

基于酉ESPRIT的多频带融合ISAR成像

熊 娣^① 王俊岭^{*①} 赵莉芝^② 钟 山^① 高梅国^①

^①(北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

^②(中央民族大学信息工程学院 北京 100081)

摘 要: 多频带融合成像可有效提高ISAR成像的距离分辨率。传统的ESPRIT谱估计融合算法只利用了复数观测数据本身, 而没有利用其共轭数据。该文提出对合成复观测数据及其共轭的酉ESPRIT法进行调整以实现基于酉ESPRIT法的多频带融合ISAR成像。酉ESPRIT法充分利用复数观测数据信息, 更有利于多频带融合的频谱估计和ISAR成像。针对多频带融合中目标散射点越分辨单元徙动校正的问题, 调整了传统校正处理的步骤, 分别在多频带融合前进行越距离单元徙动校正和融合后进行越多普勒单元徙动校正, 避免了回波中的快时间频率-慢时间耦合项以及时域相位补偿对频域融合处理的影响, 从而得到效果更好的多频带融合ISAR图像。仿真和实测数据结果表明所提方法不但能得到高质量的融合ISAR图像, 也具有更优的抗噪性能和更高的运算效率。

关键词: ISAR成像; 多频带融合; 酉ESPRIT; 越分辨单元徙动校正

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)02-0285-08

DOI: [10.11999/JEIT180438](https://doi.org/10.11999/JEIT180438)

Unitary ESPRIT Based Multiband Fusion ISAR Imaging

XIONG Di^① WANG Junling^① ZHAO Lizhi^② ZHONG Shan^① GAO Meiguo^①

^①(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

^②(School of Information Engineering, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

Abstract: Multiband fusion imaging can effectively improve the range resolution of Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) imaging. The traditional Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques (ESPRIT) spectral estimation signal fusion algorithm uses only the complex measured data without using their conjugate data. This paper proposes to modify the unitary ESPRIT method, which is based on synthesizing complex observation data and its conjugate data, to achieve unitary ESPRIT based multiband fusion ISAR imaging. The unitary ESPRIT method makes full use of the information of complex observations, which is more beneficial to multiband frequency spectrum estimation and ISAR imaging. Furthermore, for the correction of Migration Through Resolution Cell (MTRC) of scatterers in multiband fusion, the traditional processing flow is adjusted and optimized. The migration through range cell correction and the migration through Doppler cell correction are performed before and after the multiband fusion respectively, which avoids the influence of the fast time frequency - slow time coupling in the echo and the phase compensation on the spectrum fusion processing, thereby a better multiband fusion ISAR image is obtained. Simulation and real data experimental results show that the proposed methods can not only get high quality ISAR images, but also have good antinoise performance and higher computational efficiency.

Key words: ISAR imaging; Multiband fusion; Unitary Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques (ESPRIT); Migration Through Resolution Cell (MTRC) correction

收稿日期: 2018-05-09; 改回日期: 2018-09-26; 网络出版: 2018-11-02

*通信作者: 王俊岭 mailwj1@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61401024, 61701554), 北京理工大学基金(20140542001, 20150542012)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61401024, 61701554), Beijing Institute of Technology Foundation (20140542001, 20150542012)

1 引言

高分辨的ISAR像可反映目标的2维结构特征, 有利于目标监视和识别。通常方位高分辨可通过增大目标相对雷达的累积转角获得, 距离高分辨可通过增大发射信号带宽得到。然而, 受工艺技术、制造成本以及雷达原有设计约束(在设备升级改造时), 雷达带宽提升量有限^[1], 研究人员倾向于通过

调整信号处理方法以达到类似的性能。多频带融合成像技术可以在不改变现有雷达配置的情况下将多部雷达测量得到的相同视角下不同频带的目标频率响应从信号层相干融合成为一个更大带宽的频率响应,从而有效地提高雷达成像的距离分辨率,并获取更精确的目标散射点信息,吸引了许多研究人员的关注^[1-7]。

基于现代谱估计的方法是实现多频带雷达信号融合技术的重要手段,例如多重信号分类(MUSIC)方法、修正的求根多重信号分类(root-MUSIC)方法^[8]、旋转不变估计信号参数(ESPRIT-LS)方法^[9]、总体最小二乘旋转不变估计信号参数(TLS-ESPRIT)方法^[10]等。采用这些方法进行多频带信号融合频谱的估计时,参数估计精度较高,但其估计精度受噪声的影响较大,故对信噪比要求也高。

酉ESPRIT方法^[11-17]利用复观测数据及其共轭数据,能充分挖掘复数观测数据信息,等效于增加了观测信息量,可提高信号参数的估计精度。同时,酉ESPRIT法通过构造中心复共轭对称的观测数据矩阵,并将复矩阵的奇异值分解转换为实矩阵的奇异值分解,可提高运算效率,是一种更有效的复数ESPRIT方法^[11]。故本文提出将酉ESPRIT算法应用于多频带信号融合ISAR成像中,有利于提高融合成像质量。为使现有的酉ESPRIT法适用于多频带融合数据,本文将利用各子频带的旋转不变性对其进行适当调整,以便有效地得到高分辨ISAR图像。同时,针对回波中快时间频率-慢时间耦合项及时域线性相位补偿导致各子频带频谱移位影响多频带频谱融合性能的问题,本文将对传统的散射点越分辨单元徙动校正步骤进行适当调整优化。最终在调整后的流程下采用基于酉ESPRIT的多频带融合有效得到高质量的ISAR图像。

