

基于遗传-启发算法的微动目标认知 ISAR 成像资源调度

王 越¹, 黄 璐², 祁浩凡¹, 田旭东³, 白雪茹¹

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;
3. 西安电子科技大学电子信息攻防对抗与仿真技术教育部重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 认知逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)将认知雷达理论与 ISAR 成像技术相结合, 利用目标与环境的离线先验知识及在线感知结果, 提升 ISAR 在复杂环境下的成像能力. 与传统单脉冲雷达相比较, 相控阵 ISAR 可实现波束的快速扫描, 因此具备多目标观测能力. 在实际空间微动目标成像场景中, 相控阵 ISAR 很可能存在多波束多目标情况. 为实现系统效能的充分发挥, 需要在系统能量、时间资源有限条件下实现成像任务有效调度.

然而, 面向成像任务的资源调度方法主要针对刚体目标, 其约束条件及调度模型并不适用于微动目标, 并且存在求解方法稳定性差、调度成功率不高等问题. 此外, 微动目标运动形式复杂, 回波非平稳性很强, 且方位缺损时难以聚焦成像. 因此, 迫切需要针对微动目标的特性, 研究有效的 ISAR 资源调度和高分辨成像方法.

针对上述问题, 本文提出基于遗传-启发算法的微动目标认知 ISAR 成像资源调度方法. 该方法首先根据微动目标认知结果计算其成像所需的雷达资源及综合优先级; 接着基于脉冲交错技术, 在时间、能量双重约束下建立微动多目标资源调度模型. 在此基础上, 本文提出了基于遗传-启发算法的最优调度求解方法. 进一步, 针对资源调度导致微动目标回波缺损, 难以聚焦成像的问题, 本文提出了基于交替方向乘法(Alternating Direction Method of Multipliers, ADMM)的距离-瞬时多普勒(Range-Instantaneous Doppler, RID)成像方法, 从而实现成功调度任务对应微动目标回波的高分辨聚焦成像.

实验结果表明, 相比于现有资源调度方法, 本文所提方法调度结果更为稳定, 调度成功率更高, 并可实现回波缺损时的微动目标聚焦成像.

关键词: 认知逆合成孔径雷达; 资源调度; 微动目标; 遗传-启发算法; 交替方向乘法; 距离-瞬时多普勒成像

基金项目: 国家自然科学基金(No.62131020, No.61971332, No.61631019)

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)06-1421-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210813

ISAR Resource Scheduling of Multiple Micro-Motion Targets Based on Genetic-Heuristic Algorithm

WANG Yue¹, HUANG Lu², QI Hao-fan¹, TIAN Xu-dong³, BAI Xue-ru¹

(1. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China;

3. Key Laboratory of Electronic Information Countermeasure and Simulation Technology, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: By including cognitive theory, cognitive inverse synthetic aperture radar (ISAR) has improved on the imaging capability of ISAR for targets in complex environments through the use of offline prior knowledge and online perception results of the target and environment. Compared with traditional monopulse radar, phased-array ISAR achieves rapid beam scanning through the control of the phase of each antenna element in the antenna array and can therefore observe multiple targets. Multi-beam and multi-target situations are likely to exist in practical spatial micro-motion target imaging scenarios of phased-array ISAR. When there are multiple spatial micro-motion targets in multiple radar beams, the success rate

of imaging task scheduling is usually low, which limits the full exploitation of the ISAR effectiveness. In fully realizing system efficiency, imaging tasks need to be effectively scheduled under limited system energy and time resources.

Resource scheduling methods for imaging tasks are mainly aimed at rigid targets. The basic idea is to adopt sparse aperture ISAR imaging in constructing the optimal scheduling model under the radar resource constraints and then use a heuristic algorithm to solve the model. However, the constraint conditions and scheduling models of existing methods are not suitable for micro-motion targets, and the adopted heuristic algorithm usually has poor stability and a low scheduling success rate. In addition, the motions of micro-motion targets are usually complex and their echoes are strongly non-stationary, making it difficult to achieve focused imaging in scenarios of data corruption. There is thus an urgent need to study effective resource scheduling and high-resolution imaging methods for ISAR based on the characteristics of micro-motion targets.

