

基于图像旋转相关的空间目标ISAR等效旋转中心估计算法

史林 郭宝锋* 马俊涛 尚朝轩 解辉 曾慧燕

(陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系 石家庄 050003)

摘要: 为了消除逆合成孔径雷达(ISAR)越分辨单元徙动(MTRC)引起的图像散焦, 需要估计目标的等效旋转中心。该文以空间目标为研究对象, 提出了一种基于图像旋转相关的ISAR旋转中心估计算法。首先, 分析了ISAR的瞬时成像机理; 其次, 将采用相同运动补偿后的回波数据分段成像, 得到不同视角的2幅图像; 然后, 基于定标后的图像像素旋转和图像相关, 估计等效旋转中心。当假定的等效旋转中心与真实的旋转中心一致时, 2幅图像相关性最大, 据此得到旋转中心位置。仿真实验表明, 该算法能够有效利用图像整体信息, 估计出高精度的目标等效旋转中心, 利于提高成像质量。

关键词: 逆合成孔径雷达; 空间目标; 旋转中心估计; 图像旋转; 图像相关

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)06-1280-07

DOI: 10.11999/JEIT181086

Rotation Center Estimation Algorithm for ISAR Image of the Space Target Based on Image Rotation and Correlation

SHI Lin GUO Baofeng MA Juntao SHANG Chaoxuan

XIE Hui ZENG Huiyan

(Department of Electronic and Optical Engineering, Army Engineering
University Shijiazhuang Campus Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The equivalent rotation center should be estimated accurately in the Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) for the issue of image defocusing induced by the Migration Through Resolution Cells (MTRC). In this paper, an equivalent rotation center estimation algorithm based on image rotation and correlation is proposed for the space target. First, the instantaneous imaging mechanism of ISAR is analyzed. Second, two images with different observation angles are obtained by using the echo data with the same motion compensation algorithm. Finally, the equivalent rotation center is estimated based on the scaled image pixel rotation and image correlation. Consequently, the estimated position of the rotation center is obtained, when the assumed rotation center is in accordance with the real one and the maximum correlation coefficient of two images is achieved. The results demonstrate the effectiveness and robustness of the proposed algorithm.

Key words: Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR); Space target; Rotation center estimation; Image rotation; Image correlation

1 引言

逆合成孔径雷达(ISAR)成像技术^[1-4]可提供目标的2维结构特征及尺寸信息, 有利于目标分类与识别, 在民用和军用领域引起了广泛关注^[5-9]。随着空间技术的发展, 空间环境日趋复杂, 对空间目标进行监视、跟踪和识别, 具有重要意义^[1,10]。本

文以空间目标为研究对象, 利用高分辨率ISAR系统获得更精细的空间目标结构特征, 为空间目标识别奠定基础。

距离-多普勒(Range-Doppler, RD)算法, 物理意义明确、操作简便, 被广泛应用于成像仿真及实测数据的处理中。但当目标尺寸过大或成像累积转角过大时, 该算法存在越分辨单元徙动(Migration Through Resolution Cells, MTRC)问题, 造成图像散焦。散射点离旋转中心越远, 散焦现象越严重^[11-13]。对于非合作目标, 通过估计目标有效转速定标, 并构造补偿相位项, 得到精聚焦ISAR图像^[14-17]。对于合作的空间目标, 有效转速可通过视

收稿日期: 2018-11-26; 改回日期: 2019-02-25; 网络出版: 2019-03-05

*通信作者: 郭宝锋 guobao_feng870714@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61601496)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61601496)

角变化获得。为了完成MTRC校正, 获得精聚焦ISAR图像, 需要高精度的估计目标等效旋转中心^[18,19]。

目标等效旋转中心估计可由基于单特显点的运动补偿方法近似得到, 但该方法估计精度较低, 影响后续图像越分辨单元徙动校正的聚焦效果。空间目标的实测数据中, 回波信噪比低, 难以找到单一的特显点, 该方法的应用受限。运动补偿中的初相校正算法, 例如相位梯度自聚焦(Phase Gradient Autofocusing, PGA)算法, 将等效旋转中心对应的方位项相位补偿为一个常数, 等效旋转中心在零多普勒单元上。但由于包络对齐算法的精度限制, 通过其得到的旋转中心的距离坐标与真实的等效旋转中心距离坐标存在误差。针对此问题, 文献[18]和文献[19]利用3个散射点在两幅图像中的位置差, 估计旋转中心的距离坐标。但两幅图像中的散射点位置变化相对较小, 该算法难以获得较高的估计精度, 并且实测数据中, 孤立散射点不容易找到, 此算法应用受限。针对该问题, 本文提出了一种基于图像旋转相关的空间目标等效旋转中心估计算法。该算法利用图像整体信息估计目标的等效旋转中心, 具有更高的估计精度, 可有效提高成像质量。

