

基于特征配准的 ISAR 图像方位定标方法

许志伟* 张磊 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: 逆合成孔径雷达(ISAR)成像利用目标相对雷达视线的姿态变化形成的合成孔径获得方位高分辨, 成像方位为多普勒轴, 通常需要估计目标的有效转动速度以实现 ISAR 图像的方位定标从而体现目标真实尺寸。现有算法通常利用信号的运动参数估计和图像整体配准。该文提出利用子孔径 ISAR 图像的特征提取和配对, 根据特征点坐标估计目标的有效转角速度。首先利用尺度不变特征变换(SIFT)和快速鲁棒特征(SURF)对两幅 ISAR 图像进行特征点提取; 然后分别采用最短欧氏距离和随机采样一致性(RANSAC)进行特征点的匹配和失配点的剔除; 最后根据配对特征点的坐标和能量估算有效转角速度, 实现 ISAR 图像方位定标。仿真数据和实测数据验证了该算法的精确性和稳健性。

关键词: 逆合成孔径雷达; 尺度不变特征变换; 快速鲁棒特征; 转角估计; 方位定标

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)09-2173-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01590

A Novel Cross-range Scaling Algorithm for ISAR Images Based on Feature Registration

Xu Zhi-wei Zhang Lei Xing Meng-dao

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

Abstract: As Inverse SAR (ISAR) imaging utilizes synthetic aperture with aspect's changes related to the Radar Line of Sight (RLOS) to acquire azimuth resolution, the accurate estimation of rotated velocity is pivotal for the geometric scaling of ISAR images to measure the real size of a target. Compared with current methods by estimating motional parameters and the integrated images registration, this paper proposes a novel algorithm by extracting and registering the interested points of ISAR images from sub-aperture data, which provides the points' coordinate-locations to calculate the virtual rotated velocity. First, adequate interested points are extracted from two sub-aperture images by Scale Invariant Feature Transform (SIFT) and Speeded-Up Robust Features (SURF). Those points are then pinpointed by matching and re-matching with the minimum Euclid-distance and RANdom SAmple Consensus (RANSAC) principles, respectively. Finally, the rotated velocity, a premise to acquire the cross-resolution, can be estimated to achieve the precise target scaling. Simulated and real data validate the effectiveness and robustness of the proposed algorithm.

Key words: Inverse SAR (ISAR); Scale Invariant Feature Transform (SIFT); Speeded-Up Robust Features (SURF); Rotated angle estimation; Azimuth scaling

1 引言

利用逆合成孔径雷达(ISAR)成像技术可实现对空中或空间目标的微波散射特性分析, 获得目标几何和尺寸等重要信息。由于 ISAR 成像利用目标相对雷达视线的有效转动形成合成孔径获得方位高分辨率, ISAR 成像后需要方位定标实现多普勒与方位尺寸的转换^[1]。ISAR 目标的刚体运动通常分为平动和转动分量, 平动对合成孔径的形成无贡献, 因此

需要预先补偿。在较高频带载频(如 X 波段)的 ISAR 成像处理中, 通常利用较短相干处理时间即可获得高的方位分辨性能, 可视为目标在某一个平面进行匀速小转角度转动, 即可认为在较短的相干处理时间内有效转角速度为一常量。通过相干处理时间内有效转角速度的估计可实现 ISAR 成像的方位定标处理。一类重要的传统转角估计方法是信号域转角估计^[2,3], 此类方法通常假设匀速转台模型下, 转动分量引入不同距离单元存在线性变化的调频率, 通过信号域调频率估计可拟合目标转角速度大小, 继而实现 ISAR 成像方位定标^[4,5]。信号域参数估计的方法最大的问题在于算法对回波数据本身具有较强

2013-10-16 收到, 2014-02-25 改回

国家自然科学基金(61301280, 61222108)资助课题

*通信作者: 许志伟 zwxu1990@gmail.com

的依赖性, 当目标强散射中心较少或者回波数据质量不高时, 此类算法性能难以保持。通过图像匹配来估计相邻 ISAR 图像的旋转角估计, 是另一类较为有效的 ISAR 成像方位定标方法^[6], 但该方法需要对所有像素旋转和极坐标变换等运算复杂度较高的处理, 运算量非常大, 同时要求目标散射角度依赖性较弱。此外, 干涉 ISAR 通过对双天线接收的数据进行横向距离的比相法进行方位向的定标^[7]。