To tackle the above issues, this paper proposes a cognitive ISAR resource scheduling method based on a genetic heuristic algorithm for the imaging of multiple micro-motion targets. This method first calculates the radar resources and comprehensive priorities required for imaging according to the cognized characteristics of micro-motion targets. On this basis, the normalized available energy is proposed as a metric of the resource scheduling performance. Then, adopting pulse interleaving, a resource scheduling model for multiple micro-motion targets is established under the dual constraints of time and energy. Furthermore, to address the issues that the modeling struggles to provide analytical solutions and the low stability of the existing solution methods, an optimal scheduling solution method based on a genetic heuristic algorithm is proposed. The proposed method improves the scheduling success rate and the stability of the scheduling results. Furthermore, to tackle the issue that it is difficult to achieve focused imaging when the echoes of micro-motion targets are missing because of resource scheduling, a method based on the alternating direction method of multipliers is adopted to achieve range-instantaneous Doppler imaging. The high-resolution focused imaging of the micro-motion targets corresponding to the successfully scheduled imaging tasks is thus achieved.

Experimental results show that compared with the existing resource scheduling method based on a heuristic algorithm, the proposed method has greater stability and a higher success rate in resource scheduling and can achieve focused imaging of the micro-motion targets in a pulse interleaving situation.

Key words: cognitive inverse synthetic aperture radar; resource scheduling; micro-motion targets; genetic-heuristic algorithm; alternating direction method of multipliers (ADMM); range-instantaneous-Doppler imaging

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No. 62131020, No. 61971332, No. 61631019)

1 引言

由于具有全天时、全天候、远作用距离和高分辨率等独特优势,逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)在太空态势感知与弹道目标防御中发挥着重要作用^[1-4]。认知 ISAR 将认知雷达理论与 ISAR 成像技术相结合,利用目标与环境的离线先验知识及在线感知的目标与环境特性提升 ISAR 在复杂环境下对各种目标的成像能力^[5-7]。相比于传统机械扫描雷达,多输入多输出 ISAR 具有灵活的波束捷变能力,能够通过控制天线阵列中各阵元的相位实现波束在空间的快速扫描。但是由于其能量及时间资源有限,当多个雷达波束内存在多个空间微动目标时,其成像任务调度的成功率往往较低,从而限制了 ISAR 效能的充分利用。

目前,面向成像任务的认知 ISAR 资源调度方法主要针对刚体目标。典型方法包括:基于稀疏孔径的认知 ISAR 自适应资源调度^[8];基于时间和能量双重约束的脉冲交错资源调度^[9];基于博弈论的组网 ISAR 成像任务分配优化^[10]等。虽然现有方法能够取得较好的刚体目标成像资源调度结果,但是其约束条件及调度模型并

不适用于微动目标。此外,微动目标往往运动模型复杂,回波非平稳性很强,当方位存在缺损时很难得到其聚焦良好的高分辨 ISAR 像^[11]。因此,迫切需要针对微动目标的回波特性研究有效的资源调度和高分辨成像方法。

针对上述问题,本文提出基于遗传-启发算法的微动目标 ISAR 成像资源调度方法。该方法基于脉冲交错技术,通过引入调度成功率、实现价值率、威胁度执行率、时间利用率、归一化系统可利用能量等评价指标建立微动目标认知 ISAR 资源调度优化模型,进而采用遗传-启发算法求解最优调度任务序列和脉冲发射时刻序列,从而提高了成像任务的调度成功率和调度结果的稳定性。进一步针对方位回波缺损时微动目标无法聚焦成像的问题,提出基于交替方向乘子法(Alternating Direction Method of Multipliers, ADMM)^[12]的距离-瞬时多普勒(Range-Instantaneous-Doppler, RID)成像方法。实验结果表明,相比于启发式算法^[13],所提方法稳定性更好,调度成功率更高,并且能够获得聚焦良好的微动目标 ISAR 像。

2 微动目标认知 ISAR 资源调度建模

有效资源调度的前提是对目标特性的准确认知. 具体而言,需要根据微动目标的距离、高度、速度、航向等特性确定带宽、脉冲重复频率、成像积累时间等雷达资源需求度及综合优先级. 在此基础上,进一步根据雷达资源需求度、约束条件和评价指标建立微动目标资源调度模型.