2 ISAR信号模型

ISAR成像模型如图1所示, 图1中 R 为雷达站位置, 以成像起始时刻的目标质心 o 点为原点建立右手坐标系 xoy , 其中, y 轴由雷达指向目标, x 轴与 y 轴垂直, 散射点 P 在 xoy 平面内的坐标为 (x_p, y_p) ; 成像时刻 t_m , 散射点 P 运动至 P' 位置, 设此过程中, 雷达视线变化角度为 θ_m (顺时针旋转为负, 逆时针旋转为正), 雷达到目标质心的距离为 R_m , 雷达到 P' 点的距离为 R_{pm} , 则

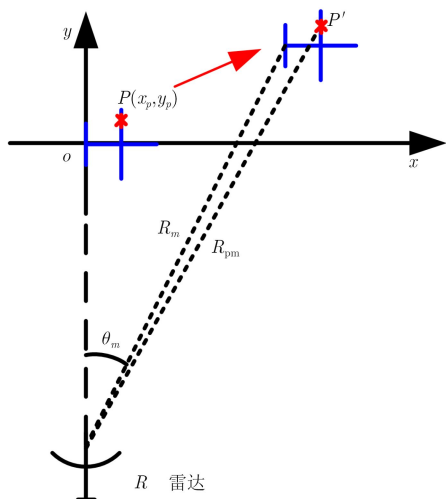


图1 ISAR成像模型

$$R_{pm} = R_m + y_p \cos \theta_m - x_p \sin \theta_m \quad (1)$$

假定雷达以脉冲重复周期PRT发射宽带线性调频(LFM)信号

$$s_t(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c \hat{t} + \frac{1}{2}\mu \hat{t}^2\right)\right] \quad (2)$$

其中, $\text{rect}(x)$ 为矩形窗函数, 当 $|x| \leq 0.5$ 时, $\text{rect}(x) = 1$, 当 $|x| > 0.5$ 时, $\text{rect}(x) = 0$; T_p 为发射信号脉冲宽度, f_c 为信号载频, μ 为调频斜率; \hat{t} 为快时间, $t_m = m \cdot \text{PRT}$ ($m=0, 1, 2, \dots, M$)为慢时间。经过预处理和运动补偿后, 散射点 $P(x_p, y_p)$ 距离像可表示为

$$s_{if-c}(\hat{t}, t_m) = \sigma_p \sqrt{\mu} T_p \cdot \text{sinc}\left[\mu T_p \left(\hat{t} - 2 \frac{\Delta R_{pm}}{c}\right)\right] \cdot \exp\left(-j4\pi f_c \frac{\Delta R_{pm}}{c}\right) \quad (3)$$

式中, $\Delta R_{pm} = R_{pm} - R_{om} = y_p \cos \theta_m - x_p \sin \theta_m$, σ_p 为散射点 $P(x_p, y_p)$ 的散射系数。 $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / (\pi x)$ 为sinc函数。

3 等效旋转中心估计

3.1 成像特性分析

第 m 个脉冲时, 散射点瞬时距离峰值出现在 ΔR_{pm} 位置, 不妨记为 y_{pm} , 则

$$y_{pm} = y_p \cos \theta_m - x_p \sin \theta_m \quad (4)$$

对式(3)的相位求导, 可得到散射点方位向分辨的瞬时多普勒频率

$$f_{d_pm} = -\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d}{dt_m} \left(-j4\pi f_c \frac{\Delta R_{pm}}{c}\right) = \frac{2f_c}{c} (-y_p \sin \theta_m - x_p \cos \theta_m) \quad (5)$$

通过定标, 可以得到方位坐标

$$x_{pm} = y_p \sin \theta_m + x_p \cos \theta_m \quad (6)$$

联立式(4)和式(6)可得

$$\begin{bmatrix} x_{pm} \\ y_{pm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_m & \sin \theta_m \\ -\sin \theta_m & \cos \theta_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)是第 m 个脉冲时刻(t_m 时刻)的瞬时成像结果, 可以看出, 成像结果是散射点原始坐标绕旋转中心旋转后的结果, 令 $\mathbf{R}_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta_m & \sin \theta_m \\ -\sin \theta_m & \cos \theta_m \end{bmatrix}$, \mathbf{R}_θ 即为旋转矩阵。