2 基于酉ESPRIT的多频带融合ISAR成像

本文讨论的多频带融合ISAR成像是在信号级将多个频带的复观测数据信号采用酉ESPRIT方法融合得到更大带宽的信号,从而得到目标的高分辨ISAR图像。假设各雷达邻近配置,且不同频带下目标可看成理想散射点模型,忽略散射点频率依赖因子对回波的影响。当有多部不同频带的雷达同时对目标进行观测时,由于雷达位置、信号发射时间以及雷达系统初相等因素的不同,导致各个雷达测得的回波不相参。因此,融合处理前需对回波数据进行相参补偿,具体补偿方法可参考文献^[18]。本文之后的信号建模及融合处理均是在子频带已相参补偿的基础上进行分析。

考虑到多频带融合后信号带宽增大,距离向分

辨率提高,若目标尺寸较大,则目标散射点在成像时间内很容易发生越分辨单元徙动,从而导致得到的ISAR图像严重散焦。传统宽带雷达ISAR成像在得到目标1维距离像历程矩阵后,采用Keystone变换和时域相位补偿的方法分别进行越距离单元徙动校正和越多普勒单元徙动校正^[19]。本文在多频带融合ISAR成像中采用相同方法对越分辨单元徙动进行校正。但是不同于传统的宽带雷达ISAR成像处理流程^[19],为了避免散射点徙动过程中的距离微小变化受噪声干扰导致融合结果不准确,本文将在多频带融合前对子频带进行Keystone变换校正越距离单元徙动;然后通过时域相位补偿校正越多普勒单元徙动。考虑到融合前对子频带进行时域线性相位补偿会导致各子频带频谱移位从而对频谱融合产生影响,故为了避免这种影响,本文将在多频带频谱融合后对全频带进行时域相位补偿校正越多普勒单元徙动。该处理方法可有效校正多频带融合ISAR成像中的散射点越分辨单元徙动。

2.1 回波建模及越距离单元徙动校正

本文中,以两个不同频带的雷达回波信号的融合为例进行分析。考虑融合后带宽相对于中心频率较小的情况,即散射系数随频率变化可忽略^[1]。假设雷达发射线性调频信号,子频带1的载频为 f_{c1} ,带宽为 B_1 ,子频带2的载频为 f_{c2} ,带宽为 B_2 。回波信号经过平动补偿后,目标运动可等效于转台模型,如图1所示。故相干补偿后的各子频带信号进行脉冲压缩后,回波频域形式可写成

$$s(f_{(i)}) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \text{rect} \left(\frac{f_{(i)}}{B_i} \right) \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi}{c} (f_{(i)} + f_{ci}) R_k \right), i = 1, 2 \quad (1)$$

其中, K 为目标散射点个数; σ_k 为目标上任意一散射点 k 的散射系数; c 为电磁波传播速率; R_k 为散射

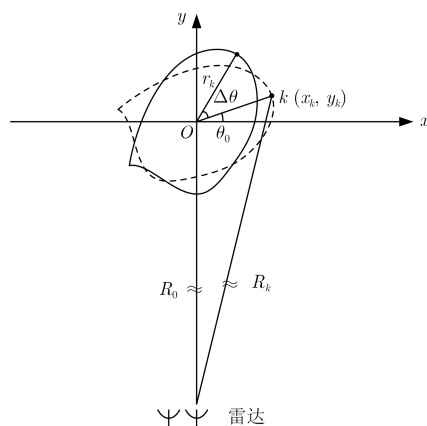


图1 转台成像场景

点 k 到雷达的距离。对于子频带1, $i=1$, $f_{(1)}$ 是基带信号的快时间频率, $f_{(1)}+f_{c1}=f_0+n_1\Delta f$, $f_0=f_{c1}-B_1/2$ 为子频带1的起始频率, Δf 为频率采样间隔, $n_1=0,1,\dots,N_1-1$, $N_1=B_1/\Delta f$ 为子频带1的采样点数; 对于子频带2, $i=2$, $f_{(2)}$ 是基带信号的快时间频率, $f_{(2)}+f_{c2}=f_0+n_2\Delta f$, $n_2=N-N_2, N-N_2+1,\dots,N-1$, $N_2=B_2/\Delta f$ 为子频带2的采样点数, N 为全频带的采样点数, $N_1+N_2\leq N$ 。令 R_0 为目标质心到雷达的距离, 则

$$R_k = \left[R_0^2 + r_k^2 - 2R_0r_k \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_0 + \Delta\theta\right) \right]^{1/2} \approx R_0 + y_k \cos \Delta\theta + x_k \sin \Delta\theta \quad (2)$$

其中, (x_k, y_k) 为任意散射点 k 在目标本体坐标系下的坐标, $x_k = r_k \cos \theta_0$, $y_k = r_k \sin \theta_0$, r_k 为散射点 k 到目标质心的距离, θ_0 为散射点 k 和质心的连线与 x 轴的夹角。