2.1 资源需求度及综合优先级

在微动多目标认知 ISAR 成像资源调度中,假设场景中中共 K 个微动目标,则任务 k 为 ISAR 对第 k 个微动目标进行成像,其中 k 为目标序号. 为提高资源分配的合理性,在资源调度前首先通过发射少量脉冲对微动目标的特性进行在线认知. 对于微动目标 k ,其特性包括:距离 R_k 、高度 H_k 、速度 v_k 、航向 θ_k 、运动方式 $T_{y,k}$ 、径向尺寸 $S_{y,k}$ 、截面积 σ_k 、微多普勒带宽 $B_{mD,k}$ 、运动周期性 T_k 等. 在此基础上,结合环境先验信息计算各目标对雷达资源的需求度及综合优先级 p_k . 在需求度中,带宽 B_k 由成像所需的分辨率决定,发射脉冲的峰值功率 P_k 由探测距离、目标截面积及雷达系统参数决定. 其余需求度的计算方法如下.

(1) 脉冲重复频率 PRF_k 为避免多普勒模糊,成像任务 k 所需的脉冲重复频率应满足:

$$\text{PRF}_k \geq B_{mD,k} \quad (1)$$

为了确保每个脉冲的收发可在一个脉冲重复周期内完成, PRF_k 还应满足:

$$\text{PRF}_k \leq \frac{1}{t_{x,k} + t_{w,k} + t_{r,k}} \quad (2)$$

其中, $t_{x,k}$ 、 $t_{w,k}$ 和 $t_{r,k}$ 分别表示成像任务 k 的脉冲发射期、脉冲等待期和脉冲接收期^[14].

(2) 成像积累时间 ΔT_k . 为观测到目标 k 在完整周期内的回波,所需成像积累时间 ΔT_k 满足:

$$\Delta T_k \geq T_k \quad (3)$$

文中令 $\Delta T_k = T_k$.

(3) 方位回波数 M_k . 在微动目标 ISAR 成像资源调度时,为了提高调度时间利用率,将方位向连续观测转化为随机稀疏观测. 若任务 k 的方位稀疏度(即回波缺损率)为 D_k ,则所需方位回波数 M_k 满足:

$$M_k = (1 - D_k) N_{a,k} \quad (4)$$

其中, $N_{a,k} = \Delta T_k \text{PRF}_k$, 表示在成像积累时间 ΔT_k 内对目标 k 进行方位向连续观测时所需的回波数.

(4) 综合优先级 p_k . 任务 k 的综合优先级 p_k 由目标 k 的威胁度 $T_{h,k}$ 及任务 k 的截止期 d_k 共同决定. 其中 d_k 表示该任务的最晚可执行时间. 通常,目标威胁度高、截

止期早的成像任务综合优先级较高. 具体而言,任务 k 的综合优先级 p_k 可表示为

$$p_k = p_a \bar{T}_{h,k} + p_b \overline{1/d_k} \quad (5)$$

其中, p_a 和 p_b 为综合优先级系数, $p_a, p_b \geq 0$ 且 $p_a + p_b = 1$; $\bar{T}_{h,k}$ 和 $\overline{1/d_k}$ 分别表示归一化的威胁度和截止期,即 $\bar{T}_{h,k} = T_{h,k} / \max\{T_{h,k}\}$, $\overline{1/d_k} = \min\{d_k\} / d_k$. 下面分别介绍 $T_{h,k}$ 和 d_k 的计算方法.

(a) 目标威胁度 $T_{h,k}$. 对于目标 k , 建立其威胁度模型如下:

$$T_k = \{R_k, H_k, v_k, \theta_k, T_{y,k}\} \quad (6)$$

其中, θ_k 为目标 k 航向; $T_{y,k}$ 为目标 k 的自旋、进动、章动等运动方式, 本文将其威胁等级量化为 $\{2, 3, 1\}$. 上述指标中, R_k 和 H_k 为成本型指标, 即值越小, 威胁程度越高; v_k 和 $T_{y,k}$ 为效益型指标, 即 v_k 及 $T_{y,k}$ 的量化值越大, 其威胁程度越高; θ_k 为固定型指标, 当取值为 0 时, 目标径直飞向雷达, 其威胁程度最高. 对威胁度 T_k 各项指标进行规范化处理, 则目标 k 的威胁度 $T_{h,k}$ 可表示为

$$T_{h,k} = \sum_{j=1}^5 t_{h,j} \bar{T}_{k,j} \quad (7)$$

其中, $\bar{T}_{k,j}$ 为 T_k 中第 j 个指标的规范化结果, $t_{h,j}$ 为其威胁度系数, 满足 $t_{h,j} \geq 0$, $\sum_{j=1}^5 t_{h,j} = 1$.