由式(7), 拓展至2个成像弧段, 如图2所示, 若2个成像弧段积累相同的脉冲个数 N , 累积转角分别为 φ_1, φ_2 , 假定起始观测角度为 φ_0 , 由于是考察两个相邻图像的相关特性, 第1个成像弧段的起始值, 并不影响相邻图像的相关特性, 不妨假定

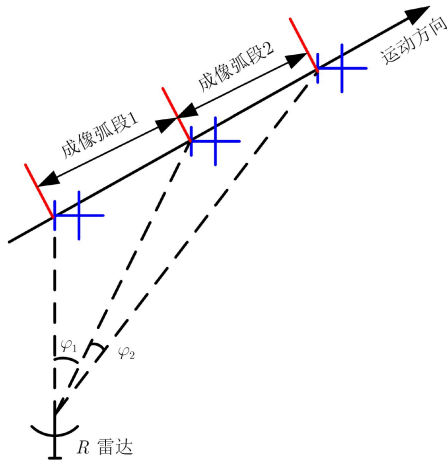


图2 2个弧段成像示意图

$\varphi_0=0$ 。假设成像弧段1和成像弧段2具有相同的等效旋转中心(不妨设旋转中心就是目标质心),根据式(7),对两个弧段采用RD算法成像时(而非瞬时成像),散射点的坐标关系满足

$$\begin{bmatrix} x_{p_ISAR1} \\ y_{p_ISAR1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_1/2) & \sin(\varphi_1/2) \\ -\sin(\varphi_1/2) & \cos(\varphi_1/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} x_{p_ISAR2} \\ y_{p_ISAR2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_1+\varphi_2/2) & \sin(\varphi_1+\varphi_2/2) \\ -\sin(\varphi_1+\varphi_2/2) & \cos(\varphi_1+\varphi_2/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (9)$$

联立式(8)和式(9),可得2幅ISAR图像的关系

$$\begin{bmatrix} x_{p_ISAR2} \\ y_{p_ISAR2} \end{bmatrix} = \Theta \begin{bmatrix} x_{p_ISAR1} \\ y_{p_ISAR1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, $\Theta = \begin{bmatrix} \cos[(\varphi_1+\varphi_2)/2] & \sin[(\varphi_1+\varphi_2)/2] \\ -\sin[(\varphi_1+\varphi_2)/2] & \cos[(\varphi_1+\varphi_2)/2] \end{bmatrix}$ 为旋转矩阵, $(\varphi_1+\varphi_2)/2$ 为2幅ISAR图像的视角差,式(10)表明,两个弧段的成像结果可通过旋转一定角度得到。需要注意的是,在式(10)的推导中,假定了两个成像弧段具有相同的等效旋转中心,为了满足该假设,需对成像弧段1和成像弧段2两个成像段的回波数据作统一的脉冲压缩、包络对齐和相位校正操作,然后对相位校正后的数据按脉冲数等分为两组,并分别成像,得到两个弧段的ISAR成像结果。这样,两幅图像的等效旋转中心是一致的。绕等效旋转中心旋转其中一幅图像,与另一幅图像重合时,图像相关性最大,否则,两幅图像不完全重合,图像相关性就小。根据图像相关值,可以判断图像旋转是否绕真正的旋转中心转动。

3.2 图像像素点旋转

在ISAR图像中,散射点分布在相应像素位置上,而式(10)的图像关系是通过具体坐标值给出了,无法根据该式直接旋转图像,需转化为像素点

的对应关系。假设 $(x_{p_ISAR1}, y_{p_ISAR1})$ 在2维图像中的像素位置为 $(X_{p_ISAR1}, Y_{p_ISAR1})$, 图像旋转中心的像素位置 (X_c, Y_c) , 则

$$x_{p_ISAR1} = (X_{p_ISAR1} - X_c) \Delta x_1 \quad (11)$$

$$y_{p_ISAR1} = (Y_{p_ISAR1} - Y_c) \Delta y \quad (12)$$

其中, $\Delta x_1 = \lambda / (2\varphi_1)$, $\Delta y = c / (2f_s)$ 分别代表每个多普勒单元和每个距离单元代表的长度。

