

基于越距离单元徙动校正的空间 高速旋转目标 ISAR 成像方法

李鸿志, 徐嘉良, 赵彬, 王勇

(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江哈尔滨, 150001)

摘要 逆合成孔径雷达成像是实现对空间目标跟踪, 成像与识别的重要手段, 但是空间目标的高速旋转运动特性使传统的 ISAR 成像算法失效。针对这一问题, 提出一种基于越距离单元徙动校正的 ISAR 成像方法。首先, 建立空间高速旋转目标回波模型; 其次, 根据回波特性和参考信号进行越距离单元徙动校正, 实现目标散射点空间参数估计; 最后, 引入粒子群优化算法实现参数快速搜索。仿真结果表明, 该算法可以有效提取目标参数, 实现空间目标高质量成像, 与传统成像算法对比结果验证了该算法的鲁棒性及优越性。

关键词 空间态势感知; 逆合成孔径雷达; 空间高速旋转目标; 越距离单元徙动校正; 粒子群优化

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.01.003

中图分类号 TN95 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)01-0018-08

An ISAR Imaging Method of High-Speed Rotating Target in Space Based on Range Cell Migration Compensate

LI Hongzhi, XU Jialiang, ZHAO Bin, WANG Yong

(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract Inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging is an important means of achieving space target tracking, imaging, and identification. However, space targets' high-speed rotating motion characteristics make the traditional ISAR imaging algorithm ineffective. Based on this, an ISAR imaging method is proposed based on Range Cell Migration Compensate (RCMC). Firstly, the echo model of the high-speed rotating target in space is established, and then, the range cell migration compensate is made by the reference signals constructed according to the echo characteristics to realize the spatial parameter estimation of the target scattering point. Finally, the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is introduced to achieve the fast parameter search. The simulation results show that the target parameters can be extracted effectively by the algorithm, realizing the high-quality imaging in space targets. The robustness of the algorithm is verified by comparison with the traditional imaging algorithms.

Key words space situational awareness; inverse synthetic aperture radar; space high-speed rotating target; range cell migration compensate; particle swarm optimization

随着航空与航天技术的快速发展, 近地空间已经成为各国博弈的新赛道。目前, 在轨航天器数量

收稿日期: 2022-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(61871146)

作者简介: 李鸿志(1987-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副研究员, 研究方向为雷达成像技术。E-mail: lihongzhi2014@hit.edu.cn

引用格式: 李鸿志, 徐嘉良, 赵彬, 等. 基于越距离单元徙动校正的空间高速旋转目标 ISAR 成像方法[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(1): 18-25. LI Hongzhi, XU Jialiang, ZHAO Bin, et al. An ISAR Imaging Method of High-Speed Rotating Target in Space Based on Range Cell Migration Compensate[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(1): 18-25.

众多,直径超过 10 cm 的空间碎片数量超过 16 000 个,同时还有因军事活动发射的导弹以及被地球引力捕获的微流星体等等^[1-2],均分布在近地空间内。因此,建立对空间目标的认知、分析、评估、决策能力,对确保空间安全以及维持空间秩序是必要的。逆合成孔径雷达具有全天候、大范围、高分辨等工作特性,被广泛应用于空间非合作目标成像^[3]。ISAR 通过发射大带宽信号增加雷达的距离分辨能力,利用目标相对雷达转动进行回波积累增加雷达方位分辨能力^[4-5]。但空间中的碎片目标常以高速旋转状态存在,产生的微多普勒效应^[6]使得回波具有较大的越距离单元徙动,常规的距离多普勒(range doppler, RD)成像算法失效。

在此基础上发展的空间高速旋转目标成像方法主要分为非参数化成像方法^[7-8]与参数成像方法^[9-12]。文献[7]提出分段伪 Keystone 变换,提取回波初相分段校正高速旋转目标越距离单元徙动实现二维成像,但无法对目标进行三维成像;文献[8]基于卡尔曼预测实现航迹矩阵关联,从而实现高分辨成像,但当回波混叠严重时,成像效果较差。非参数化成像运算复杂度较小,但对复杂散射环境适应能力差。文献[9]利用遗传算法(genetic algorithm, GA)估计回波参数并引入 Clean 技术抑制已提取回波,实现目标的三维重构;文献[10]分析 ISAR 的驻定相位原理(principle of stationary phase, POSP),构造匹配滤波器补偿信号高阶相位项,进行目标成像。文献[11]利用 PSO 算法对广义 Radon 变换成像方法进行改进,提出 PSO-Clean 成像算法,实现目标三维参数的快速搜索。文献[12]提出了一种基于匹配滤波器组(matched filter bank, MFB)实现参数估计的成像方法,通过构建匹配滤波器组搜索空间参数。参数化方法相较于非参数方法对复杂运动目标和干扰的适应能力更强,但运算复杂度和运算时间也随之上升。

本文基于参数化成像方法,结合 PSO 优化算法,可实现目标快速成像。鉴于 ISAR 雷达信号的回波特性,本文在低信噪比和回波稀疏的情况下验证了算法的稳定性^[13],通过与其他参数化成像算法对比验证算法的优越性。

