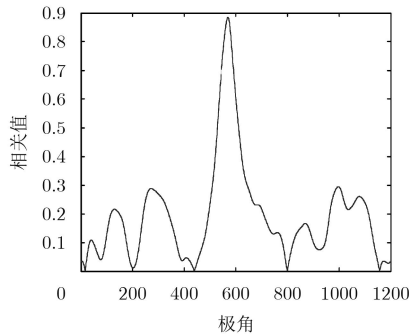


图6 粗估的1维相关曲线

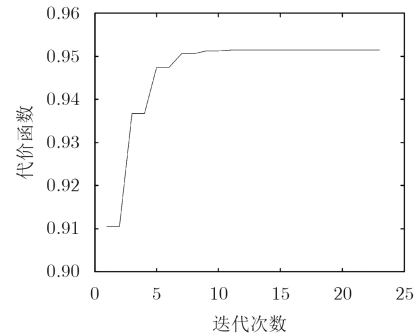
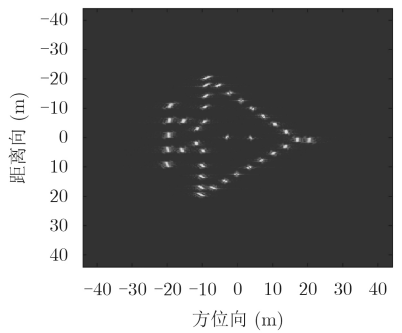
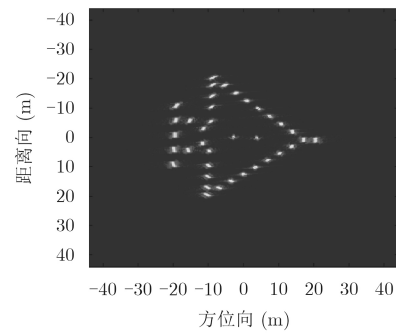


图7 迭代收敛曲线



(a) 文献[11]方法方位定标后的ISAR图像



(b) 本文方法方位定标后的ISAR图像

图8 方位定标后的ISAR图像

表 2 两种方法运行时间对比(s)

| 方法名称     | 粗估所用时间  | 定标总时间   |
|----------|---------|---------|
| 文献[11]方法 | 107.224 | 958.659 |
| 本文方法     | 12.203  | 96.712  |

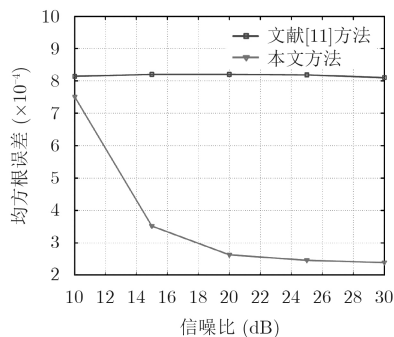
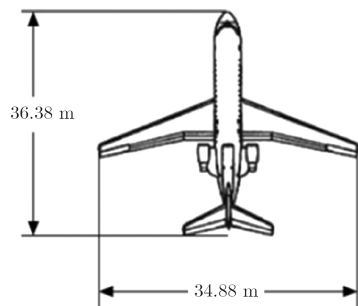
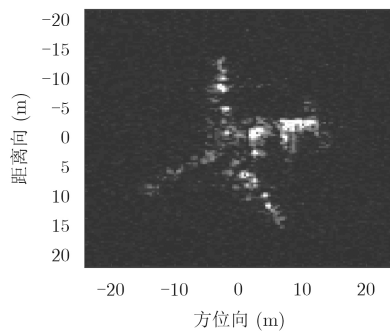


图 9 RAV估计的均方根误差随信噪比变化曲线

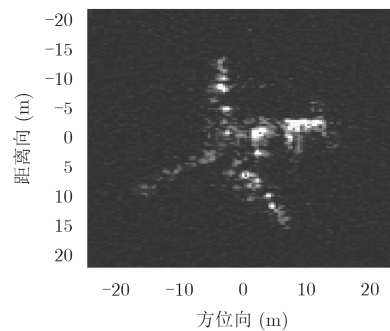
对Yak-42实测时所得的回波数据进行旋转角度估计, 计算得到最优的RAV为 $\omega_0 = 0.0092 \text{ rad/s}$ ; 根据估计所得出的RAV进行方位定标, 得到定标