即

$$\begin{bmatrix} x_{p_ISAR1} \\ y_{p_ISAR1} \end{bmatrix} = \mathbf{S}_1 \cdot \left\{ \begin{bmatrix} X_{p_ISAR1} \\ Y_{p_ISAR1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} \right\} \quad (13)$$

其中, $\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} \Delta x_1 & 0 \\ 0 & \Delta y \end{bmatrix}$ 为定标因子。

同理,可得

$$\begin{bmatrix} x_{p_ISAR2} \\ y_{p_ISAR2} \end{bmatrix} = \mathbf{S}_2 \cdot \left\{ \begin{bmatrix} X_{p_ISAR2} \\ Y_{p_ISAR2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} \right\} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{S}_2 = \begin{bmatrix} \Delta x_2 & 0 \\ 0 & \Delta y \end{bmatrix}$ 为定标因子, $\Delta x_2 = \lambda / (2\varphi_2)$ 。

联立式(10)、式(13)和式(14),可得

$$\begin{bmatrix} X_{p_ISAR1} \\ Y_{p_ISAR1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} = \Psi \cdot \left\{ \begin{bmatrix} X_{p_ISAR2} \\ Y_{p_ISAR2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} \right\} \quad (15)$$

其中, $\Psi = \mathbf{S}_1^{-1} \Theta \mathbf{S}_2$ 为两幅图像的像素位置转换矩阵。式(15)表明,第1幅ISAR像的散射点相对等效旋转中心的像素位置可由第2幅图像相对等效旋转中心的像素位置经变换矩阵 Ψ 得到。为了得到等效旋转中心位置,不妨先假定等效旋转中心位置,将第2幅图像绕假定的旋转中心通过旋转矩阵 Ψ 进行变换,将得到的图像与第1幅图像作互相关,当相关性最大时,对应旋转中心位置即为估计得到的目标等效旋转中心。

由于等效旋转中心在零多普勒单元上,根据FFT变换的性质可知,第一幅图像的第 $[N/2]$ 个多普勒单元即为零多普勒单元,其中, $[\cdot]$ 表示对数值向上取整。因此,等效旋转中心估计时只需假定其距离单元位置,通过1维搜索完成旋转中心的估计。需要说明的是,由于成像时,等效旋转中心一般在散射强度较大的点附近,因此,进行距离单元搜索时,可选择目标有效成像区域及其附近区域进行,以减小运算量。

3.3 算法流程

基于图像旋转相关的ISAR等效旋转中心估计流程如图3所示,具体步骤如下:

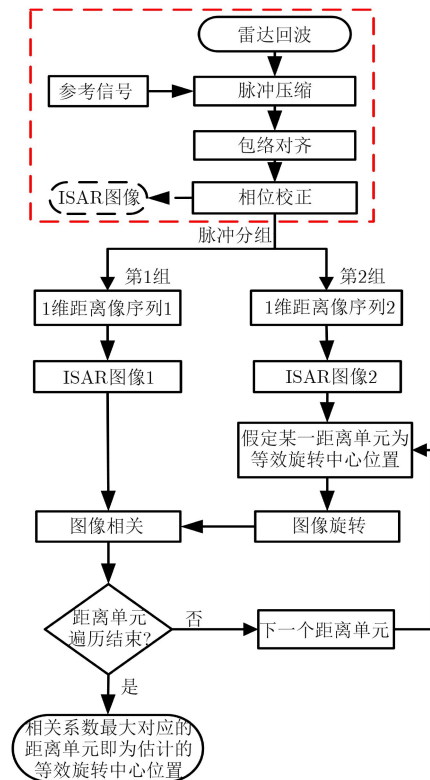


图3 等效旋转中心估计算法流程

- (1) 对ISAR回波进行脉冲压缩、包络对齐和相位校正，得到1维距离像序列；
- (2) 将1维距离像序列等分为两组，并分别成像，得到ISAR图像1和ISAR图像2；
- (3) 假定某一距离单元为等效旋转中心所在位置；
- (4) 对图像2依据式(15)进行旋转变换，得到新的图像，并与图像1作互相关；
- (5) 假设下一个距离单元为等效旋转中心位置，重复(4)，直至距离单元遍历结束；
- (6) 根据遍历过程，寻找两幅图像相关性最大时所假定的等效旋转中心位置，该位置就是估计得到的等效旋转中心。