本文提出一种基于特征匹配的 ISAR 转角估计和方位定标方法。该算法结合了图像特征提取匹配的思路^[8,9], 对相邻 ISAR 图像用尺度不变特征变换 (SIFT) 和快速鲁棒特征点提取, 通过配对的特征点坐标估计相邻 ISAR 图像间转角。本文工作表明 SIFT 和 SURF 特征对微波 ISAR 图像有很好的稳定性和精确性。本文由以下部分组成: (1) 利用信号模型找出目标姿态与图像信息的关系, 构建代价函数并确定算法原则; (2) 结合文献^[10]提出的 SIFT 和文献^[11]提出的 SURF 提取目标特征点信息; (3) 通过相对位置校正去掉平动分量对于转角估计的影响, 并分别用基于欧氏距离的粗配准和基于 RANSAC^[12,13]的精配准对提取的特征点进行特征点相关; (4) 通过基于模型构建的图像信息的代价函数进行转角估计并精确定标。采用特征匹配避免了直接信号域或图像变换处理, 有效提升了转角估计的精确性和运算效率, 同时提取的特征点具有很好的稳健性, 能适应实际较低信噪比下 ISAR 方位定标处理。

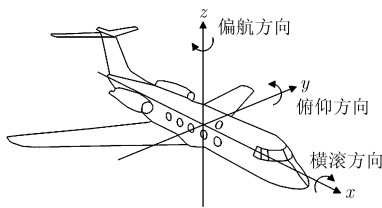


图 1 目标旋转的方向模型

2 ISAR 信号模型

目标旋转的方向模型如图 1 所示。ISAR 成像中以目标运动过程中的有效转角矢量为轴确定 2 维转台成像平面, 模型如图 2 所示。在合成孔径时间内, 假设目标有效转角矢量不变, 经过 T_m 时间, 目标上某散射中心坐标 $P(x, y)$ 旋转至 $P(x', y')$, 引入转角 $\theta = \theta(t_m)$, 其中 t_m 为慢时间。纵向距离变化量 $\Delta y = -x \sin \theta(t_m) + y [\cos \theta(t_m) - 1]$, 得雷达斜距为

$$R(t_m) = R_0(t_m) + x \sin \theta(t_m) - y \cos \theta(t_m) \quad (1)$$

其中, 平动分量 $R_0(t_m)$ 为雷达到目标中心的距离。

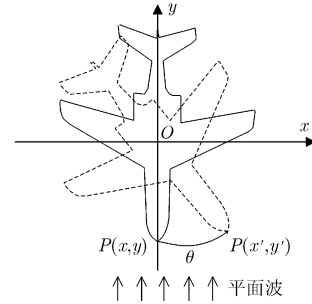


图 2 微旋转目标的 2 维平面模型

设雷达发射线性调频信号为

$$s(\tau) = \text{rect}[\tau / T_p] \times \exp(j\pi\gamma\tau^2) \times \exp(j2\pi f_c \tau) \quad (2)$$

其中, $\text{rect}[\cdot]$ 为窗函数, τ 为快时间, T_p 为脉宽, γ 为调频率, f_c 为载频。由线性调频信号得到距离向匹配滤波器 $h(\tau) = s^*(-\tau)$, 其中 $[\cdot]^*$ 为复数共轭函数。假设时延 $\tau_0 = 2R(t_m)/c$, 距离脉冲压缩后的基频回波信号为

$$\begin{aligned} e(\tau, t_m) &= \sum_{(x,y) \in S} \text{IFFT}_{\tau} \{ \text{FFT}_{\tau} [s(\tau - \tau_0)] \text{FFT}_{\tau} [h(\tau)] \} \\ &= \sum_{(x,y) \in S} \gamma T_p \text{sinc}[\gamma T_p (\tau - \tau_0)] \times \text{rect}[t_m / T_m] \\ &\quad \times \exp[-j4\pi R(t_m) / \lambda] \end{aligned} \quad (3)$$

其中, T_m 为方位相干时间。对回波数据首先进行平动补偿, 一般利用包络对齐与相位自聚焦技术^[14,15]。经过平动补偿处理后, 瞬时距离改写为

$$R(t_m) = r_0 + x \sin \theta(t_m) - y \cos \theta(t_m) \quad (4)$$

其中, r_0 为转台中心相对雷达相位中心的距离。在小角度假设下 (3° 至 5°), 可得到以下近似: $\cos \theta(t_m) \approx 1 - \theta^2(t_m)/2 = 1 - \omega^2 t_m^2 / 2$ 和 $\sin \theta(t_m) \approx \theta(t_m) = \omega t_m$, 则瞬时距离近似为

$$R(t_m) \approx r_0 - y + x\omega t_m + y\omega^2 t_m^2 / 2 \quad (5)$$

利用 Keystone 变换校正目标转动引入的距离走动^[16,17]。忽略常数项和二次项, 进行距离压缩后信号为

$$\begin{aligned} e(\tau, t_m) &= \sum_{(x,y) \in S} \gamma T_p \text{sinc} \{ \gamma T_p [\tau - 2(r_0 - y) / c] \} \\ &\quad \times \text{rect}[t_m / T_m] \times \exp(j4\pi x\omega t_m / \lambda) \end{aligned} \quad (6)$$