(b) 成像任务截止期 d_k . 成像任务 k 的期望执行时刻和时间窗分别为 $t_{d,k}$ 和 W_k , 则 d_k 为

$$d_k = t_{d,k} + W_k \quad (8)$$

2.2 资源调度约束条件

认知 ISAR 的资源分配与调度需在时间及能量双重约束下进行. 其中, 时间约束是指在脉冲交错基础上对各任务脉冲收发时刻的要求^[15]; 能量约束是指对雷达系统瞬时能量消耗的要求. 由于受时间窗的约束, 微动目标成像任务 k 的实际执行时刻 $t_{e,k}(1)$ 需满足:

$$t_{d,k} \leq t_{e,k}(1) \leq t_{d,k} + W_k \quad (9)$$

令资源调度的起始时刻和时间长度分别为 t_0 和 T , 则对应的时间区间为 $[t_0, t_0 + T]$. 同时为满足成像积累时间的要求, 任务 k 的实际执行时刻 $t_{e,k}(1)$ 还需满足^[16]:

$$t_0 \leq t_{e,k}(1), t_{e,k}(1) + \Delta T_k \leq t_0 + T \quad (10)$$

因此, 任务 k 的实际执行时刻 $t_{e,k}(1)$ 需满足:

$$\begin{aligned} \max(t_0, t_{d,k}) &\leq t_{e,k}(1) \\ &\leq \min(t_{d,k} + W_k, t_0 + T - \Delta T_k) \end{aligned} \quad (11)$$

任务 k 所占用的时间区间可表示为

$$D_k = \bigcup_{i=1,2,\dots,M_k} \left[\left[t_{e,k}(i), t_{e,k}(i) + t_{x,k} \right] \cup \left[t_{e,k}(i) + t_{x,k} + t_{w,k}, t_{e,k}(i) + t_{x,k} + t_{w,k} + t_{r,k} \right] \right] \quad (12)$$

其中, \cup 表示取并集, $t_{e,k}(i)$ 为任务 k 第 i 个脉冲的发射时刻, 且 $t_{e,k}(i) = t_{e,k}(1) + l_i^k / \text{PRF}_k$. 若以 PRF_k 对成像积累时间 ΔT_k 进行采样, 则 $l_i^k \in \mathbb{Z}$ 表示 $t_{e,k}(i)$ 对应的采样序号并满足 $l_i^k \in [1, N_{a,k}]$. 由于 ISAR 在同一时刻只能对一个目标执行脉冲发射或接收, 因此不同成像任务所占用的时间区间应无交集^[14], 即

$$D_{k_1} \cap D_{k_2} = \emptyset \quad (13)$$

其中, k_1 和 k_2 分别为任意两个不同的成像任务, \emptyset 表示空集.

实际中, ISAR 系统无法长时间连续发射脉冲, 因此需要在资源分配时充分考虑雷达系统的能量约束. 设置系统能量阈值为 E_{\max} , 当系统的瞬时能量消耗达到 E_{\max} 时, 需要停止发射脉冲, 使系统能量冷却至正常值^[15]. 在 t 时刻, 雷达系统的瞬时能量消耗^[17] 可表示为

$$E(t) = \int_0^t P_w(x) \exp[(x-t)/\tau] dx \quad (14)$$

其中, $P_w(x)$ 为系统在 x 时刻的功率参数, τ 为回退参数. 则在微动多目标认知 ISAR 成像资源调度中, 其能量约束即为在整个资源调度所占用的时间区间内, 系统瞬时能量消耗 $E(t)$ 不超过系统能量阈值 E_{\max} ^[18], 即

$$E(t) \leq E_{\max} \quad (15)$$

2.3 资源调度模型

根据上述分析, 定义微动多目标认知 ISAR 成像资源调度的性能评价指标如下.

(1) 调度成功率 (Scheduling Success Ratio, SSR): 即成功调度成像任务的总数与请求调度成像任务的总数之比, 其表达式为

$$\text{SSR} = \frac{N_{K_{\text{ims}}}}{K} \quad (16)$$

其中, K_{ims} 为成功调度成像任务的集合, $N_{K_{\text{ims}}}$ 为成功调度成像任务的总数, K 为请求调度成像任务的总数.