1 空间高速旋转目标运动模型

空间高速运动目标在经过平动补偿后呈现沿固定轴做旋转运动的运动姿态,导致散射点相对雷达距离不断变化。图 1 为典型的空间高速旋转目标的几何运动模型,图中建立了以雷达为原点的雷达坐

标系(U, V, W)和以目标中心为原点的本地坐标系(x, y, z)以及用于转换坐标的参考坐标系(X, Y, Z),图中 P 为散射点初始位置。

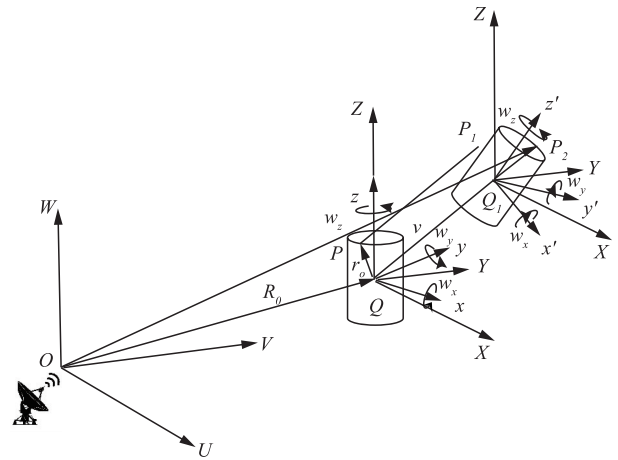


图 1 空间目标运动模型

标经过时间为 t 的运动后,散射点由 P 运动到 P_2 ,包含目标平动与旋转运动,散射点到雷达的总位移向量为:

$$\mathbf{OP}_2 = \mathbf{OQ} + \mathbf{QQ}_1 + \mathbf{Q}_1\mathbf{P}_2 = \mathbf{R}_0 + \mathbf{vt} + \mathbf{R}_{\text{rot}}\hat{r}_0 \quad (1)$$

式中: \mathbf{R}_{rot} 为旋转矩阵,用于实现坐标系间的坐标变换,具体可参考文献[14]。根据式(1),可以精确描述空间目标相对地基雷达的实时位置。

目前,ISAR 主要采用的发射信号形式为线性调频脉冲信号,具有“大时宽带宽积”的特点,信号形式为:

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

式中: f_c 为发射信号载频; γ 为信号调频斜率; \hat{t} 代表快时间; t_m 代表慢时间; T_p 代表脉冲宽度。对 $\text{rect}(u)$ 函数,有:

$$\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & |u| > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (3)$$

由于雷达的脉冲重复频率显著高于目标的旋转速度,满足“走-停”模型使用条件,雷达信号回波可表示为:

$$s_r(\hat{t}, t_m) = \sigma(t_m) \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R(t_m)/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{2R(t_m)}{c}\right) + \frac{1}{2}\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R(t_m)}{c}\right)^2\right)\right) \quad (4)$$

式中: σ 为目标后向散射系数; c 为光速; $R(t_m)$ 为目标散射点与雷达间的瞬时距离:

$$R(t_m) = \|\mathbf{R}_0 + \mathbf{vt}_m + \mathbf{R}_{\text{rot}}(t_m)\hat{r}_0\| = \sqrt{(\mathbf{R}_0 + \mathbf{vt}_m + \mathbf{R}_{\text{rot}}(t_m)\hat{r}_0)^T (\mathbf{R}_0 + \mathbf{vt}_m + \mathbf{R}_{\text{rot}}(t_m)\hat{r}_0)} \quad (5)$$

选择 $s_{\text{ref}}(\hat{t}, t_m)$ 参考信号, 对回波进行解线性调频, 经过解线性调频后可以将宽带信号变为窄带信号。这里以目标中心 $R_{\text{ref}}(t_m) = \|R_0 + vt_m\|$ 作为参考点构建解线性调频信号:

$$s_{\text{ref}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_{\text{ref}}(t_m)/c}{T_{\text{ref}}}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{2R_{\text{ref}}(t_m)}{c}\right) + \frac{1}{2}\gamma\left(\hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}(t_m)}{c}\right)^2\right)\right) \quad (6)$$

对于空间目标, 满足远场条件, 即 $\|R_0\| \geq \|vt_m + R_{\text{rot}}(t_m)\hat{r}_0\|$, 雷达视线方向为 $L_{os} \approx R_0/\|R_0\|$, 此时, 散射点与参考点的瞬时距离 $\Delta R(t_m)$ 为:

$$\Delta R(t_m) = (R(t_m) - R_{\text{ref}}(t_m))^T L_{os} = z \cos \alpha + \rho \sin \alpha \sin(\omega_0 t_m + \theta) \quad (7)$$

式中: (ρ, θ, z) 为散射点的本地坐标系坐标; α 表示目标的旋转轴与雷达视线方向 L_{os} 的夹角, 文中的成像过程中, 假设目标散射点绕固定轴做旋转运动, 共享相同的旋转角速度, 角速度 ω_0 可以根据回波自相关估算得到。