经过方位向傅里叶变换后得到的回波信号为

$$\begin{aligned} e(\tau, f_m) &= \text{FFT}_{t_m} [e(\tau, t_m)] \\ &= \sum_{(x,y) \in S} \gamma T_p \text{sinc} \{ \gamma T_p [\tau - 2(r_0 - y) / c] \} \\ &\quad \times T_m \text{sinc} [T_m (-2\omega x / \lambda + f_m)] \end{aligned} \quad (7)$$

简便起见, 通过系数代换, 信号离散表达式为

$$\begin{aligned} e(\kappa_r, \kappa_\alpha) &= \sum_{(x,y) \in S} T \times \text{sinc} [A_1 (\kappa_r - y)] \\ &\quad \times \text{sinc} [A_2 (\kappa_\alpha - x)] \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\kappa_r \in [-M/2 : \rho_r : M/2]$, $\kappa_\alpha \in [-N/2 : \rho_\alpha : N/2]$, $A_1 = -2\gamma T_p / c$, $A_2 = 2\omega T_m / \lambda$, $\kappa_r = r_0 - c\tau / 2$, $\kappa_\alpha = \lambda f_m / (2\omega)$, 变换系数 $T = \gamma T_p T_m$, M 为距离向尺寸, N 为方位向尺寸, 距离向分辨率 $\rho_r = c / (2B)$, 方位向分辨率 $\rho_\alpha = \lambda / (2\theta)$, 其中 c 为光速, λ 为波长, B 为发射信号的带宽, $\theta = T_m \omega$ 为相干时间内转角。

从上述回波信号模型可见, 可通过散射中心坐标位置的旋转变换来实现对目标转角速度 ω 的有效估计。根据图 2 所示, 假设在同一雷达成像平面下, 点目标坐标随转角的变化关系为

$$\begin{aligned} [X_1^1, X_2^1, \dots, X_n^1] &= \mathbf{M}(\theta) \times [X_1^2, X_2^2, \dots, X_n^2] \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \times [X_1^2, X_2^2, \dots, X_n^2] \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $X_k^\eta = [x_k, y_k]^\top$ 为第 η 幅图像中经过转置的第 k 个特征点坐标位置, 其中 $\mathbf{M}(\theta)$ 为转移矩阵。综上所述, 相干处理时间内目标转角可通过相邻孔径图像配准实现^[8], 即对某时刻 ISAR 图像旋转与相邻时刻 ISAR 图像配准来估计转角。

3 特征点匹配的 ISAR 目标转角估计方法

3.1 特征点信息的提取算法

对于特征点的提取主要利用尺度不变特征变换 (Scale Invariant Feature Transform, SIFT)^[10] 和快速鲁棒特征 (Speeded-Up Robust Features, SURF)^[11]。SIFT 提取的角点可提高目标几何中心的确定精度, 但对角点不多的刚体目标通过双向配准后其特征点数不够, 故引入 SURF 以提高有效特征点数目。

3.1.1 SIFT 特征点的提取算法 SIFT 算法采用高斯卷积核进行尺度变换得到图像相应尺度空间 $L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y)$, 其中 $G(x, y, \sigma)$ 为尺度因子的高斯函数, (x, y) 为点位置坐标, σ 为点所在图像的尺度。再利用不同尺度的高斯差分核与图像卷积, 得到相应的高斯差分尺度空间为

$$\begin{aligned} D(x, y, \sigma) &= [G(x, y, \eta\sigma) - G(x, y, \sigma)] * I(x, y) \\ &= L(x, y, \eta\sigma) - L(x, y, \sigma) \end{aligned} \quad (10)$$

之后对图像进行不同尺度上的降采样, 提高特征点提取的抗噪性, 同时实现图像尺度不变性变换; 由同一频阶下相邻图像的差分图像寻找尺度空间极值点, 并利用 2 维函数拟合得到精确的特征点, 再利用提取的特征点周围图像的梯度方向直方图统计特性得到鲁棒性高的梯度方向, 作为该特征点主方向。在点 (x, y) 处对应的梯度大小和方向分别为

$$\begin{aligned} \gamma(x, y) &= \\ &= \sqrt{[L(x+1, y) - L(x-1, y)]^2 + [L(x, y+1) - L(x, y-1)]^2} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \vartheta(x, y) &= \arctan \{ [L(x, y+1) - L(x, y-1)] \\ &= \arctan \{ [L(x, y+1) - L(x, y-1)] / [L(x+1, y) - L(x-1, y)] \} \end{aligned} \quad (12)$$

将每个特征点所对应的图像坐标轴旋转到特征点的主方向, 并且选取一定大小的窗口用以生成特征点的描述符向量。具体如下: 以图像的像素为单位, 对于当前一个特征点以每 $4 \times 4 = 16$ 个相邻的小块为一个种子点计算 8 个方向上的梯度方向和梯度大小, 再以 $4 \times 4 = 16$ 个相邻的种子点对每个方向的梯度采用统计方法, 得到 $64 \times 8 = 128$ 维的特征数据并以此作为 SIFT 描述符向量。这样得到的描述符向量采用了梯度方向上的统计方法, 对图像的旋转、缩放等变化具有较好的鲁棒性。