(2) 实现价值率 (Hit Value Ratio, HVR): 即成功调度成像任务的优先级之和与请求调度成像任务的优先级之和之比, 其表达式为

$$\text{HVR} = \frac{\sum_{k \in K_{\text{ims}}} p_k}{\sum_{k=1}^K p_k} \quad (17)$$

(3) 威胁度执行率 (Threat Execution Ratio, TER): 即成功调度成像任务对应目标的威胁度之和与请求调度成像任务对应目标的威胁度之和之比, 其表达式为

$$\text{TER} = \frac{\sum_{k \in K_{\text{ims}}} T_{h,k}}{\sum_{k=1}^K T_{h,k}} \quad (18)$$

(4) 时间利用率 (Time Utilization Ratio, TUR): 即成

图调度成像任务所占用时间区间的长度之和与整个雷达资源调度所占用时间区间的长度之比, 其表达式为

$$\text{TUR} = \frac{\sum_{k \in K_{\text{ims}}} (t_{x,k} + t_{r,k}) M_k}{T} \quad (19)$$

(5) 归一化系统可利用能量 (Normalized Available Energy, NAE): 即系统能量阈值 E_{\max} 与成功调度成像任务对应系统能量消耗峰值 $\max(E(t))$ 之差的归一化值, 其表达式为

$$\text{NAE} = \frac{E_{\max} - \max(E(t))}{E_{\max}} \quad (20)$$

其中, $E_{\max} - \max(E(t))$ 为系统可利用能量. 该约束目的是通过降低成功调度成像任务的瞬时能量消耗峰值增加系统可利用能量. 在该约束下, 算法可有效调节任务时间内发射脉冲的分布, 从而提高后续任务的调度成功率.

针对上述五个性能指标, 本文基于脉冲交错技术^[8], 在时间及能量的双重约束下构建微动多目标认知 ISAR 成像资源调度模型如下:

$$\begin{aligned} & \max(F) \\ & \text{s.t. } \forall k, k_1, k_2 \in K_{\text{ims}}, k_1 \neq k_2 \\ & \max(t_0, t_{d,k}) \leq t_{e,k} \\ & \leq \min(t_{d,k} + W_k, t_0 + T - \Delta T_k) \quad \textcircled{1} \\ & D_{k_1} \cap D_{k_2} = \emptyset \quad \textcircled{2} \\ & E(t) \leq E_{\max}, t \in [t_0, t_0 + T] \quad \textcircled{3} \end{aligned} \quad (21)$$

其中, F 表示资源调度的综合评价价值, 且

$$F = F_1 \cdot \text{SSR} + F_2 \cdot \text{HVR} + F_3 \cdot \text{TER} + F_4 \cdot \text{TUR} + F_5 \cdot \text{NAE} \quad (22)$$

其中, F_1, F_2, F_3, F_4 和 F_5 为综合评价系数, $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 \geq 0$ 且 $F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 = 1$.

3 基于遗传-启发算法的资源调度

由式(21)可知, 微动多目标认知 ISAR 成像资源调度为非线性整数规划问题, 较难找到解析解且数值方法求解困难. 文献[13]采用启发式算法对调度模型进行求解, 但由于调度模型在满足方位回波数条件下对成像任务的脉冲进行随机抽取, 因此对同一成像任务的调度序列, 启发式算法所得调度结果稳定性不高. 作为一种经典的复杂优化问题求解框架, 遗传算法具有较强的鲁棒性, 并且在组合优化、机器学习等领域获得了广泛应用^[19,20]. 本文充分利用启发式算法的高效及遗传算法的稳健特性, 提出基于遗传-启发算法的微动多目标认知 ISAR 成像资源调度方法. 该方法将微动多目标成像任务调度序列(简称调度序列)作为遗传算法的种群个体, 采用启发式算法以个体为顺序进行资源

调度,并计算相应综合评价值和适应度.在此基础上,对个体进行基因编码,并通过基因选择、交叉、变异及循环迭代获得最优调度序列及对应雷达资源调度结果.其中,基于启发式算法的个体 ISAR 资源调度方法包含以下步骤:

Step1:对于调度序列 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_K\}$,令初始任务序号 $k=1$,成功调度成像任务的集合 $K_{\text{ims}} = \emptyset$,成功调度成像任务所对应的脉冲发射时刻集合 $T = \emptyset$;

Step2:令任务 A_k 的实际执行时刻为其期望执行时刻,即 $t_{e_{A_k}}(1) = t_{d_{A_k}}$;

Step3:判断任务 A_k 实际执行时刻 $t_{e_{A_k}}(1)$ 是否满足约束条件①,若是,则执行 Step4;否则,执行 Step9;

Step4:计算任务 A_k 在连续观测下首尾脉冲所占用的时间区间,判断该区间是否满足约束条件②,若是,则执行 Step5;否则,执行 Step6;