将回波信号进行距离压缩, 再进行相位补偿, 得到距离慢时间域回波信号, 其形式为:

$$s_d(r, t_m) = \sigma(t_m) \cdot \text{sinc}\left(\frac{2B}{c}(r - \Delta R(t_m))\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R(t_m)\right) \quad (8)$$

式中: B 为信号带宽; λ 为信号波长。将式(7)带入式(8)并取模值, 有:

$$|s_d(r, t_m)| = \sigma(t_m) \cdot \text{sinc}\left(\frac{2B}{c}(r - (z \cos \alpha + \rho \sin \alpha \sin(\omega_0 t_m + \theta)))\right) \quad (9)$$

式中: $|s_d(r, t_m)|$ 为散射点 P 回波沿慢时间的一维距离像分布。根据式(9)可知, 目标散射点的旋转使回波能量分布在若干连续距离门内, 回波能量峰值沿慢时间呈正弦变化, 散射点旋转平面高度 z 引起一维距离像沿距离向产生固定偏移, 散射点的旋转半径 ρ 引起一维距离像沿慢时间以正弦规律进行变化, 散射点的初始位置关联正弦信号的初始相位 θ , 散射点旋转角速度 ω_0 影响正弦包络的变化周期。上述因素导致回波产生严重的距离徙动, 使得 RD 成像算法失效。

2 高速旋转目标 ISAR 成像算法

2.1 RCMC 原理

根据式(9)可以得到某一空间旋转目标散射点回波和为:

$$s(r, t_m) = \sum_{i=1}^L \sigma_i(t_m) \text{sinc}\left(\frac{2B}{c}(r - \Delta R_i(t_m))\right) \quad (10)$$

$$\Delta R_i(t_m) = z_i \cos \alpha + \rho_i \sin \alpha \sin(\omega t_m + \theta_i) \quad (11)$$

式中: L 代表散射点个数。

根据散射点回波越距离单元徙动变化规律, 在距离慢时间域可以构造补偿函数 $h(r, t_m)$:

$$h(r, t_m) = \delta\left(\frac{2B}{c}(r - R_u(t_m))\right) \quad (12)$$

$$R_u(t_m) = \rho_u \sin(\omega t_m + \theta_u) \quad (13)$$

该函数在每个方位门内校正一维距离像的越距离单元徙动, 经补偿后的结果为:

$$s_o(r, t_m) = \sum_{i=1}^L \sigma_i \text{sinc}\left(\frac{2B}{c}(r - (\Delta R_i(t_m) - R_u(t_m)))\right) \quad (14)$$

当补偿参数和散射点参数相匹配, 即 $\rho_u = \rho_i \sin \alpha$, $\theta_u = \theta_i$ 时, 对任一散射点 i , 被校正的回波聚集在同一距离门内, 此时有:

$$s_m(r, t_m) = \sigma_i \text{sinc}\left(\frac{2B}{c}(r - z_i \cos \alpha)\right) + H(r, t_m) \quad (15)$$

式中: $H(r, t_m)$ 为回波中其他散射点因参数不匹配的产生的回波与噪声分量。经校正后回波中某条正弦包络分量变为包络不变分量, 该分量所在距离门位置与该散射点所在旋转平面的投影高度 $r = z_i \cos \alpha$ 有关。通过计算该距离门内的回波和作为当前参数在不同高度的匹配程度, 且散射点 i 所在距离门回波和会达到最大。

$$U(r, \rho_u, \theta_u) = \sum_{t_m} s_m(r, \rho_u, \theta_u, t_m) \quad (16)$$

$$\max(U(r, \rho_u, \theta_u)) = U(r = z_p \cos \alpha, \rho_u, \theta_u) \quad (17)$$

式中: U 代表距离门 r 沿慢时间轴统计的回波能量和; ρ_u 和 θ_u 代表搜索过程中的旋转半径参数以及初始相位参数; $r = z_p \cos \alpha$ 代表散射点回波能量和峰值平面对应的投影高度; \max 为取最大值操作。由获取的旋转半径, 相位参数以及高度信息经尺度变换后得到散射点的空间分布, 实现目标三维成像。

由图 1 散射点的空间特征, 以中心距离门为高度平面参考, 记为 R_N , 可得某一散射点的一组估计参数 (ρ_u, θ_u, z_p) 与该散射点对应估计坐标 (x_i, y_i, z_i) 满足公式:

$$\begin{cases} z_i = (z_p \cos \alpha - R_N)(c/2B)/\cos \alpha \\ x_i = \rho_u \cos(\theta_u)(c/2B)/\sin \alpha \\ y_i = \rho_u \sin(\theta_u)(c/2B)/\sin \alpha \end{cases} \quad (18)$$