3.1.2 SURF 特征点的提取算法 由于 SIFT 的角点包含目标特征, 但其数目不足以提高转角估计的精度, 故引入 SURF。SURF 采用快速 Hesse 矩阵, 提高了效率和精确度。对图像 I 的点 $p = (x, y)$, 它在尺度 σ 的快速 Hesse 矩阵 $\mathbf{H}(p, \sigma)$ 为

$$\mathbf{H}(p, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(p, \sigma) & L_{xy}(p, \sigma) \\ L_{xy}(p, \sigma) & L_{yy}(p, \sigma) \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, $L_{xx}(p, \sigma)$ 为点 $p = (x, y)$ 处二阶高斯导数 $\partial^2 g(\sigma) / \partial x^2$ 和点的卷积, $L_{xx}(p, \sigma), L_{xy}(p, \sigma), L_{yy}(p, \sigma)$ 相似。由于理论的滤波器在实际应用中不理想, 利用 Lowe 的 LoG^[10] 近似, 即盒式滤波器近似 Hesse 矩阵, 并通过滤波器尺度变换形成滤波器金字塔对目标图像卷积。在尺度空间内, 每一点对应的 Hesse 矩阵行列式值为

$$\det(\mathbf{H}) = D_{xx} D_{yy} - (0.9 D_{xy})^2 \quad (14)$$

通过对滤波器进行 5 个频阶的尺度空间变换, 在同一频阶下选取 $\det(\mathbf{H})$ 大于上下相邻近的 26 个点所对应的点即为极值点, 此类类似于 SIFT 中极值点的确定。每个频阶通过 4σ 大小的 Haar 小波响应在当前特征点周围半径为 6σ 内的扇形内搜索, 得到包含点数最多的方向作为特征点的主方向; 将描述向量按照 4×4 等分成 16 个窗口, 每个窗口采用 5×5 等分的 25 个像素, 计算每个像素的 2σ 的 Haar 小波和 x, y 方向的小波响应得到和向量 $\mathbf{V} = [\sum dx, \sum dy, \sum |dx|, \sum |dy|]$, 最终得到每个特征点相应的特征点描述符向量。

3.2 特征点配准算法

3.2.1 基于特征描述向量的粗配准算法 由于不同图像上同一个目标的特征描述符向量在理论上是相

近的,可以根据其特征描述符向量最近原则来配准,一般常用的是利用两个特征描述符向量的欧氏距离并满足一定阈值范围作为配准的有效方法。两个不同特征点描述符向量对应的欧氏距离为

$$\begin{aligned} \text{Dis}_{i,j}(\varepsilon) &= \|X_{i,\varepsilon}^1 - X_{j,\varepsilon}^2\| \\ &= \sqrt{(x_{i,\varepsilon}^1 - x_{j,\varepsilon}^2)^2 + (y_{i,\varepsilon}^1 - y_{j,\varepsilon}^2)^2} \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $i \in [1, L_1], j \in [1, L_2], \varepsilon \in [1, Q]$, $X_{i,\varepsilon}^1$ 为第 1 幅图像中第 i 个特征点的特征描述向量的第 ε 个特征描述值, $X_{j,\varepsilon}^2$ 为第 2 幅图像中第 j 个特征点的特征描述向量的第 ε 个特征描述值, x 和 y 分别为 X 的横、纵坐标值, L_1 为第 1 幅图提取的目标点数, L_2 为第 2 幅图提取的目标点数, Q 为特征点描述值数目, 参考值为 128。

在小转角下,通常以阈值范围内的最小欧氏距离作为准则估计小转角。但对于大转角,即整体欧氏距离都比较大时,该准则并不可行。然而,同一特征点在不同转角下的欧氏距离变化不大,故采用准则

$$\begin{aligned} &\|X_i^1 - X_j^2\| \\ &= \begin{bmatrix} \sum_{\varepsilon=1}^Q \text{Dis}_{1,1}(\varepsilon)/Q, & \cdots, & \sum_{\varepsilon=1}^Q \text{Dis}_{1,L_2}(\varepsilon)/Q \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{\varepsilon=1}^Q \text{Dis}_{L_1,1}(\varepsilon)/Q, & \cdots, & \sum_{\varepsilon=1}^Q \text{Dis}_{L_1,L_2}(\varepsilon)/Q \end{bmatrix} \xrightarrow{\Gamma} \begin{bmatrix} \widehat{\text{Dis}}_1 \\ \vdots \\ \widehat{\text{Dis}}_{L_1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

仿射关系 Γ 为

$$\widehat{\text{Dis}}_i = \min \left[\sum_{\varepsilon=1}^Q \frac{\text{Dis}_{i,j}(\varepsilon)}{Q} \right] / \text{hyp-min} \left[\sum_{\varepsilon=1}^Q \frac{\text{Dis}_{i,j}(\varepsilon)}{Q} \right] < G \quad (17)$$