Step5:依次计算并保留任务 A_k 在成像积累时间内满足约束条件②的脉冲,将所得脉冲发射时刻组成集合 L_{A_k} ,判断 L_{A_k} 的元素个数 $N_{L_{A_k}}$ 是否满足 $N_{L_{A_k}} \geq M_{A_k} - 2$,若是,则执行 Step7;否则,执行 Step6;

Step6:令 $t_{e_{A_k}}(1) = t_{e_{A_k}}(1) + dT$,其中 dT 表示时间后延步长,返回 Step3;

Step7:在式(20)约束下从 L_{A_k} 中随机选择得到其中的 $M_{A_k} - 2$ 个元素并排列组成任务 A_k 的脉冲发射时刻序列 T_{A_k} ,进而构建当前脉冲发射时刻集合 $T' = T \cup T_{A_k}$,根据式(14)计算 T' 对应最大瞬时能量消耗值 $E_{m,k}$;

Step8:判断 $E_{m,k}$ 是否满足约束条件③,若是,则任务 A_k 调度成功,更新成功调度成像任务的集合 $K_{\text{ims}} = K_{\text{ims}} \cup A_k$ 及成功调度成像任务所对应的脉冲发射时刻集合 $T = T \cup T_{A_k}$;否则,任务 A_k 调度失败,令 $k = k + 1$,并执行 Step2;

Step9:判断 $k = K$ 是否成立,若是,则根据式(22)计算雷达资源调度的综合评价值 F ,输出雷达资源调度结果,包括成功调度成像任务的集合 K_{ims} 以及对应综合评价值 F ;否则,令 $k = k + 1$,并执行 Step2.

结合上述基于启发式算法的个体 ISAR 资源调度方法,基于遗传-启发算法的微动多目标认知 ISAR 资源调度方法步骤如下:

Step1:令初始进化代数 $e=0$,设置遗传算法迭代终止数为 e_{max} ,对微动多目标成像任务序列 $\{1, 2, \dots, K\}$ 进行随机排列,生成 N 个不同的调度序列,将得到的调度序列作为种群个体,获得初始种群;

Step2:通过启发式算法对每个个体进行雷达资源调度,得到其相应的雷达资源调度结果,包括成功调度成像任务的集合 $K_{\text{ims},n}$ 及对应的脉冲发射时刻集合 T_n 和综合评价值 F_n ,然后分别更新个体综合评价值和调

度序列库,最后计算每个个体的适应度;

Step3:对每个个体进行基因编码,得到相应的基因序列;

Step4:对当代种群进行基因选择,保留适应度最高的两个基因序列;

Step5:对当代种群进行基因交叉;

Step6:将选择和交叉后的基因序列解码为调度序列,依照 Step2 中的方法,通过启发式算法对每个解码后个体进行雷达资源调度,得到其相应的雷达资源调度结果,然后分别更新个体综合评价值和调度序列库;

Step7:对当代种群进行基因变异;

Step8:将变异后的基因序列解码为调度序列,完成当代进化;

Step9:判断当前进化代数 $e = e_{\text{max}} - 1$ 是否成立,若是,则依照 Step2 中的方法,通过启发式算法对基因解码后当代种群的每个个体进行雷达资源调度,得到其相应的雷达资源调度结果,然后更新调度序列库,最后输出调度序列库中综合评价值最高的个体与对应的成功调度成像任务的集合以及成功调度成像任务所对应的脉冲发射时刻集合;否则,令 $e = e + 1$,并执行 Step2.

在获得微动目标 ISAR 成像资源调度结果后,微动目标的回波通常存在随机缺损,从而导致基于时频分析的传统 RID 方法失效.针对该问题,本文提出基于 ADMM^[12] 的微动目标认知 ISAR 高分辨成像方法.该方法将缺损回波的时频分析问题建模为稀疏重构问题,进而根据资源调度结果构造观测字典并采用交替方向乘子法求解稀疏时频向量,最终获得各目标聚焦良好的 RID 图像.

综上所述,基于遗传-启发算法的微动目标认知 ISAR 成像资源调度实现框架如图 1 所示.