2.2 粒子群优化算法

PSO 粒子群优化算法实现在给定范围内参数的快速搜索^[15]。在此对文中使用权重递减的 PSO 算法进行优化。

首先,确定待搜索参数的数量为 Q , 设置某一参数 d 的参数搜索的上限与下限分别为 H_d 和 L_d , 最大搜索速度为 V_d , 粒子数为 P , 任意被搜索参数粒子 d 的位置和速度可以表示为:

$$x_d = L_d + \text{rand}(0, 1) (H_d - L_d) \quad (19)$$

$$v_d = V_d \cdot \text{rand}(0, 1) \quad (20)$$

其次,设置目标函数,用于判断粒子参数的估计准确度,并在迭代过程中统计 d 粒子的局部最优解 D_d 以及所有粒子的全局最优解 G 。

最后,通过获取的粒子局部最优解 D_d 以及所有全局最优解 G 对当前粒子的参数进行更新,直至达到目标函数的终止条件,获取最优参数,迭代结束。参数更新公式为:

$$v_d = \omega v_d + c_1 r_1 (p_{dv} - v_d) + c_2 r_2 (Gv - v_d) \quad (21)$$

$$x_d = x_d + v_d \quad (22)$$

式中: r_1 和 r_2 是 $0 \sim 1$ 之内的随机数; c_1 和 c_2 是粒子参数更新过程中用于调整粒子的局部最优与全局最优贡献的权重因子; ω 为惯性因子,用于调整粒子的局部搜索与全局搜索能力。

设定 PSO 算法的权重线性递减,降低搜索过程陷入局部最优的可能,惯性因子随迭代次数增加而逐渐减小:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{n(\omega_{\max} - \omega_{\min})}{N} \quad (23)$$

式中: ω_{\max} 为最大的惯性权重值; ω_{\min} 为最小的权重值; n 为迭代次数; N 为最大的迭代次数。

2.3 RCMC-PSO 成像算法

将 PSO 引入到 RCMC 的参数搜索过程,对 ρ_u 和 θ_u 进行搜索。

根据公式(15),当获取到一组全局最优解后,某一散射点回波会聚集在同一距离门内,目标函数设定为距离门所有回波的能量和达到峰值,即:

$$\begin{aligned} \text{fit}(\rho_u, \theta_u) &= \sum_{t_m} s_o(r = z_i \cos \alpha, \rho_u, \theta_u, t_m) = \\ \max(\sum_{t_m} s_o(r, \rho_u, \theta_u, t_m)) \end{aligned} \quad (24)$$

为避免在二次搜索中重新估计到已搜索回波信号分量的参数,利用 Clean 技术抑制已搜索距离门内的信号分量,信号的 Clean 过程如公式(25)所示。

$$s_o(r = z_i \cos \alpha, t_m) = 0 \quad (25)$$

经 Clean 处理后,剩余的回波分量为:

$$s_o(r, t_m) = \sum_{j=1, j \neq i}^L \sigma_j \text{sinc}\left(\frac{2B}{c}(r - (\Delta R_j(t_m) - R_u(t_m)))\right) \quad (26)$$

基于已提取的参数将回波信号恢复为补偿前的形式,此时该散射点的回波分量被去除。重复上述步骤进行下一次参数估计,当多次迭代后回波能量不足 10% 时,视为参数提取完毕,停止迭代。算法运算流程如图 2 所示。

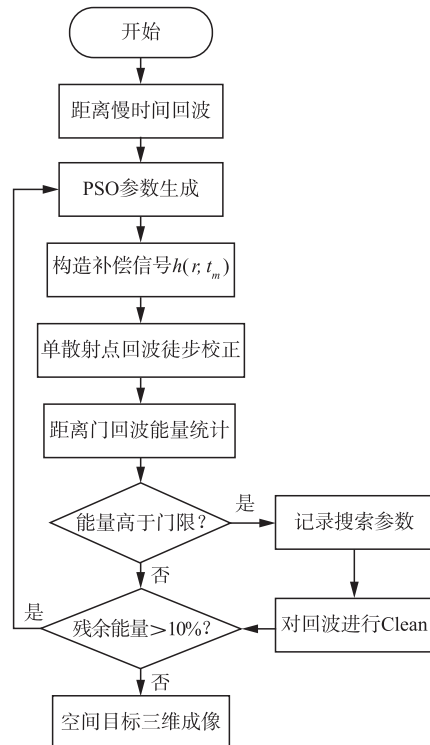


图 2 RCMC-PSO 成像流程

2.4 性能分析

匹配滤波器组的方法通过更改匹配参数从信号匹配滤波的结果中获得目标的 2D 成像切片,通过遍历组合进行 3D 成像,减少了估计参数维度,提高了运算速度,但运算复杂度会随散射点个数增加而快速增加,性能也随回波混叠而下降。相比该算法,RCMC-PSO 不会因为散射点增加或回波混叠发生性能下降,匹配函数更加稳定,使得成像效果更好。同时算法中避免了卷积运算,进一步提高了运行速度。

PSO-Clean 算法在 (ρ, θ, z) 参数空间内直接搜寻三维参数,通过搜索到的三维参数生成积分路径,在距离慢时间回波域沿积分路径进行能量统计,作为参数匹配程度的判断标准。RCMC-PSO 算法根据高速旋转目标的回波特性,利用 (ρ, θ, z) 参数对回波影响程度的不同,首先对 ρ, θ 两个参数造成的回波正弦徙动进行补偿,分布在多个距离门内的回波能量沿慢时间聚集在同一个距离门内,单散射点引起的微多普勒效应得到补偿,因此可以直接沿慢时间统计不同距离门内的回波能量和作为参数匹配函数,当参数匹配时,根据被校正回波所在距离门的位置,可以自动实现对参数 z 的估计。相比于