通常成像过程中目标相对雷达的累积转角较小 ($<10^\circ$), $\sin \Delta\theta_m \approx \Delta\theta_m$, 故对回波进行平动补偿后有

$$s(f_{(i)}, t_m) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \text{rect}\left(\frac{f_{(i)}}{B_i}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} (f_{(i)}+f_{ci}) \cdot (y_k \cos \Delta\theta_m + x_k \Delta\theta_m)\right), i=1,2 \quad (3)$$

其中, $t_m = mT_r$ 为慢时间; T_r 为脉冲重复时间; $m=0,1,\dots,M-1$; M 为总的回波脉冲数; $\Delta\theta_m = \omega_c t_m$ 为第 m 次回波时目标相对雷达的累积转角; ω_c 为目标转动平均角速度。将各子频带的频率离散化, 式(3)可写成

$$s(n_i, m) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} (f_0 + n_i \Delta f) y_k \cos \Delta\theta_m\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} (f_0 + n_i \Delta f) x_k \omega_c t_m\right), i=1,2 \quad (4)$$

式(4)中的两项指数项均与距离向脉冲压缩位置有关, 但在通常的成像过程中, 前一项对距离向脉冲压缩位置徙动的影响可忽略, 而后一项则不能。由于噪声对融合精度的影响, 同一距离分辨单元中的多个散射点的徙动距离(分别由后一指数项中快时间频率-慢时间耦合项决定)无法在融合后的1维像中精确得到, 这会影响后续处理。故本文在多频带融合处理前, 先分别对各子频带进行Keystone变换, 校正散射点越距离单元徙动。为了保证后续融合两个子频带信号的相干性, 对各子频带

进行Keystone变换时均基于起始频点。

$$(f_0 + n_i \Delta f) t_m = f_0 t'_m, \quad i=1,2 \quad (5)$$

通过Keystone变换, 并忽略式(4)中 $\cos \Delta\theta_m$ 对脉冲压缩位置的影响, 有

$$s(n_i, m) = \sum_{k=1}^K \sigma_k \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} n_i \Delta f y_k\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} f_0 (y_k \cos \Delta\theta_m + x_k \omega_c t'_m)\right) \quad (6)$$

2.2 基于酉ESPRIT的多频带融合及越多普勒单元徙动校正

酉ESPRIT方法利用复观测数据和它的复共轭, 有利于提高信号参数的估计精度。通过构造中心复共轭对称的观测数据矩阵, 将矩阵的奇异值分解从复数域转换到实数域, 可有效地降低计算复杂度。故酉ESPRIT方法是一种更有效的复数ESPRIT方法。本文利用多频带融合中各子频带的旋转不变性, 对传统酉ESPRIT法进行适当调整和应用, 以实现多频带融合ISAR成像。

获得式(6)后, 可融合多个子频带的信号得到更大带宽的信号频谱, 然后进行距离向和方位向压缩得到多频带融合ISAR图像。由于噪声的影响, 在多频带信号融合大带宽的信号频谱的过程中, 往往会存在误差。因此本文先进行方位向FFT实现方位压缩, 然后进行频带融合和距离向压缩得到ISAR像, 以避免融合误差对方位压缩的影响。由于式(6)中前两项与 m 无关, 故对式(6)的数据进行方位向FFT压缩后有

$$s(n_i, f_d) = \sum_{k=1}^K \sigma_k P(f_d) \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} n_i \Delta f y_k\right), i=1,2, \quad n_1=0,1,\dots,N_1-1; n_2=N-N_2, N-N_2+1,\dots,N-1 \quad (7)$$

其中, $P(f_d) = \text{FFT}\{\exp(-j4\pi f_0(y_k \cos \Delta\theta_m + x_k \omega_c t'_m)/c)\}$ 。故对任一多普勒单元, 融合后全频带频谱可写成^[1]

$$s(n) = \sum_{p=1}^{p_0} d_p z_p^n, \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (8)$$

其中, p_0 为方位压缩后目标散射点在该多普勒单元上的投影个数, $d_p = \sigma_p P(f_d)$, $z_p = \exp(-j4\pi \Delta f y_p/c)$ 。因此, 对式(7)中两个子频带数据的各多普勒单元信号分别进行频谱融合可得到全频带频谱信号。

为了应用酉ESPRIT技术进行多频带融合, 必须对信号进行空间平滑处理以消除信源的相干性,

故采用前向预测矩阵作为观测数据矩阵^[4]。子频带1和子频带2的前向预测矩阵分别为(为了方便表示,下文中用 $s(n_i)$ 表示待融合的子频带信号数据)

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} s(0) & s(1) & \cdots & s(L-1) \\ s(1) & s(2) & \cdots & s(L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s(N_1-L) & s(N_1-L+1) & \cdots & s(N_1-1) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{S}_2 = \begin{bmatrix} s(N-N_2) & \cdots & s(N-N_2+L-1) \\ s(N-N_2+1) & \cdots & s(N-N_2+L) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s(N-L) & \cdots & s(N-1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, $L = \min(\lfloor N_1/3 \rfloor, \lfloor N_2/3 \rfloor)$, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示下取整。故用于融合的观测数据矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{(N_1+N_2-2L+2) \times L} \quad (10)$$