3.4 运算量分析

本小节给出算法的运算量分析。假设分组后两组数据的脉冲个数为 M ，等效旋转中心估计选择的距离单元搜索范围为 L ，各关键步骤对应的运算量如表1所示。

4 仿真实验

4.1 仿真场景及雷达参数设置

为验证本文算法有效性，进行了仿真实验。设置雷达站位于南京市。选择国际空间站卫星的轨道作为模拟轨道，其卫星的轨道信息由两行轨道根数(Two Line Elements, TLE)^[20]确定(该根数可在美国国家空间监视网下载)。TLE数据如表2所示，这是国际空间站2018年8月10日01:14'15"的轨道信息。

表1 运算量统计

	实数乘法	实数加法
图像旋转	$4ML^2$	$8ML^2$
图像相关	ML^2	ML^2

表2 国际空间站TLE根数(2018年8月10日)

1	25544U	98067A	18222.05156756	0.00001108
	00000-0	24256-40	9993	
2	25544	51.6416	110.2592	0005763
	95.2967	15.53817336126892		44.5593

根据卫星轨道信息，可以推算出雷达对卫星的可视观测时间段为：2018年8月10日03:48'40"~03:59'09"，成像仿真区域选择其中的一个弧段，仿真场景如图4所示。

设置雷达系统的仿真成像参数如表3所示。

4.2 散射点模型仿真实验

散射点模型仿真时，采用包含307个散射点空间站模型。图5为该模型在成像平面上的投影。

首先将采集的1024个回波进行脉冲压缩、包络对齐和相位校正；然后将1024个脉冲等分为两组，对两组1维距离像序列分别成像，得到ISAR图像1和ISAR图像2。本实验对目标附近的距离单元进行遍历，得到的归一化相关系数曲线如图6所示，峰值点出现在第430个距离单元处。

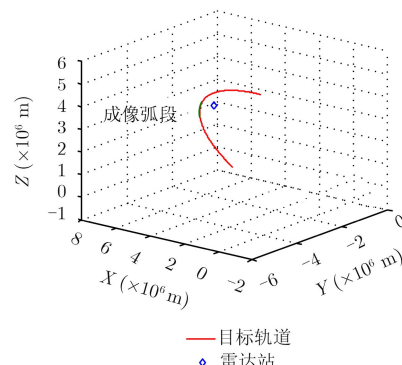


图4 仿真场景

表3 仿真参数设置

参数名称	参数值
载频	10 GHz
带宽	600 MHz
脉冲宽度	10 μ s
采样率	750 MHz
脉冲重复频率	100 Hz
累积脉冲个数	1024
累积转角	6.73°
距离分辨率	0.25 m
方位分辨率	0.128 m