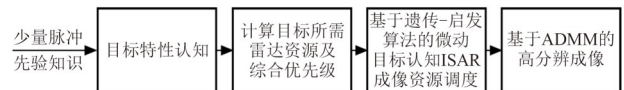


图 1 基于遗传-启发算法的微动目标认知 ISAR 成像资源调度

4 仿真实验与分析

由于难以获得认知 ISAR 的实测数据,本节将采用仿真实验证明所提方法的有效性.根据现有文献^[21,22] 及实际微动目标 ISAR 成像特性,令观测场景中包含 9 个微动目标(3 个自旋目标、3 个进动目标及 3 个章动目标),目标参数如表 1 所示.认知 ISAR 均发射线性调频波形,对应参数如表 2 所示.

此外,令雷达资源调度起始时刻为 0,调度时间为 1.3 s,各个成像任务的时间窗均为 0.1 s,期望执行时刻后移步长为 0.1 ms,雷达能量阈值为 20 J,回退参数 τ 为 200 ms.目标威胁度系数分别为 0.225, 0.225, 0.2,

表 1 目标参数表

目标编号	距离/km	速度/(m·s ⁻¹)	航向/(°)	底面半径/m	高/m	径向尺寸/m	自旋频率/Hz	锥旋频率/Hz	章动频率/Hz
目标 1	298	4 000	26.48	0.25	1.60	1.53	1.30	-	-
目标 2	209	3 500	16.20	0.30	1.60	1.60	2.00	-	-
目标 3	250	3 900	20.63	0.50	2.00	2.04	1.65	-	-
目标 4	270	3 400	12.88	0.25	0.75	0.77	2.50	1.10	-
目标 5	230	3 000	18.15	0.30	1.50	1.50	2.20	1.40	-
目标 6	230	3 200	24.61	0.25	1.50	1.46	2.30	1.45	-
目标 7	250	3 800	12.83	0.30	1.60	1.59	2.80	1.50	1.35
目标 8	250	3 100	15.85	0.25	0.75	0.78	3.00	1.30	1.65
目标 9	270	3 600	26.18	0.30	1.50	1.47	2.60	1.60	1.40

表 2 发射波形参数表

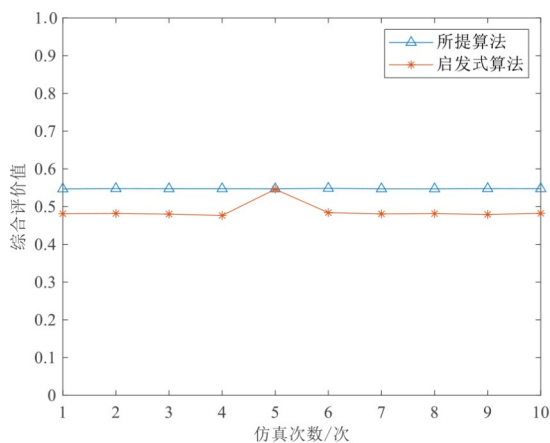
波形编号	带宽/GHz	脉冲重复频率/Hz	脉冲宽度/ μ s	积累时间/s	功率/kW	方位稀疏度	期望执行时刻/s
波形 1	1.97	500	10	0.77	6.310	0.5	0.15
波形 2	1.87	700	10	0.50	10.060	0.5	0.41
波形 3	1.47	600	10	0.61	7.470	0.5	0.55
波形 4	3.88	550	10	0.91	7.930	0.5	0.22
波形 5	2.00	650	10	0.71	6.040	0.5	0.36
波形 6	2.06	650	10	0.69	9.320	0.5	0.01
波形 7	1.88	600	10	0.74	7.145	0.5	0.70
波形 8	3.87	600	10	0.77	8.785	0.5	0.60
波形 9	2.04	550	10	0.71	6.895	0.5	0.50

0.15 及 0.2; 综合优先级系数分别为 0.8 和 0.2; 综合评价系数分别为 0.3, 0.25, 0.2, 0.15 及 0.1. 在遗传算法中, 适应度的最大和最小值分别为 0.95 和 0.1, 变异概率的最大和最小值分别为 0.4 和 0.01. 同时, 种群大小为 40, 迭代次数为 20.