酉ESPRIT法利用观测数据 $\mathbf{X}$ 及其共轭矩阵(无转置) $\mathbf{X}^*$ 合成观测数据矩阵,充分挖掘复数观测数据信息,有利于提高信号参数的估计精度。构造中心复共轭对称矩阵 $\mathbf{B}$ 作为合成的观测数据矩阵是一种有效的方法^[11]。

$$\mathbf{B} = [\mathbf{X}, \Pi_Q \mathbf{X}^* \Pi_L] \in \mathbb{C}^{Q \times 2L} \quad (11)$$

其中, $Q = N_1 + N_2 - 2L + 2$, Π_Q 和 Π_L 分别是大小为 $Q \times Q$ 和 $L \times L$ 的实交换矩阵^[11]。

同时,为了减少列数增加1倍的合成观测数据矩阵的奇异值分解的计算量,对中心复共轭对称矩阵 $\mathbf{B}$ 进行双射变换得到一个实矩阵^[11],从而转化为实矩阵的奇异值分解。令 $\mathbf{P}_Q$ 和 $\mathbf{P}_{2L}$ 分别为左和右双射变换矩阵,

$$\mathbf{P}_Q = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{(Q-1)/2} & \mathbf{0} & \mathbf{jI}_{(Q-1)/2} \\ \mathbf{0}^T & \sqrt{2} & \mathbf{0}^T \\ \Pi_{(Q-1)/2} & \mathbf{0} & -\mathbf{jI}_{(Q-1)/2} \end{bmatrix}, Q \text{ 为奇数} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{Q/2} & \mathbf{jI}_{Q/2} \\ \Pi_{Q/2} & -\mathbf{jI}_{Q/2} \end{bmatrix}, Q \text{ 为偶数} \end{cases},$$

$$\mathbf{P}_{2L} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_L & \mathbf{jI}_L \\ \Pi_L & -\mathbf{jI}_L \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{I}$ 和 $\mathbf{0}$ 分别为单位矩阵和零矩阵。故有实矩阵

$$\Gamma(\mathbf{B}) \triangleq \mathbf{P}_Q^H \mathbf{B} \mathbf{P}_{2L} = \mathbf{P}_Q^H [\mathbf{X}, \Pi_Q \mathbf{X}^* \Pi_L] \mathbf{P}_{2L} \quad (13)$$

实矩阵 $\Gamma(\mathbf{B})$ 的奇异值分解为

$$\Gamma(\mathbf{B}) = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^H, \mathbf{U} \in \mathbb{C}^{Q \times Q}, \mathbf{V} \in \mathbb{C}^{2L \times 2L} \quad (14)$$

由于 $\mathbf{P}_Q \mathbf{P}_Q^H = \mathbf{I}_Q$, $\mathbf{P}_{2L} \mathbf{P}_{2L}^H = \mathbf{I}_{2L}$, 则有

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mathbf{P}_Q \mathbf{P}_Q^H \mathbf{B} \mathbf{P}_{2L} \mathbf{P}_{2L}^H = \mathbf{P}_Q \Gamma(\mathbf{B}) \mathbf{P}_{2L}^H \\ &= (\mathbf{P}_Q \mathbf{U}) \Sigma (\mathbf{V}^H \mathbf{P}_{2L}^H) \end{aligned} \quad (15)$$

由式(15)可知,确定主奇异值的个数 p_0 (目标散射点在该方位分辨单元上的投影个数)后,无需计算矩阵 $\mathbf{B}$ 的奇异值分解,可直接由左奇异向量矩阵 $\mathbf{U}_Q = \mathbf{P}_Q \mathbf{U}$ 的前 p_0 列构成子空间矩阵 $\mathbf{U}_s$ 。利用子空间矩阵的旋转不变性可得信号的频率估计值。

值得注意的是,常规的酉ESPRIT方法是利用一段数据信号的旋转不变性,计算该段数据对应的旋转矩阵的特征值即可得到信号频率的估计值^[11]。而多频带融合中同时利用了两段(或以上)频带的信号,本文中 $\mathbf{X}$ 包含 $\mathbf{S}_1$ 和 $\mathbf{S}_2$,故本文在此进行适当调整,从而使酉ESPRIT法适用于多频带信号融合。即取 $\mathbf{U}_s$ 的第1至 N_1-L 行(子频带1)和第 N_1-L+2 至 $Q-1$ 行(子频带2)组成子矩阵 $\tilde{\mathbf{U}}_1$,取 $\mathbf{U}_s$ 的第2至 N_1-L+1 行(子频带1)和第 N_1-L+3 至 Q 行(子频带2)组成子矩阵 $\tilde{\mathbf{U}}_2$ 。对

$$\tilde{\Psi} = (\tilde{\mathbf{U}}_1^H \tilde{\mathbf{U}}_1)^{-1} \tilde{\mathbf{U}}_1^H \tilde{\mathbf{U}}_2 \quad (16)$$

进行特征值分解,其特征值即为式(8)中 z_p 的估计值。然后根据最小二乘法计算出 d_p ,从而得到式(8)的融合全频带频谱。

分别对每个多普勒单元进行频谱融合后,得到全频带频域-多普勒的信号为

$$s(n, f_d) = \sum_{k=1}^K \sigma_k P(f_d) \exp \left(-\mathbf{j} \frac{4\pi}{c} n \Delta f y_k \right),$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (17)$$