PSO-Clean 算法,本文仅对 2 种参数进行估计即可实现目标的三维成像。同时,在部分散射点距离较近的情况下,RCMC-PSO 可以很好地实现目标散射点重建,而 PSO-Clean 则可能出现在相同最大迭代次数内无法搜寻到部分散射点参数的问题。

3 实验仿真

3.1 RCMC-PSO 成像算法验证

将空间高速旋转目标分解为多散射点形式,散射点的空间分布见图 3。散射点坐标分别为 $(1.3, 0, 0)$, $(0, 1.3, 0)$, $(-1.3, 0, 0)$, $(-0.4, -0.6, 0.3)$, $(0.4, 0.6, 0.3)$, $(-0.6, 0.4, 0.3)$, $(0.3, 0.3, 0.6)$, $(-0.3, 0.3, 0.6)$, $(0.3, -0.3, 0.6)$, $(0, 0, 0.8)$,空间点坐标单位均为 m。

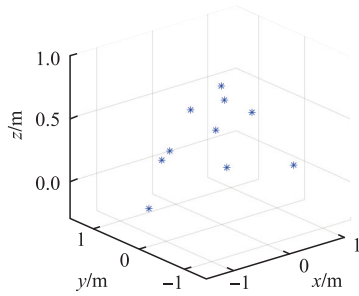


图 3 空间目标散射点分布

散射点以 5 Hz 的角频率绕固定旋转轴向量 $(0, 0, 1)$ 旋转,初始时刻雷达视线方向与目标旋转轴之间的夹角为 60° 。

雷达信号的仿真参数见表 1。

表 1 雷达仿真参数

参数	数值
雷达中心频率/GHz	10
线性调频信号带宽/GHz	2
脉冲宽度/ μs	50
采样频率/MHz	20
脉冲重复频率/Hz	400
成像时间内回波数	512
单个回波距离采样点数	1 024

经解线性调频与距离压缩后获得目标的距离慢时间回波图像如图 4 所示。

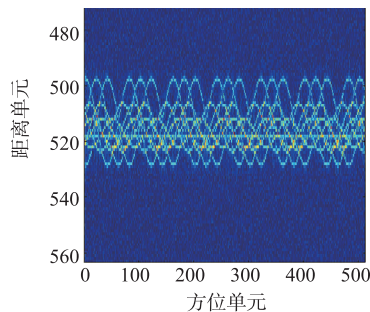


图 4 距离慢时间域回波

利用传统 RD 成像算法对旋转目标成像,成像结果如图 5 所示。由于目标的高速旋转使其无法聚焦,RD 成像算法失效。

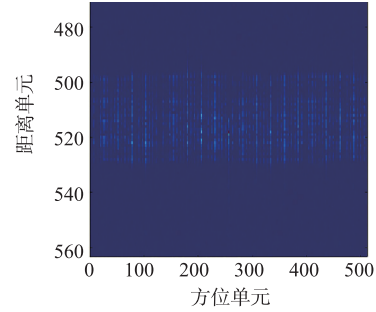
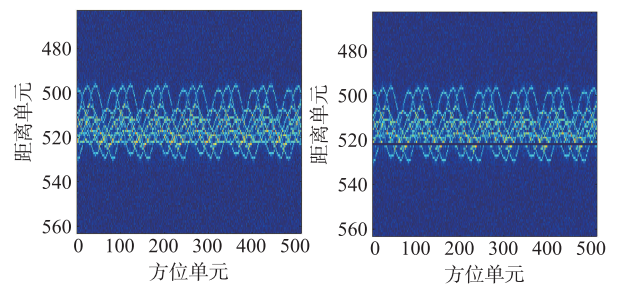


图 5 RD 成像结果

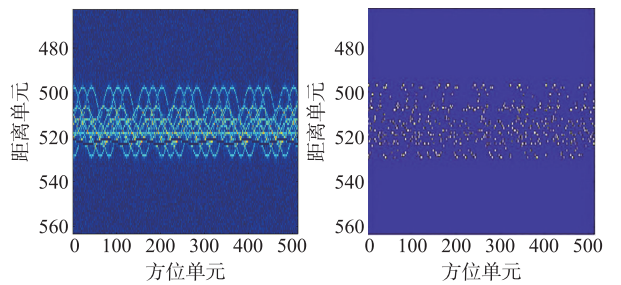
PSO 粒子数对应种群规模,一般常取到 20~40,考虑硬件平台运算性能以及搜索区间的大小,PSO 算法设置粒子数为 10;最大迭代次数设置为 100。同理,根据典型成像目标的成像尺寸与运动特征,将旋转半径搜索区间设置为 $[0, 5 \text{ m}]$,相位参数搜索范围为 $[0, 2\pi]$;根据实验经验与文献统计设定最大与最小惯性权重为 0.9 与 0.4,学习因子 $c_1 = c_2 = 2$;为平衡成像精度与运算时间,设置半径搜索步长为 $0.2 \times \frac{c}{2B}$,相位搜索步长为 $\frac{\pi}{80}$ 。