其中, $\widehat{\text{Dis}}_i$ 为最小欧氏距离, $\min[\cdot]$ 为最小值函数, $\text{hyp-min}[\cdot]$ 为次小值函数, G 为阈值 0.95。

本文算法采用双向匹配避免由匹配方向引起不同的特征点匹配数目而造成算法不稳定。尽管双向匹配会减少匹配的特征点数目,但是上述基于欧氏距离的配准准则可获取足够高的配准精度,因此可采用双向匹配剔除错误大的匹配对。本文的转角估计要求足够的特征点精确匹配,使得代价函数整体偏差不大。

3.2.2 基于 RANSAC 的精配准算法 由于提取的特征点具有不同能量,会引起粗配准特征点仍存在因低能量而造成失配。利用小转角下合成孔径数据中同一散射点在图像中的位置变化,采用基于位置坐标的精配准,一般用最小均方误差(Mean Square Error, MSE)^[10]。但该算法对线性特征点才具有良好

效果,对于波动或者非线性特征点的位置坐标会因均值不等于最佳值(即包含最多点下的均值)而导致失配,故采用随机采样一致性(RANdOm SAmple Consensus, RANSAC)^[12],以渐近线范围内包含点数最多的特征点为精配准结果。

以粗配准的特征点的欧式距离为数据库,采用 RANSAC 进行本文的精配准算法:首先初点集为随机选取的两个数据点,计算其相应的初始直线模型;记录该直线模型在参考噪声 $\text{NE}=0.01$ 范围内局内点与局外点的比值;以此类推,对所有数据点进行数据点的随机选取和局内点与局外点的比值计算,得到比值最大的直线模型;最后重新计算局内点形成的模型,得到最佳直线模型。如图 3 所示,所测数据库为本文仿真数据粗配准后特征点的欧氏距离,黑色圆点为局内点,即最佳直线模型在参考噪声范围内所包含的有效数据点;黑色十字为局外点,表示最佳直线模型外的无效数据点。

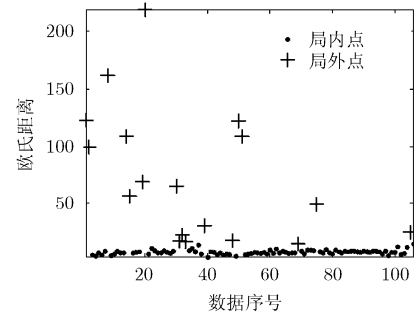


图3 RANSAC 直线模型的建立

3.3 基于代价函数的转角估计

为了克服平动分量在相邻子孔径的 ISAR 图像中引入的特征点几何中心的偏差,需要对特征点坐标进行几何中心归一化。通常利用图像中具有最大互相关函数值的像素点作为目标的几何中心点^[6],而根据局部特征点的性质,本文利用精确配准特征点的均值坐标 $[\bar{x}_k^1, \bar{y}_k^1]$ 和 $[\bar{x}_k^2, \bar{y}_k^2]$ 作为几何中心。第 1 幅图和第 2 幅图中精确配准的第 k 个特征点对的位置坐标 $[x_k^1, y_k^1]$ 和 $[x_k^2, y_k^2]$ 经过几何中心归一化后变为

$$[\hat{x}_k^\eta, \hat{y}_k^\eta] = [x_k^\eta, y_k^\eta] - [\bar{x}_k^\eta, \bar{y}_k^\eta] \quad (18)$$

其中, $\eta = 1, 2$ 为 ISAR 图像索引号。由于不同的旋转角度会引入成像平面在方位向上尺度的变化,为了其引入的代价函数误差,需要进行第 l 次的角度搜索,引入尺度校正矩阵 S_l

$$\begin{aligned} S_l &= \begin{bmatrix} \rho_{Al} / \rho_R & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \rho_{Al} = \Delta F_d \lambda / (2\theta_l), \\ \rho_R &= \rho_r, \quad l = 1, 2, \dots, 128 \end{aligned} \quad (19)$$

其中, ρ_{Al} 为第 1 幅图的方位向分辨率, ρ_R 为第 2 幅图的距离向分辨率, ρ_r 为实际距离分辨率, ΔF_d 为多普勒单元带宽, θ_l 为搜索转角。利用尺度校正矩阵 S_l , 进行尺度变换后的特征点位置坐标为

$$\begin{bmatrix} x_k' \\ y_k' \end{bmatrix} = [\hat{x}_k', \hat{y}_k'] \times S_l \quad (20)$$

同时, 利用搜索转角 θ_l 和式(9)中的转移矩阵, 将第 2 幅图像中的特征点位置坐标 $[x_k', y_k']$ 进行角度为 θ_l 的位置坐标旋转, 得到旋转后的位置坐标为

$$\begin{bmatrix} x_k'' \\ y_k'' \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \cos \theta_l & \sin \theta_l \\ -\sin \theta_l & \cos \theta_l \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_k' \\ y_k' \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