对式(17)进行距离向IFFT即可得到目标的距离-多普勒ISAR图像。然而,对于尺寸较大的目标,尽管融合前已对散射点越距离单元徙动进行了校正,但此时的ISAR图像仍然存在散射点越多普勒单元徙动导致的散焦。故还需对此时的ISAR图像信号进行方位向IFFT,并在距离-慢时间域构造相位补偿项 $\phi_{\text{com}} = \exp(\mathbf{j} 4\pi f_0 y_k \cos \Delta \theta_m / c)$ 进行相位补偿,具体补偿方法参考文献[19]。补偿校正后再进行方位向FFT压缩即可得到高质量的高分辨ISAR图像。

3 仿真和实测数据验证

本节将分别通过仿真数据和Yak-42飞机实测数据验证在本文的处理流程下酉ESPRIT算法对多频带融合ISAR成像的有效性。

3.1 仿真实验验证和分析

仿真参数:子频带1的频率为10.0~10.5 GHz,子频带2的频率为11.5~12.0 GHz,频域采样间隔为2 MHz。目标散射点模型如图2所示,散射点幅度系数均设为1。目标在距离雷达3000 m的位置做匀速转台运动,成像过程中目标累积转角为6.9°。

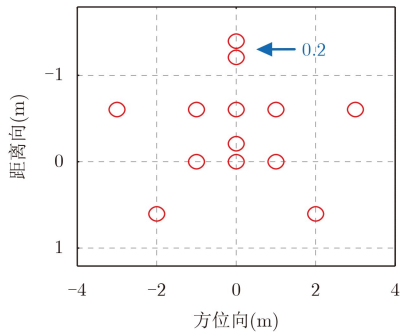


图2 散射点模型

目标旋转中心位于坐标(0, 0)处。方位向为0的5个散射点的坐标从上至下依次为：(0, -1.4), (0, -1.2), (0, -0.6), (0, -0.2)和(0, 0)。其中，距离向间隔0.2 m(小于单个子频带的理论距离分辨率0.3 m)的散射点用以验证酉ESPRIT方法的融合成像效果。对回波添加高斯白噪声，使得信噪比(SNR)为分别0 dB, 5 dB和15 dB时进行ISAR成像仿真。

图3展示了在信噪比分别为0 dB, 5 dB和15 dB时，分别采用root-MUSIC算法、ESPRIT算法和本文的酉ESPRIT算法对散射点模型目标进行多频带融合ISAR成像的仿真结果，以及信噪比15 dB时只用于子频带1进行成像的仿真结果和0方位向距离剖面图。由图3(a)和图3(b)可知，在信噪比为0 dB时，采用root-MUSIC算法和ESPRIT算法无法得到正确的融合ISAR图像，方位向为0的散射点出现缺失或者幅值估计不准现象。而此时由图3(c)可知，采用酉ESPRIT算法融合得到目标的ISAR图像与散射点模型完全一致，且各散射点幅度相同，这与仿真中各散射点散射系数相同是相对应的。由图3(d)至图3(i)可见，随着信噪比的提高，采用root-MUSIC算法和ESPRIT算法进行融合得到的ISAR图像质量随之提高，且基于ESPRIT算法所得成像结果比基于root-MUSIC算法好，但它们均不如基于酉ESPRIT算法所得的成像结果。因为即使当信噪比提高到15 dB时，root-MUSIC算法和ESPRIT算法虽然可得到正确的散射点位置，但图像中散射点明亮程度所反映的幅度仍存在不一致的现象(如图3(g)和图3(h)中椭圆标识所示)。图3(j)为信噪比为15 dB时只用于子频带1的数据对目标进行成像的结果，由图可知，此时图像的距离分辨率较低，方位向为0的散射点不能全都分开。图3(k)和图3(l)为信噪比15 dB时分别进行子频带成像(图3(j))、root-MUSIC融合成像(图3(g))、ESPRIT融合成像(图3(h))和酉ESPRIT融合成像(图3(i))结果中方位向为0处的距离向剖面图。由图3(k)和图3(l)可知，子频带成像时，带宽小，距离向分辨率低，无法将

5个散射点完全分开。采用root-MUSIC算法和ESPRIT算法进行融合成像能将5个散射点分开，但幅度本应一致的各散射点幅度估计结果不等，尤其是距离向为0.2 m的散射点幅度远小于其他散射点，其中采用root-MUSIC算法成像的散射点幅度整体低于ESPRIT算法(见图3(k))。而采用本文的酉ESPRIT融合成像不仅能有效分辨各散射点，且散射点幅度基本一致(见图3(l))，各散射点主瓣距离向3 dB对应的分辨率为0.075 m，与理论融合后分辨率一致。同时基于实数奇异值分解的酉ESPRIT算法比传统ESPRIT算法计算复杂度低。故采用本文所述酉ESPRIT算法进行多频段融合成像具有更好的成像效果和抗噪性，且酉ESPRIT算法运算效率比传统ESPRIT算法更高。故该方法可在较低信噪比下得到高质量的ISAR图像。

3.2 实测数据验证和分析

实测数据采用Yak-42飞机回波数据进行实验。雷达参数为：信号中心频率为5.52 GHz，带宽为400 MHz，脉冲重复频率为100 Hz，脉冲宽度为25.6 μ s。全频带回波数据为256个频率采样点，分别选取前64个和后64个频点作为子频带1和子频带2的数据，此时空白频带带宽为单个子频带带宽的2倍。并分别采用root-MUSIC算法、ESPRIT算法和本文的酉ESPRIT算法对256个脉冲信号进行融合ISAR成像。