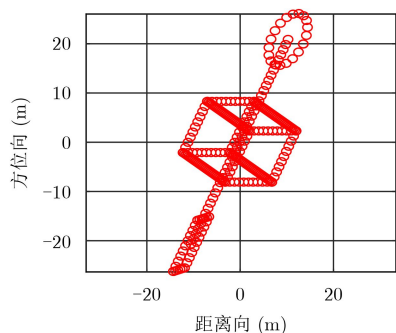


图5 散射点空间站模型在成像平面投影

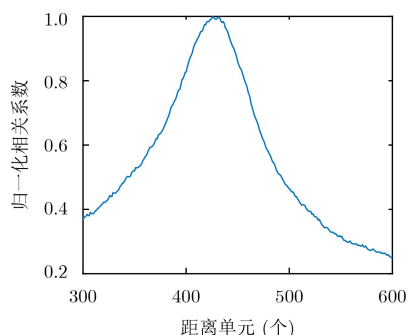


图6 归一化相关系数

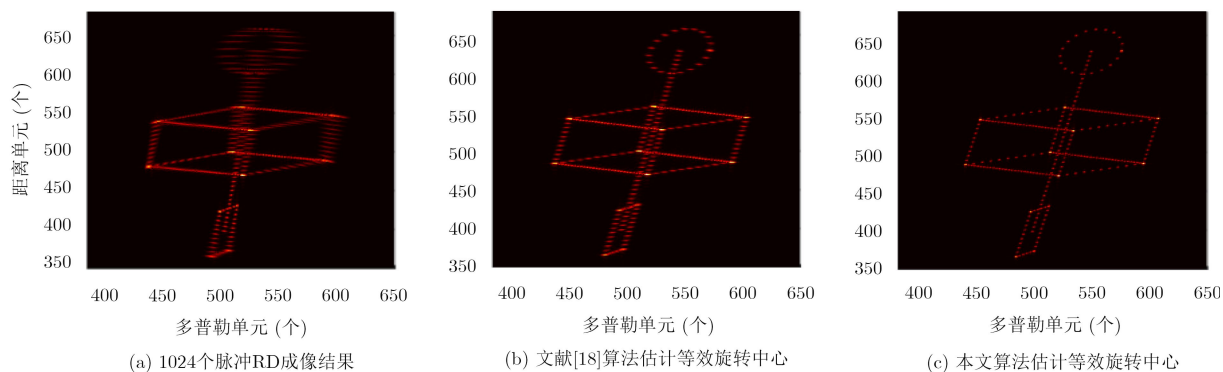


图7 成像结果对比

为定量分析成像质量,表4给出了图7中3幅图像的图像对比度,并统计图像上所有散射点的距离向和方位向3 dB主瓣平均宽度。所提算法得到的图像对比度高于RD成像算法生成的图像对比度,距离向3 dB主瓣宽度在两种成像算法下并无明显变化,方位向3 dB主瓣宽度的聚焦改善明显(需要说明的是,表4中距离和方位3 dB宽度较理论分辨率有所展宽,是由于距离压缩和方位压缩时添加了

表4 图像质量定量分析

	RD成像	文献[18]算法	本文算法
图像对比度	11.36	14.12	16.89
距离向3 dB主瓣宽度 (m)	0.515	0.354	0.325
方位向3 dB主瓣宽度 (m)	0.322	0.215	0.166

图7(a)是对1024个脉冲采用RD算法得到的ISAR图像,图像上半部分散焦严重,这是MTRC引起的,离散射中心越远的距离单元散焦越严重。多普勒补偿的精度受制于目标旋转中心的估计准确度。为验证本文等效旋转中心估计的正确性,利用估计得到的等效旋转中心构造补偿项(构造方法见文献[21]),对MTRC进行补偿,并与文献[18]提出的等效旋转中心估计算法对比。文献[18]估计得到的旋转中心距离单元为465。图7(b)和图7(c)分别是采用文献[18]的算法和本文算法,估计等效旋转中心并进行MTRC校正得到的ISAR像。图7(b)和图7(c)的成像质量均优于图7(a)。并且,图7(b)相对于图7(c)中散射点出现变“胖”现象,存在图像散焦。这是由于文献[18]的算法估计等效旋转中心时,仅能使用的有限的散射点,估计结果存在误差,用该估计值未能完全校正图7(a)的MTRC。而本文算法利用了图像的整体信息,等效旋转中心估计精度更高。用本文算法估计的等效旋转中心,校正MTRC,获得了更好的图像聚焦效果。

Hamming窗的缘故)。数据对比表明了本文等效旋转中心估计算法的准确性。

4.3 基于电磁散射模型仿真

为进一步验证本文算法的鲁棒性,基于电磁散射模型进行了仿真实验。物理光学法是一种经典高频近似方法,可有效计算目标的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)数据[22]。本文基于图8(a)中所示的F16战斗机计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)模型,通过物理光学法,获得目标的RCS数据。仿真场景和参数设定与4.1节一致。