对距离慢时间回波进行参数搜索,图 6(a)为 PSO 搜索到某一全局最优解后,对越距离单元徙动校正的结果,回波中因某散射点旋转产生的正弦包络被校正。图 6(b)为被搜索信号 Clean 后的结果。图 6(c)为利用估计参数将信号恢复的结果,此时,图中被搜索包络分量被去除。图 6(d)为全部搜索结束时回波中的噪声和残余信号分量,在迭代过程中,对回波信号进行二值化处理。



(a)RCMC-PSO 算法搜索到匹配参数

(b)Clean 搜索回波分量



(c)恢复剩余回波分量

(d)参数提取后的残余信号

图 6 RCMC-PSO 参数搜索过程

利用估计到的参数对散射点进行重构,实现对目标的成像,成像结果如图 7 所示,成像结果良好。

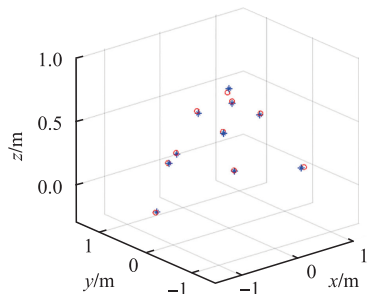


图 7 RCMC-PSO 成像结果

由于本文中进行目标成像的方法是通过估计目标散射点的坐标来实现目标重建成像,因此通过计算均方根误差^[16]来分析 RCMC-PSO 成像算法的成像误差,计算方法为:

$$RMSE =$$

$$\sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L ((x_{pi} - x_i)^2 + (y_{pi} - y_i)^2 + (z_{pi} - z_i)^2)} \quad (27)$$

式中: L 为散射点个数; x_{pi}, y_{pi} 与 z_{pi} 为散射点原始坐标; x_i, y_i 与 z_i 为算法估计散射点坐标,并在每种环境下多次执行蒙特卡洛实验统计误差均值来消除可能的随机误差。

为进一步验证算法的鲁棒性,分别对 RCMC-PSO 成像算法在低信噪比与信号稀疏的情况下进行测试。散射点以 5 Hz 的角频率绕固定旋转向量 $(0, 0, 1)$ 旋转,初始时刻雷达视线方向与目标旋转轴之间的夹角为 60° ,雷达参数设置见表 1。在计算 RCMC-PSO 在不同信噪比下的重建性能时不改变目标散射点分布,每种信噪比条件下进行 50 次蒙特卡洛实验,每次实验均重新产生噪声,最后利用式 (27) 计算重建目标成像误差。在计算 RCMC-PSO 在不同信号稀疏比例下的重建性能时保持信号信噪比为固定 -10 dB,每种稀疏比例的蒙特卡洛实验次数为 50 次,均在每次实验时对信号进行随机降采样,误差计算方式同前。

表 2 不同信噪比下算法成像误差

信噪比/dB	-20	-15	-10	-5	0	5
成像误差(RMSE)	0.155	0.188	0.241	0.188	0.219	0.178

表 3 不同信号稀疏比下算法成像误差

信号稀疏比例	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
成像误差(RMSE)	0.251	0.212	0.207	0.216	0.182

根据表 2 与表 3 结果可知,改变信噪比与信号稀疏比例并未对成像结果产生较大的影响,成像误差在 0.15 与 0.25 之间浮动,证明 RCMC-PSO 具有较好的鲁棒性,对复杂环境有很好的适应性。

将仿真信噪比设置为 -20 dB,信号稀疏比设置为 0.5,图 8 为利用 RCMC-PSO 估计参数进行成像的结果,虽然参数估计时间增加,但成像效果无明显下降,印证表 2 与表 3 的结论。

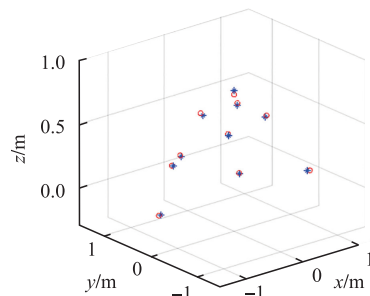


图 8 -20 dB 下成像结果

3.2 成像结果对比

对 RCMC-PSO 算法相较于 MFB 算法与 PSO-Clean 成像算法的优势进行仿真验证。

基于前文中散射点的分布范围,随机调整 9 个散射点分布,回波信号恒定为 -10 dB,信号不进行稀疏处理,保持其他雷达仿真参数不变,分别利用 MFB、PSO-Clean、RCMC 以及 RCMC-PSO 成像算法进行 50 次蒙特卡洛仿真实验,记录平均成像时间与成像误差。仿真实验平台为个人便携式计算机,计算核心为 Intel i5-8250U,主频频率 1.6 GHz,内存大小 16 GB,主频 2 400 MHz,在相同的仿真软件下进行仿真。仿真结果见表 4。

表 4 不同成像算法成像时间与成像误差

成像方法	成像时间/s	成像误差(RMSE)
MFB	35.8	0.556
PSO-Clean	27.4	0.184
RCMC	28.8	0.140
RCMC-PSO	21.6	0.144