图4给出了采用不同算法对Yak-42飞机回波数据进行ISAR成像的结果。其中，图4(a)和图4(b)分别为采用全频带数据和子频带1数据进行RD成像的结果。图4(c)，图4(d)和图4(e)分别为采用root-MUSIC算法、ESPRIT算法和酉ESPRIT算法进行融合成像的结果。对比这5幅子图可见，图4(b)的图像分辨率最低，图4(c)存在较为明显的距离向扩散和模糊现象，图4(d)和图4(e)的成像效果则相对更好。同时，图4(e)比图4(d)的目标信息更丰富，尤其在机翼和机尾处，目标轮廓更清晰，结构更明显。图4(f)为图4(a)至图4(e)中第15个多普勒单元的某一强散射点的距离剖面图。由图4(f)可知，采用子频带1数据进行成像的散射点距离向主瓣最宽，其3 dB宽度对应的分辨率为1.57 m，与子频带理论分辨率基本一致；采用root-MUSIC算法进行融合成像的散射点聚焦效果差，其主瓣3 dB宽度对应的分辨率为1.13 m；采用ESPRIT算法和酉ESPRIT算法进行融合成像的散射点聚焦效果好，且采用全频带、ESPRIT融合和酉ESPRIT融合成像的距离向主瓣3 dB宽度对应的分辨率均为0.38 m，与全频带理论分辨率基本一致，同时酉ESPRIT法中散射