由于大能量的目标点在微旋转后其能量值变化不大, 其对转角估计作用比小能量点大。因此, 在特征点粗配准中失配部分通常由小能量点造成。基于这一现象, 通过权值函数提高大能量点在转角估计的比重而降低小能量点的比重, 权值函数为

$$W_k = \left| 20 \times \lg \left(\frac{w_k' + w_k^{'+1}}{2} \right) \right|, \quad w_k = |A_k|^{0.25} + 1 \quad (22)$$

其中, w_k 为经验公式修正后的第 k 个特征点权值, A_k 为点幅度值。构建出的代价函数 C 的表达式为

$$C = \sum_{k=1}^M W_k \times \sqrt{(x_k'' - x_k')^2 + (y_k'' - y_k')^2} \quad (23)$$

其中, M 为匹配对数。经过加权处理的特征点利用搜索法进行逆旋转获取匹配对的位置偏差, 通过代价函数判决。搜索法中, 首先利用 128 个预设值进行初步转角估计, 再利用迭代进一步搜索以提高估计转角的精度, 为了减小迭代引入的坐标尺度变化, 引入式(20)。最后将最小代价函数对应的转角视为最佳估计转角。本文算法的主要流程如图 4 所示。

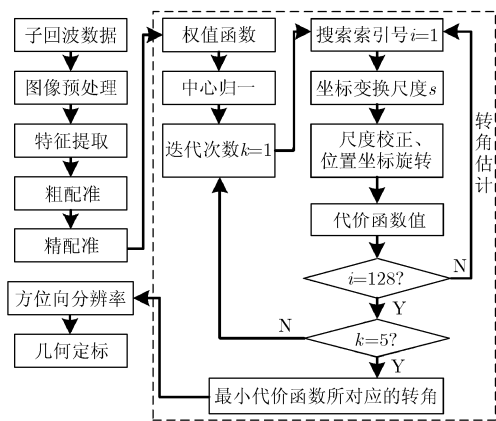


图 4 本文算法的流程

4 仿真及实测数据验证

4.1 仿真数据验证

由于 3 维雅克-42 飞机模型具有 3 个方向上的旋转角度, 即俯仰角、偏航角和横滚, 利用刚体目标的小转动特性可估算出目标在偏航方向上的角度, 即为姿态变化的旋转角度。仿真参数如表 1 所示。

图 5, 图 6 中, 分别提取了 146 个特征点, 经过粗配准和精配准后配对 142 个特征点, 精配准剔除了图 7 中白线部分的失配点, 使得匹配结果更为精确; 图 9 的 5 次迭代中, 代价函数最小时所对应的估计的转角约为 2.4877° , 与实际的转角 2.56° 的误差率为 2.8225%; 图 10 研究对回波数据加入不同程度的高斯噪声下其对转角估计的高精确性, 从图 10 中可以看出, 对于低信噪比 SNR 为 -10 dB 的情况下, 角度偏差仍可以保持在 0.1° 以内; 从图 11, 图 12 的定标结果来看, 模型飞机的实际机身长为 38 m, 机翼长为 35 m, 估计的机身长约为 38.1442 m, 机翼长约为 35.4251 m, 与实际尺寸的误差分别为 0.38% 和 1.21%。在实际的转角估计应用中 2.8225% 的精度验证了本文算法的有效性。

4.2 实测数据验证

利用距离-多普勒(Range-Doppler, RD)算法和高斯滤波得到相邻雅克-42 飞机子孔径如图 13 和图 14 所示。由于平动分量和转角较小, 两者整体姿态变化不大, 但局部姿态变化大。因为即使转角较小, 若雷达视线与目标位置恰好使散射点回波能量很弱, 则所得点能量较弱。实际转角约为 1.5° , 参数如表 2 所示。

针对图 13, 图 14, 本算法提取 52 个特征点, 经过粗配准和精配准后保留 43 个特征点, 在 5 次迭代中, 代价函数最小时所对应的估计的转角约为 1.7077° , 即 0.0298 rad。从图 17, 图 18 的定标结果看, 雅克-42 的机身长约为 35.51 m, 机翼长约为 33.82 m, 与实际误差分别为 2.39% 和 3.04%, 验证了算法的有效性。

5 结束语

以上仿真数据和实测数据验证了本文提出的基于特征配准的方位定标算法的高精确性和稳健性。比较与传统刚体目标定标算法, 本文利用 2 维图像域, 由精确配准的特征点的位置坐标和能量估计转

表 1 转角估计的仿真参数

回波数据	成像大小	波长	带宽	脉冲重复频率	多普勒脉宽单元	中心时间间隔
256×256	512×512	0.0333 m	500 MHz	100 Hz	0.3906 Hz	2.5600 s