由表 4 可知,由于 PSO 算法的引入大幅提高了算法的运行效率,所以 RCMC-PSO 与 PSO-Clean 的运行效率均高于 MFB。同时,上述 3 种方法中,RCMC-PSO 的均方误差一直处于最低水平。RCMC-PSO 是对 RCMC 算法的优化改进,相较于 RCMC 的直接遍历运算方式,PSO 优化算法的引入在保证结果准确的前提下缩短了运行时间。

此处展示部分成像结果。由图 9(a)可知,当散射点的分布较为规律,点与点之间的间隔较远时,3 种成像算法的成像效果都比较理想。当散射点分布较为随机,部分点之间的间隔较小时,成像结果如图 9(b)所示,此时,MFB 成像效果迅速下降;PSO-Clean 在成像时对部分点产生遗漏;而 RCMC-PSO 的成像效果依旧稳定。

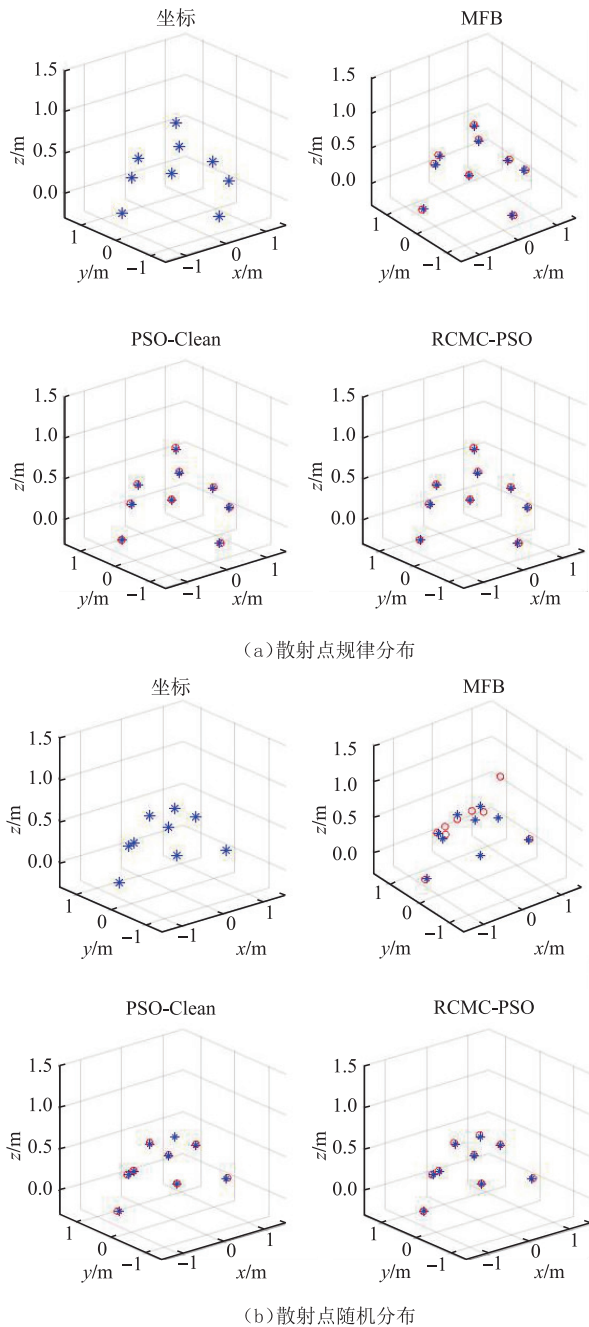


图9 高速旋转目标成像结果对比

为进一步对比不同算法的鲁棒性,本文参照表2中数据进行的仿真实验条件,基于相同的散射点分布以及表1中的雷达仿真参数,每种信噪比条件进行50次蒙特卡洛实验,对MFB以及PSO-Clean在不同信噪比下目标的重建能力与RCMC-PSO进行对比,实验结果如表5所示。

表5 不同信噪比下3种算法成像误差

算法	信噪比/dB					
	-20	-15	-10	-5	0	5
RCMC-PSO	0.155	0.188	0.241	0.188	0.219	0.178
MFB	0.606	0.613	0.603	0.606	0.612	0.617
PSO-Clean	0.264	0.301	0.329	0.331	0.337	0.338

由表5可知,对于MFB算法来说,空间散射点分

布对目标的重建性能影响较大,散射点增加引起的回波混叠让MFB的目标重建性能一直不理想;对于PSO-Clean算法来说,随着信噪比的下降,目标重建能力略有下降,但是在实际实验过程中,偶尔会出现部分散射点无法被检测以及成像误差过大的问题,这也印证了RCMC-PSO算法成像性能更加稳定的观点。综上,本文所提的方法在鲁棒性和环境适应性方面优于MFB以及PSO-Clean成像算法。

4 结语

RCMC-PSO参数化成像方法通过对目标散射点回波进行补偿来做空间位置参数,实现目标成像。本文通过对该算法在不同条件下的仿真结果验证了其有效性和鲁棒性,同时对比多种成像算法验证RCMC-PSO成像性能的优越性。本文只对单目标情况下的成像效果进行了验证,后续将研究该算法在群目标情况下的应用,并继续优化算法的成像效率。