(a) Yak-42 飞机模型



(b) 文献[11]方法方位定标后的ISAR图像



(c) 本文方法方位定标后的ISAR图像

图 10 实测数据图像

## 参考文献

- [1] XU Gang, XING Mengdao, XIA Xianggen, *et al.* 3D geometry and motion estimations of maneuvering targets for interferometric ISAR with sparse aperture[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2017, 25(5): 2005–2020. doi: [10.1109/TIP.2016.2535362](https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2535362).
- [2] LI Dong, ZHAN Muyang, ZHANG Xinzhen, *et al.* ISAR imaging of nonuniformly rotating target based on the multicomponent CPS model under low SNR environment[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2017, 53(3): 1119–1135. doi: [10.1109/TAES.2017.2667538](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2667538).
- [3] 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 estimating the rotation angle in ISAR imaging[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(6): 44–47. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112).
- [4] WANG Yong and JIANG Yicheng. A novel algorithm for estimating the rotation angle in ISAR imaging[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 608–609. doi: [10.1109/LGRS.2008.2000955](https://doi.org/10.1109/LGRS.2008.2000955).
- [5] MARTORELLA M. Novel approach for ISAR image cross-range scaling[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2008, 44(1): 281–294. doi: [10.1109/TAES.2008.4517004](https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4517004).
- [6] WANG Xin, ZHANG Min, and ZHAO Jia. Efficient cross-range scaling method via two-dimensional unitary ESPRIT scattering center extraction algorithm[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2017, 12(5): 928–932. doi: [10.1109/LGRS.2014.2367521](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2367521).
- [7] XU Zhiwei, ZHANG Lei, and XING Mengdao. Precise cross-range scaling for ISAR images using feature registration[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*,

后ISAR图像如图10(c)所示。同时, 图10(b)给出了利用文献[11]方法方位定标后的ISAR图像。从图10可以看出, 文献[11]方法定标得出的Yak-42的长度约为30.65 m, 翼展约为31.86 m; 本文定标得出的Yak-42的长度约为32.82 m, 翼展约为31.24 m, 更接近图10(a)中Yak-42飞机的实际尺寸; 并且飞机轮廓清晰, 几何尺寸明显, 有利于后续对运动目标高效识别。

## 5 结论

本文提出一种基于PPFFT快速ISAR方位定标方法。该方法主要思想是通过PPFFT将RD图像的旋转运动映射为伪逆极坐标域中沿极角方向的平移运动, 并通过定义了新的1维代价函数-积分相关函数和经典二分法估计得到精确的RAV。提出的方法避免了插值操作和2维代价函数, 具有较低的计算复杂度, 在工程实现中具有一定的优势。最后, 计算机仿真和实测数据结果验证了本文方法的有效性。

- 2014, 11(10): 1792–1796. doi: [10.1109/LGRS.2014.2309604](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2309604).
- [8] SHENG Jialian, XING Mengdao, ZHANG Lei, *et al.* ISAR cross-range scaling by using sharpness maximization[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2015, 12(1): 165–169. doi: [10.1109/LGRS.2014.2330625](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2330625).
- [9] 陈倩倩, 徐刚, 李亚超, 等. 短孔径ISAR方位定标[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(8): 1854–1861. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01252](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01252).  
CHEN Qianqian, XU Gang, LI Yachao, *et al.* Cross-range scaling of short aperture ISAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(8): 1854–1861. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01252](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01252).
- [10] YEH Chunmao, XU Jia, PENG Yingning, *et al.* Cross-range scaling for ISAR based on image rotation correlation[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2009, 6(3): 597–601. doi: [10.1109/LGRS.2009.2021990](https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2021990).
- [11] PARK S H, KIM H T, and KIM K T. Cross-range scaling algorithm for ISAR images using 2-D fourier transform and polar mapping[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2011, 49(2): 868–877. doi: [10.1109/TGRS.2010.2060731](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2060731).
- [12] AVERBUCH A, COIFMAN R R, DONOHO D L, *et al.* A framework for discrete integral transformations I-the pseudopolar fourier transform[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2014, 30(2): 764–784.
- [13] KELLER Y, SHKOLNISKY Y, and AVERBUCH A. The angular difference function and its application to image registration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2005, 27(6): 969–976. doi: [10.1109/TPAMI.2005.128](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2005.128).
- [14] XING Hao, MOU Yuting, FU Minyue, *et al.* Distributed bisection method for economic power dispatch in smart grid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 30(6): 3024–3035. doi: [10.1109/TPWRS.2014.2376935](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2376935).
- [15] LI Dong, LIU Hongqing, LIAO Yong, *et al.* A novel helicopter-borne rotating SAR imaging model and algorithm based on inverse Chirp-Z transform using frequency-modulated continuous wave[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2016, 12(8): 1625–1629. doi: [10.1109/LGRS.2015.2416437](https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2416437).
- 李 东: 男, 1983年生, 副教授, 研究方向为SAR/ISAR成像算法设计、参数估计等.
- 张成祥: 男, 1990年生, 硕士生, 研究方向为ISAR成像算法设计以及参数估计.
- 赵 迪: 男, 1982年生, 高级工程师, 研究方向为雷达信号处理.
- 谭晓衡: 男, 1976年生, 教授, 研究方向为信号检测与估计.
- 周喜川: 男, 1983年生, 教授, 研究方向为智能信号处理.
- 占木杨: 男, 1991年生, 硕士生, 研究方向为ISAR成像算法设计.