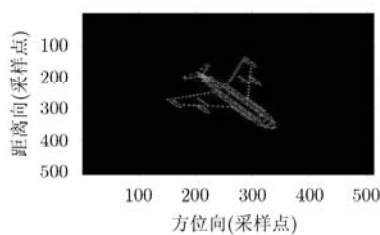


图 5 回波子图

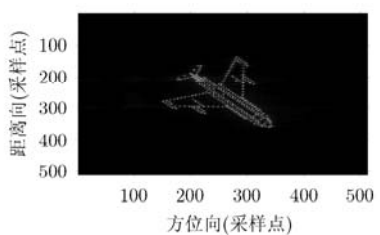


图 6 雷达视线扫过 2.56° 后的回波子图

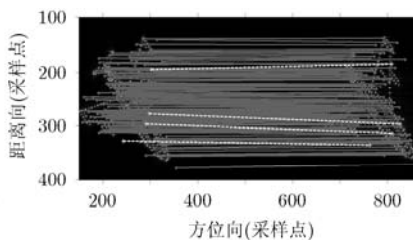


图 7 基于欧氏距离的粗配准效果

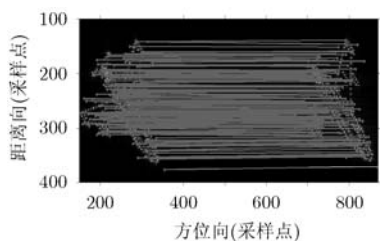


图 8 基于 RANSAC 精配准效果

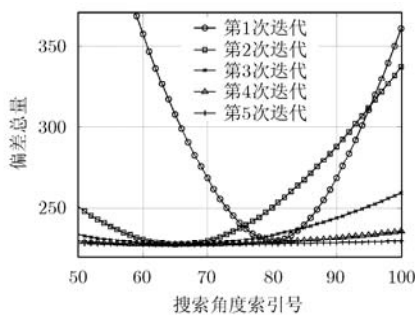


图 9 转角估计曲线

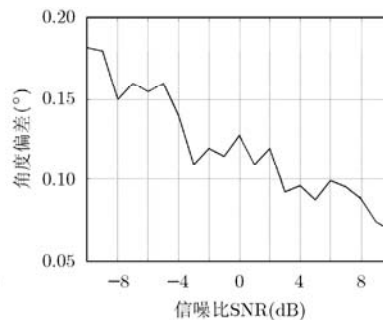


图 10 不同信噪比测试精度曲线

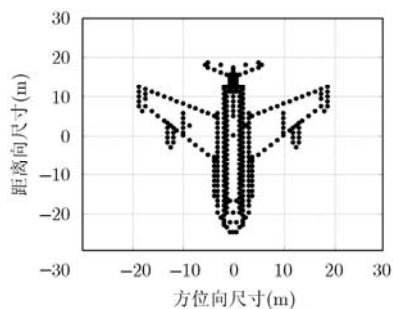


图 11 点仿真的雅克-42 飞机的 3 维模型图

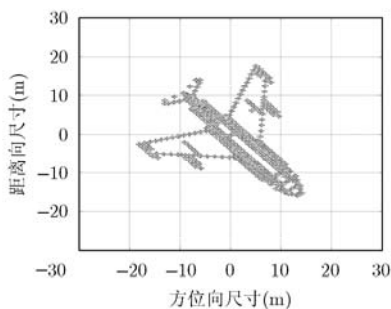


图 12 几何定标图像

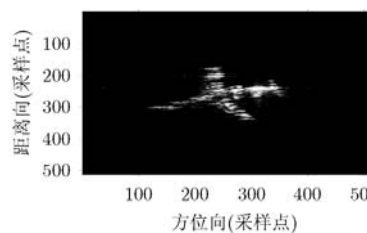


图 13 回波子图

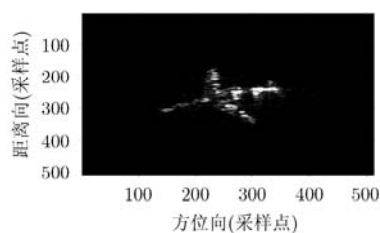


图 14 雷达视线扫过约 1.5° 后的回波子图

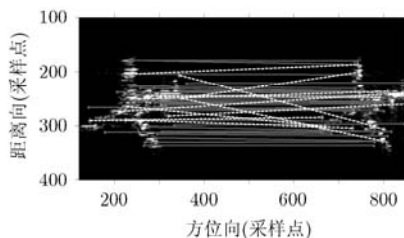


图 15 基于欧氏距离的粗配准效果

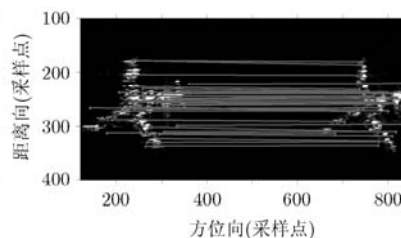


图 16 基于 RANSAC 精配准效果

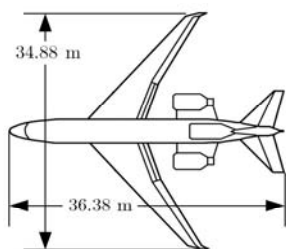


图 17 雅克-42 平面图

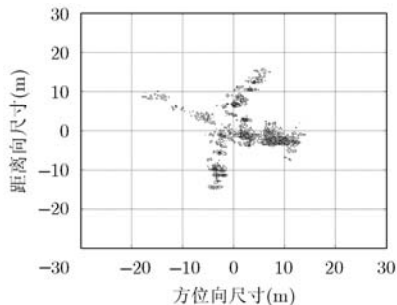


图 18 几何定标图像

表2 转角估计的仿真参数

回波数据	成像大小	波长	带宽	脉冲重复频率	多普勒脉宽单元	中心时间间隔
256×128	512×512	0.0333 m	400 MHz	100 Hz	0.7813 Hz	1.2800 s

角。同时，利用局部高能量的特征点在处理上比全局配准精确。本文算法至今在ISAR的应用比较少，是一种新颖的方法，对于从图像域研究ISAR目标连续运动中的转角估计、目标的物理构造、航迹探测等奠定了基础。

参考文献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 229-275.
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Techniques[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2005: 229-275.
 - [2] 邱晓晖, 朱兆达. 一种用于ISAR成像的转角采样不均匀补偿方法[J]. 现代雷达, 1996, 18(3): 1-6.
Qiu Xiao-hui and Zhu Zhao-da. A compensation method for ununiform sampling of rotating angle in ISAR imaging[J]. *Modern Radar*, 1996, 18(3): 1-6.
 - [3] 姜正林, 保铮. 低分辨率雷达目标成像的横向距离定标[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(4): 365-372.
Jiang Zheng-lin and Bao Zheng. A new method of cross-range scaling of low resolution radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2001, 23(4): 365-372.
 - [4] Martorella M. Novel approach for ISAR image cross-range scaling[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(1): 281-294.
 - [5] 王勇, 姜义成. 一种估计ISAR成像转角的新方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 521-523.
Wang Yong and Jiang Yi-cheng. A new method for estimating the rotation angle of ISAR image[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(3): 521-523.
 - [6] Kim M, Wu Guo-rong, Yap P T, et al. A general fast registration framework by learning deformation-appearance correlation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(4): 1823-1833.
 - [7] Lammers U H W and Marr R A. Doppler imaging based on radar target precession[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, 29(1): 166-173.