参考文献

- [1] MUNTONI G, MONTISCI G, PISANU T, et al. Crowded Space: A Review on Radar Measurements for Space Debris Monitoring and Tracking[J]. Applied Sciences, 2021, 11(4): 1364.
- [2] PISANU T, MUNTONI G, et al. Recent Advances of the BIRALET System about Space Debris Detection[J]. Aerospace, 2021, 8(3): 86.
- [3] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2014.
- [4] VEHMAS R, NEUBERGER N. Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging: A Historical Perspective and State-of-the-Art Survey[J]. IEEE Access, 2021, 9: 113917-113943.
- [5] CHEN V C, QIAN S. Joint Time-Frequency Transform for Radar Range-Doppler Imaging[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(2): 486-499.
- [6] 张群, 胡健, 罗迎, 陈怡君. 微动目标雷达特征提取、成像与识别研究进展[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 531-547.
- [7] HUO K, LIU Y, HU J, et al. A Novel Imaging Method for Fast Rotating Targets Based on the Segmental Pseudo Keystone Transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(4): 1464-1472.
- [8] BAI X, ZHOU F. High-Resolution Radar Imaging of

- Space Targets Based on HRRP Series [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(5): 2369-2381.
- [9] NING Y, BAI X, ZHOU F, et al. Method for Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging of Space Debris Using Improved Genetic Algorithm [J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2017, 11(5): 812-821.
- [10] TAN X, YANG Z, LI D, et al. An Efficient Range-Doppler Domain ISAR Imaging Approach for Rapidly Spinning Targets [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(4): 2670-2681.
- [11] NING Y, ZHOU F, BAI X, et al. A Method for 3-D ISAR Imaging of Space Debris [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(2): 864-876.
- [12] XING M, QI W, WANG G, et al. A Matched-Filter-Bank-Based 3-D Imaging Algorithm for Rapidly Spinning Targets [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(7): 2106-2113.
- [13] LI R Z, ZHANG S H, Deep Learning Approach for Sparse Aperture ISAR Imaging and Autofocusing Based on Complex-Valued ADMM-Net [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(3): 3437-3451.
- [14] LIANG T, WANG S, REN J, et al. A Novel Video ISAR Imaging for Rotating Space Targets Based on Pulse Train Design [C]// 2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR). Xiamen, China: IEEE, 2019:1-5.
- [15] SHI Y. A Modified Particle Swarm Optimizer [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation Conference. New Jersey, United States: IEEE, 1998: 67-93.
- [16] ZHOU Z, LIU L, DU R, et al. Three-Dimensional Geometry Reconstruction Method for Slowly Rotating Space Targets Utilizing ISAR Image Sequence [J]. Remote Sensing, 2022, 14(5): 1144.

(编辑:徐敏)

(上接第 17 页)

- [84] PERSICO A R, CLEMENTE C, GAGLIONE D, et al. On Model, Algorithms and Experiment for Micro-Doppler Based Recognition of Ballistic Targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(3): 1088-1108.
- [85] PERSICO A R, CLEMENTE C, PALLOTTA L, et al. Micro-Doppler Classification of Ballistic Threats Using Krawtchouk Moments [C]// 2016 IEEE Radar Conference. Philadelphia, USA: IEEE, 2016: 1-6.
- [86] PERSICO A R, ILIOUDIS C, CLEMENTE C, et al. Novel Approach for Ballistic Targets Classification from HRRP Frame [C]// 2017 Sensor Signal Processing for Defense Conference (SSPD). London, UK: IEEE, 2017: 1-5.
- [87] PERSICO A R, ILIOUDIS C, CLEMENTE C, et al. Novel Classification Algorithm for Ballistic Target Based on HRRP Frame [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(6): 3168-3189.
- [88] ZHANG Y P, ZHANG Q, KANG L, et al. End-to-End Recognition of Similar Space Cone-Cylinder Targets Based on Complex-Valued Coordinate Attention Networks [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-14.
- [89] 向前, 王晓丹, 李睿, 等. 基于 DCNN 的弹道中段目标 HRRP 图像识别 [J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(11): 2426-2433.
- [90] 李江, 冯存前, 王义哲, 等. 基于深度卷积神经网络的弹道目标微动分类 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(4): 97-104.
- [91] WANG Y Z, FENG C Q, ZHANG Y S, et al. Classification of Space Targets with Micro-Motion Based on Deep CNN [C]// Proceedings of the 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronic Information and Communication Technology. Piscataway: IEEE, 2019: 557-561.
- [92] 李江, 冯存前, 王义哲, 等. 一种用于锥体目标微动分类的深度学习模型 [J]. 西安电子科技大学学报, 2020, 47(3): 105-112.
- [93] 李鹏, 冯存前, 许旭光, 等. 一种利用贝叶斯优化的弹道目标微动分类网络 [J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(5): 139-148.
- [94] HAN L X, FENG C Q. Micro-Doppler-Based Space Target Recognition with a One-Dimensional Parallel Network [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2020: 1-10.
- [95] WANG Y Z, FENG C Q, ZHANG Y S, et al. Space Precession Target Classification Based on Radar High-Resolution Range Profiles [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2019: 1-9.

(编辑:徐敏)