图8(b)是采用RD算法得到的ISAR图像,可以看出图像存在散焦,尤其是右侧机翼部分散焦严重。图8(c)采用文献[18]的算法估计等效旋转中心

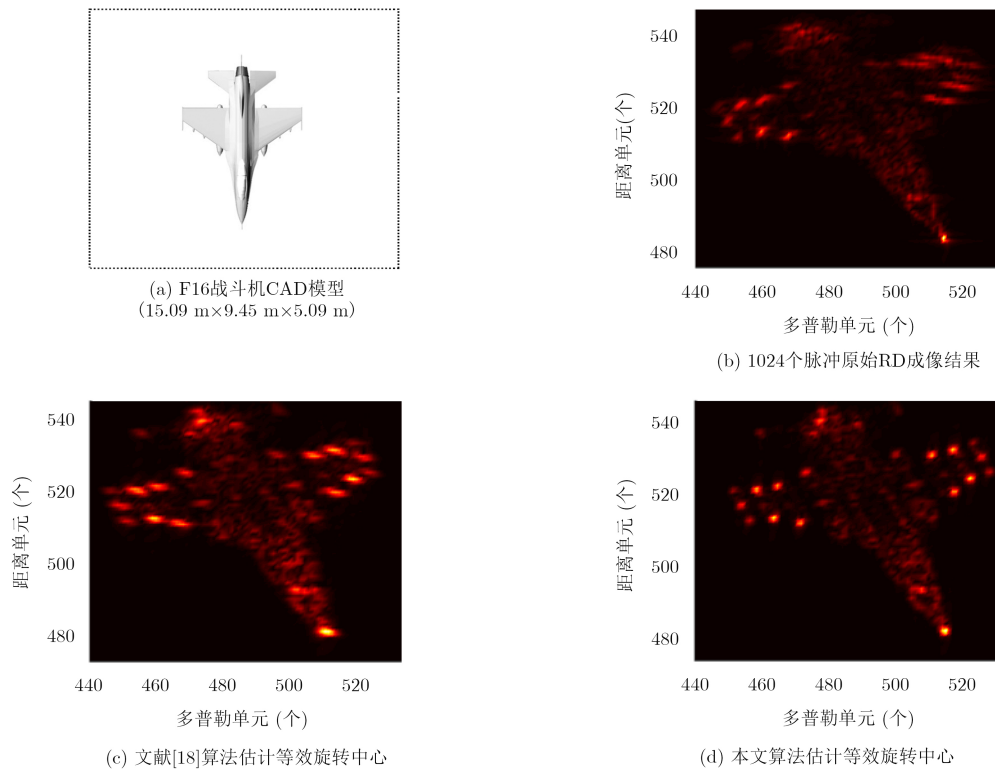


图8 基于F16战斗机电磁散射模型的仿真结果

(估计的旋转中心的位置为第510个距离单元)并进行MTRC校正得到的ISAR像, 图8(d)是采用本文算法估计等效旋转中心(估计的旋转中心的位置为第472个距离单元)并进行MTRC校正得到的ISAR像。图8(b)、图8(c)和图8(d)3幅图的对比度分别为16.75, 19.26, 23.57。对比这三幅图像可以看出, 基于本文算法估计得到旋转中心, 进行MTRC校正, 具有更好的聚焦效果, 进一步证明了本算法的鲁棒性。在电脑配置为Windows 10操作系统、i5-4510 CPU, 2.6 GHz主频, 8G内存条件下, 距离单元搜索范围设置为512个, 使用MATLAB R2016b软件, 算法中图像旋转和图像相关模块运算时间为11.6 s。

5 结论

本文从ISAR的瞬时成像机理出发, 提出了一种鲁棒的空间目标ISAR图像等效旋转中心估计算法。该算法基于图像相关度最大准则, 通过将定标后的两个视角的图像像素旋转和相关, 估计等效旋转中心位置。图像相关系数最大时, 对应的位置即为真实的等效旋转中心。该算法利用图像整体的像素坐标和强度分布信息估计目标的等效旋转中心, 具有很高的估计精度, 基于此可获得更好聚焦效果的图像, 为空间目标识别奠定基础。基于理想点目标和电磁散射模型仿真实验验证了算法的有效性和鲁棒性。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 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/TCI.2017.2750330](https://doi.org/10.1109/TCI.2017.2750330).
- [5] GUO Baofeng, WANG Junling, GAO Meiguo, *et al.* Research on spatial-variant property of bistatic ISAR imaging plane of space target[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(4): 048402. doi: [10.1088/1674-1056/24/4/048402](https://doi.org/10.1088/1674-1056/24/4/048402).