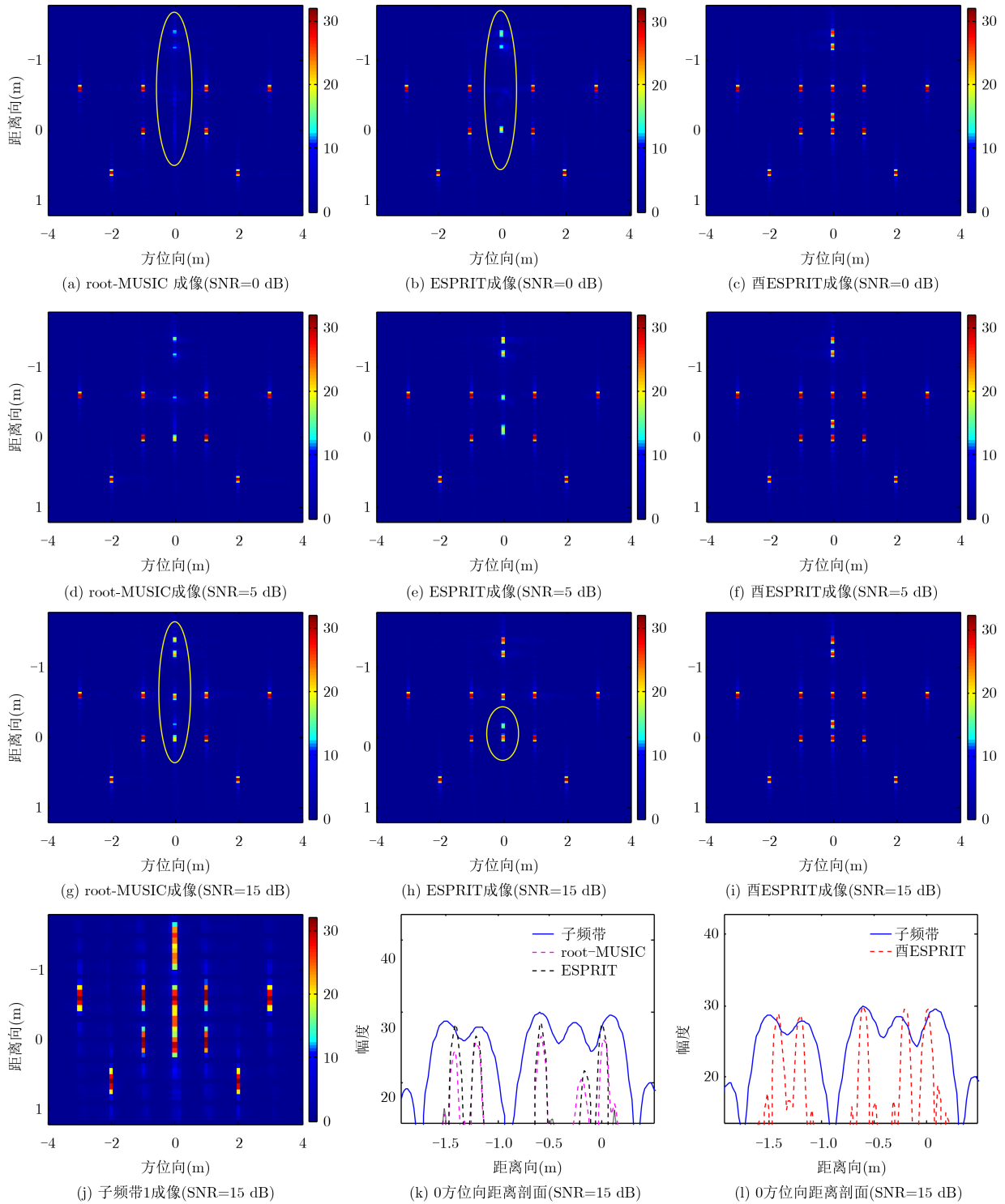


图3 散射点模型成像结果

点幅度与采用全频带成像的散射点幅度更接近；故采用酉ESPRIT算法进行多频带融合ISAR成像具有更好的效果。

4 结束语

本文提出了一种基于酉ESPRIT频谱估计实现多频带融合ISAR成像的方法。该方法同时利用了

复观测数据及其共轭数据构造中心复共轭对称的观测数据矩阵，并将复矩阵的奇异值分解转换为实矩阵的奇异值分解，可在更低信噪比下有效地提高多频带融合ISAR的成像质量。另外，本文提出了分别在多频带融合处理前进行散射点越距离单元徙动校正和融合处理后进行越多普勒单元徙动校正的处理流程。该流程使得传统校正算法可直接应用于多