 - [8] Reddy B S and Chatterji B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration [J]. *IEEE Transactions on Pattern, Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 5(8): 1266-1271.
 - [9] Xiong Zhen and Zhang Yun. A novel interest-point-matching algorithm for high-resolution satellite images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(12): 4189-4200.
 - [10] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant key-points[J]. *International Journal of Computer Version*, 2004, 60(2): 91-110.
 - [11] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features (SURF)[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
 - [12] Raguram R, Chum O, Pollefeys M, et al. USAC: a universal framework for random sample consensus[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(8): 2022-2038.
 - [13] Wang Shan-hu, You Hong-jian, and Fu Kun. BFSIFT: a novel method to find feature matches for SAR image registration[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4): 649-653.
 - [14] Sheng Jia-lian, Duan Jia, Xing Meng-dao, et al. Cross-range scaling combining motion compensation for ISAR imaging[C]. IET International Radar Conference, Xi'an, Apr. 2013: 1-6.
 - [15] 杨磊, 熊涛, 张磊, 等. 应用联合自聚焦实现低信噪比ISAR成像平动补偿[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(3): 63-71.
Yang Lei, Xiong Tao, Zhang Lei, et al. Translational motion compensation for ISAR imaging based on joint autofocusing under the low SNR[J]. *Journal of Xidian University*, 2012, 39(3): 63-71.
 - [16] Wu Yu-feng, Sun Guang-cai, Xia Xiang-gen, et al. An improved SAC algorithm based on the range-keystone transform for doppler rate estimation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(4): 741-745.
 - [17] 仲利华, 胡东辉, 丁赤飏, 等. 一种稀疏孔径下大尺寸目标的ISAR成像方法[J]. 雷达学报, 2012, 1(3): 292-300.
Zhong Li-hua, Hu Dong-hui, Ding Chi-biao, et al. ISAR sparse aperture imaging algorithm for large size target[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(3): 292-300.
 - [18] Luc V. Multi-look autofocus in high resolution inverse SAR imaging[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Turkey, June. 2000, 5: 3029-3032.
 - [19] Wu Yi-hong and Verdú S. Functional properties of minimum mean-square error and mutual information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(3): 1289-1301.
- 许志伟: 男, 1990年生, 硕士生, 研究方向为ISAR成像。
张磊: 男, 1984年生, 讲师, 研究方向为SAR/ISAR成像与运动补偿。
邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 研究方向为SAR/ISAR成像。