- [6] ZHANG Shunsheng, SUN Sibao, ZHANG Wei, *et al.* High-resolution bistatic ISAR image formation for high-speed and complex-motion targets[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(7): 3520–3531. doi: [10.1109/JSTARS.2015.2417192](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2417192).
- [7] SHI Lin, GUO Baofeng, MA Juntao, *et al.* A novel channel calibration method for bistatic ISAR imaging system[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(11): 2160. doi: [10.3390/app8112160](https://doi.org/10.3390/app8112160).
- [8] 马俊涛, 高梅国, 胡文华, 等. 空间目标多站ISAR优化布站与融合成像方法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(12): 2834–2843. MA Juntao, GAO Meiguo, HU Wenhua, *et al.* Optimum distribution of multiple location ISAR and multi-angles fusion imaging for space target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(12): 2834–2843.
- [9] 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).
- [10] 马林. 空间目标探测雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 10–13. MA Lin. Radar Technology for Space Target Detection[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 10–13.
- [11] 姜正林, 邢孟道, 保铮. ISAR成像的越距离单元走动校正[J]. *电子与信息学报*, 2002, 24(5): 577–583. JIANG Zhenglin, XING Mengdao, and BAO Zheng. Correction of migration through resolution cell in ISAR imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2002, 24(5): 577–583.
- [12] 韩兴斌, 胡卫东, 郁文贤. ISAR越距离单元走动校正的近似极坐标算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(3): 346–349. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2007.03.004](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2007.03.004). HAN Xingbin, HU Weidong, and YU Wenxian. Approximately polar formatting algorithm to compensate migration through resolution cells in ISAR imaging[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(3): 346–349. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2007.03.004](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2007.03.004).
- [13] 郭宝锋, 尚朝轩, 王俊岭, 等. 双基地角时变下的逆合成孔径雷达越分辨单元徙动校正算法[J]. *物理学报*, 2014, 63(23): 238406. doi: [10.7498/aps.63.238406](https://doi.org/10.7498/aps.63.238406). GUO Baofeng, SHANG Chaoxuan, WANG Junling, *et al.* Correction of migration through resolution cell in bistatic inverse synthetic aperture radar in the presence of time-varying bistatic angle[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(23): 238406. doi: [10.7498/aps.63.238406](https://doi.org/10.7498/aps.63.238406).
- [14] MARTORELLA 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).
- [15] XU Gang, YANG Lei, BI Guoan, *et al.* Maneuvering target imaging and scaling by using sparse inverse synthetic aperture[J]. *Signal Processing*, 2017, 137: 149–159. doi: [10.1016/j.sigpro.2017.01.016](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2017.01.016).
- [16] KANG B S, BAE J H, KANG M S, *et al.* Bistatic-ISAR cross-range scaling[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(4): 1962–1973. doi: [10.1109/TAES.2017.2677798](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2677798).
- [17] 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).
- [18] 叶春茂, 许稼, 左渝, 等. 逆合成孔径雷达目标等效旋转中心估计[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2009, 49(8): 1205–1208. doi: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2009.08.023](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2009.08.023). YE Chunmao, XU Jia, ZUO Yu, *et al.* Rotating center estimation for inverse synthetic aperture radar imaging[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2009, 49(8): 1205–1208. doi: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2009.08.023](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2009.08.023).
- [19] 叶春茂, 许稼, 彭应宁, 等. 多视观测下雷达转台目标成像的关键参数估计[J]. *中国科学: 信息科学*, 2010, 53(8): 1641–1652. YE Chunmao, XU Jia, PENG Yingning, *et al.* Key parameter estimation for radar rotating object imaging with multi-aspect observations[J]. *Science China Information Sciences*, 2010, 53(8): 1641–1652.
- [20] 陈磊, 韩蕾, 白显宗, 等. 空间目标轨道力学与误差分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 204–205. CHEN Lei, HAN Lei, BAI Xianzong, *et al.* Orbital Dynamics and Error Analysis of Space Object[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 204–205.
- [21] 黄雅静. 非匀速旋转目标ISAR成像技术研究[D]. [硕士学位论文], 国防科学技术大学, 2008: 99–116. HUANG Yajing. Research on ISAR Imaging of non-uniformly rotational targets[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2008: 99–116.
- [22] WEINMANN F. Ray tracing with PO/PTD for RCS modeling of large complex objects[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(6): 1797–1806. doi: [10.1109/TAP.2006.875910](https://doi.org/10.1109/TAP.2006.875910).
- 史林: 男, 1985年生, 博士生, 讲师, 研究方向为雷达信号处理、雷达成像技术.
- 郭宝锋: 男, 1987年生, 博士, 讲师, 研究方向为雷达信号处理、雷达成像技术.
- 马俊涛: 男, 1977年生, 博士, 讲师, 研究方向为雷达信号处理、雷达成像技术.
- 尚朝轩: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、雷达成像技术、电子装备故障诊断等.
- 解辉: 男, 1983年生, 博士, 讲师, 研究方向为雷达、通信信号侦察处理技术.
- 曾慧燕: 女, 1986年生, 硕士, 助教, 研究方向为雷达信号处理.