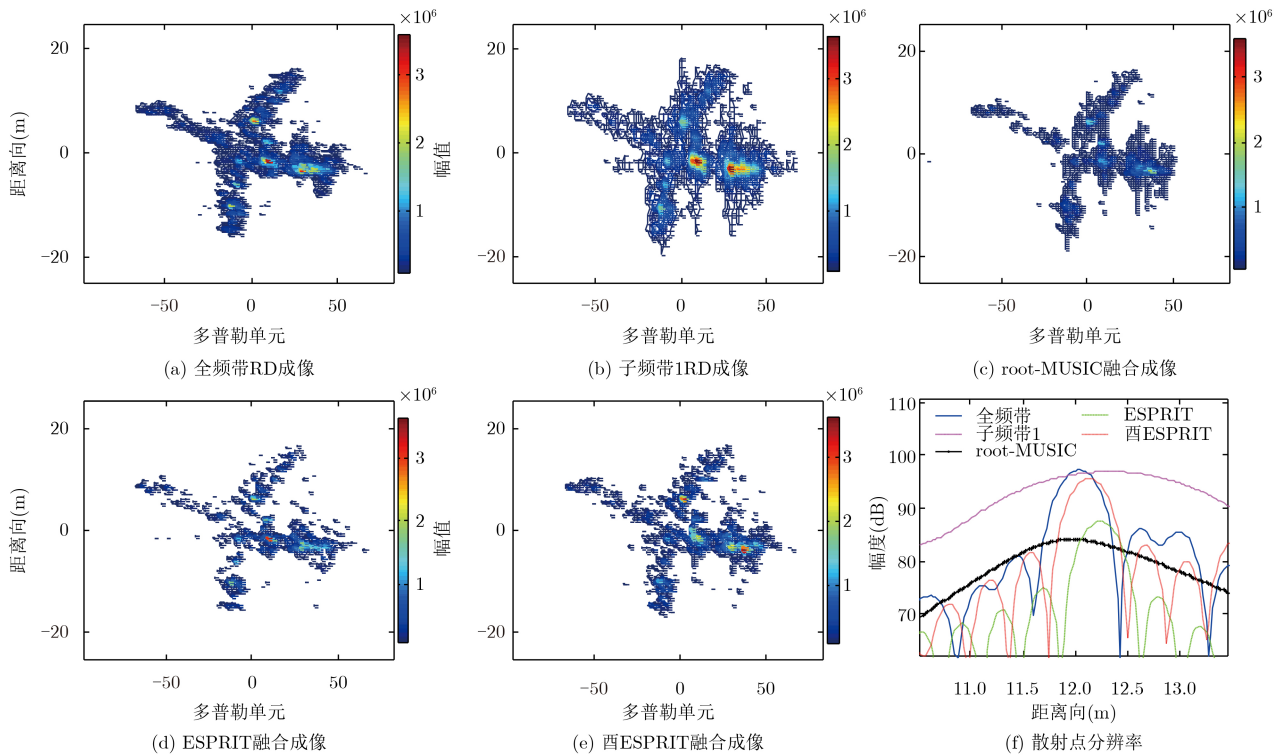


图4 Yak-42成像结果

频带融合ISAR成像时的散射点越分辨单元徙动校正。仿真实验和实测数据结果验证了在本文所提处理流程下基于酉ESPRIT法的多频带融合ISAR成像的有效性及抗噪性。

参考文献

- [1] CUOMO K M, PION J E, and MAYHAN J T. Ultrawide-band coherent processing[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 1999, 47(6): 1094–1107. doi: [10.1109/8.777137](https://doi.org/10.1109/8.777137).
- [2] 田彪, 刘洋, 徐世友, 等. 基于几何绕射理论模型高精度参数估计的多频带合成成像[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(7): 1532–1539. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01364](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01364).
TIAN Biao, LIU Yang, XU Shiyu, *et al.* Multi-band fusion imaging based on high precision parameter estimation of geometrical theory of diffraction model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(7): 1532–1539. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01364](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01364).
- [3] 马俊涛, 高梅国, 董健. 基于稀疏迭代协方差估计的缺失数据谱分析及时域重建方法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(6): 1431–1437. doi: [10.11999/JEIT151008](https://doi.org/10.11999/JEIT151008).
MA Juntao, GAO Meiguo, and DONG Jian. Sparse iterative covariance estimation-based approach for spectral analysis and reconstruction of missing data[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(6): 1431–1437. doi: [10.11999/JEIT151008](https://doi.org/10.11999/JEIT151008).
- [4] ZHOU Feng and BAI Xueru. High-resolution sparse subband imaging based on Bayesian learning with hierarchical priors[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2018, 56(8): 4568–4580. doi: [10.1109/TGRS.2018.2827072](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2827072).
- [5] LEUNG H and LIU Xiaoxiang. Resolution enhancement in passive SAR imaging using distributed multiband fusion[C]. *IEEE Antennas & Propagation Society International Symposium*, Orlando, USA, 2013: 1026–1027. doi: [10.1109/aps.2013.6711173](https://doi.org/10.1109/aps.2013.6711173).
- [6] TIAN Biao, CHEN Zengping, and XU Shiyu. Sparse subband fusion imaging based on parameter estimation of geometrical theory of diffraction model[J]. *IET Radar Sonar & Navigation*, 2013, 8(4): 318–326. doi: [10.1049/iet-rsn.2013.0192](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2013.0192).
- [7] TIAN Jihua, SUN Jinping, WANG Guohua, *et al.* Multiband radar signal coherent fusion processing with IAA and apFFT[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, 20(5): 463–466. doi: [10.1109/LSP.2013.2251631](https://doi.org/10.1109/LSP.2013.2251631).
- [8] 王成, 胡卫东, 杜小勇, 等. 稀疏子带的多频段雷达信号融合超分辨距离成像[J]. *电子学报*, 2006, 34(6): 985–990. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2006.06.003](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2006.06.003).
WANG Cheng, HU Weidong, DU Xiaoyong, *et al.* The super-resolution range imaging based on sparse band multiple frequency bands radars signal fusion[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(6): 985–990. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2006.06.003](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2006.06.003).
- [9] 王成, 胡卫东, 郁文贤. 基于ESPRIT-LS的幅相补偿参数估计

- 算法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(3): 350–354. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2006.03.008](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2006.03.008).
- WANG Cheng, HU Weidong, and YU Wenxian. ESPRIT-LS based amplitude-phase compensation parameters estimation algorithm[J]. *Systems Engineering & Electronics*, 2006, 28(3): 350–354. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.2006.03.008](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.2006.03.008).
- [10] ZOU Yongqiang, GAO Xunzhang, LI Xiang, *et al.* A matrix pencil algorithm based multiband iterative fusion imaging method[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19440. doi: [10.1038/srep19440](https://doi.org/10.1038/srep19440).
- [11] HAARDT M and NOSSEK J A. Unitary ESPRIT: How to obtain increased estimation accuracy with a reduced computational burden[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995, 43(5): 1232–1242. doi: [10.1109/78.382406](https://doi.org/10.1109/78.382406).
- [12] 冯德军, 王雪松, 陈志杰, 等. 酉ESPRIT超分辨ISAR成像方法[J]. 电子学报, 2005, 33(12): 2097–2100. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2005.12.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2005.12.001).
- FENG Dejun, WANG Xuesong, CHEN Zhijie, *et al.* Super-resolution ISAR imaging using unitary ESPRIT[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(12): 2097–2100. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2005.12.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2005.12.001).
- [13] 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).
- [14] LI Jianfeng, JIANG Defu, and ZHANG Xiaofei. DOA estimation based on combined unitary ESPRIT for coprime MIMO radar[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(1): 96–99. doi: [10.1109/lcomm.2016.2618789](https://doi.org/10.1109/lcomm.2016.2618789).
- [15] WANG Xin, ZHANG Min, and ZHAO Jia. Super-resolution ISAR imaging via 2D unitary ESPRIT[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(6): 519–521. doi: [10.1049/el.2014.3518](https://doi.org/10.1049/el.2014.3518).
- [16] 王欣. 基于酉ESPRIT的超分辨ISAR成像及其应用[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2015: 34–39.
- WANG Xin. Unitary ESPRIT based superresolution ISAR imaging and its applications[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2015: 34–39.
- [17] ZHAO Jia, ZHANG Min, WANG Xin, *et al.* Three-dimensional super resolution ISAR imaging based on 2D unitary ESPRIT scattering centre extraction technique[J]. *IET Radar Sonar & Navigation*, 2017, 11(1): 98–106. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0049](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0049).
- [18] XIONG Di, WANG Junling, QI Xiaoyang, *et al.* A coherent compensation method for multiband fusion imaging[C], IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 1024–1027. doi: [10.1109/radar.2017.7944354](https://doi.org/10.1109/radar.2017.7944354).
- [19] 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超分辨单元徙动校正算法[J]. 物理学报, 2014, 63(23): 408–419. 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): 408–419. doi: [10.7498/aps.63.238406](https://doi.org/10.7498/aps.63.238406).
- 熊 娣: 女, 1990年生, 博士生, 研究方向为雷达成像技术.
- 王俊岭: 男, 1982年生, 讲师, 研究方向为雷达信号处理、雷达成像技术等.
- 赵莉芝: 女, 1986年生, 讲师, 研究方向为雷达信号处理、雷达成像技术等.
- 钟 山: 男, 1995年生, 硕士, 研究方向为雷达成像技术.
- 高梅国: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达电子对抗与反对抗、高速实时信号处理、雷达成像技术等.