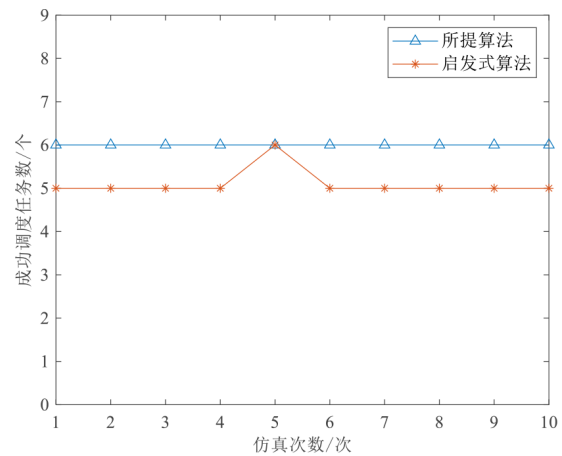
按照上述参数, 分别采用启发式算法和所提算法进行 10 次重复实验, 对应综合评价价值和调度成功数分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 其中红线和蓝线分别对应启发式算法和所提算法. 由于启发式算法仅按调度效益

的顺序对微动目标进行雷达资源调度, 且随机构建脉冲发射时刻序列, 因此调度结果不稳定. 而所提算法则通过采用遗传算法和更新调度库实现有效的脉冲选择. 对比两图可以看出, 所提方法对应调度结果及相应综合评价价值更为稳定, 并且调度成功率高于启发式算法.

以第 1 次资源调度结果为例, 图 3 分别给出所提算法(蓝线)与启发式算法(红线)对应调度结果的瞬时能量消耗图. 可以看出, 所提算法各时刻能量消耗均高于启发式算法, 表明其有效提高了系统能量利用率.



(a) 综合评价价值



(b) 调度成功数

图 2 两种调度算法 10 次实验对比结果

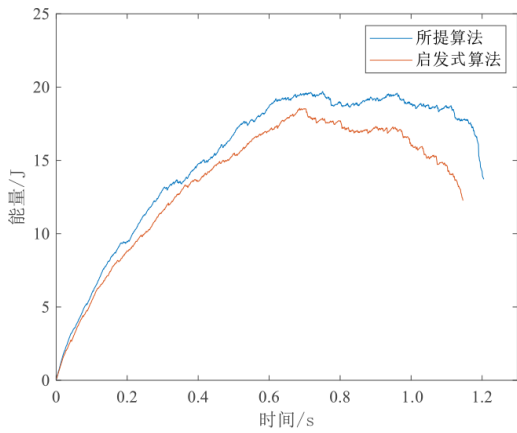


图3 能量消耗结果

基于第1次实验的资源调度结果,对成功调度的目标1,3,4,5,6,9按照所获得的脉冲发射时刻集合进行成像观测.图4为6个目标回波距离脉压后结果,由于脉冲交错,因此方位向存在缺损.基于短时傅里叶变换获得的目标RID像如图5所示,可见多普勒维存在严重散焦.采用ADMM方法获得的目标RID像如图6所示.可以看出,各目标图像轮廓清晰,背景干净,散射点聚焦良好.两种方法所得图像的图片熵如表3所示,比较可知,ADMM方法对应的图像熵更小,从而验证了所提算法的有效性.

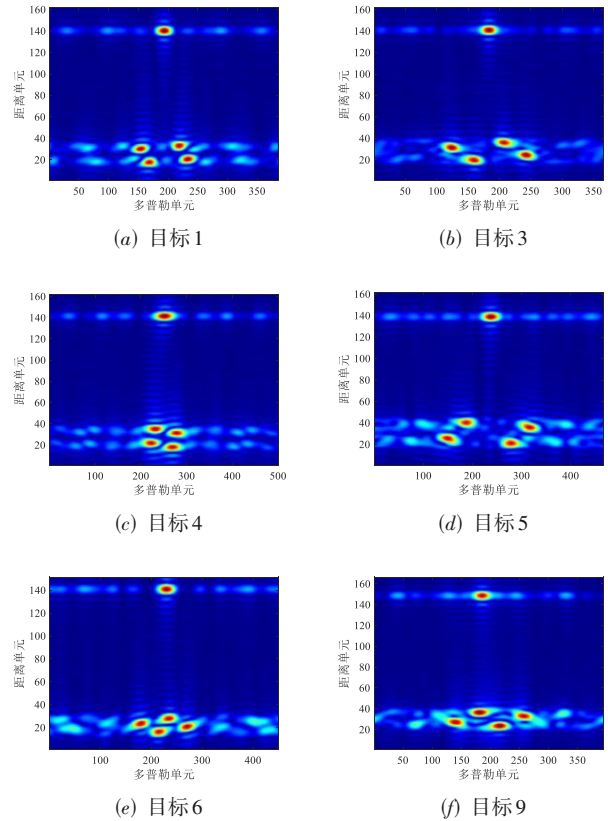


图5 6个目标基于短时傅里叶变换的RID像

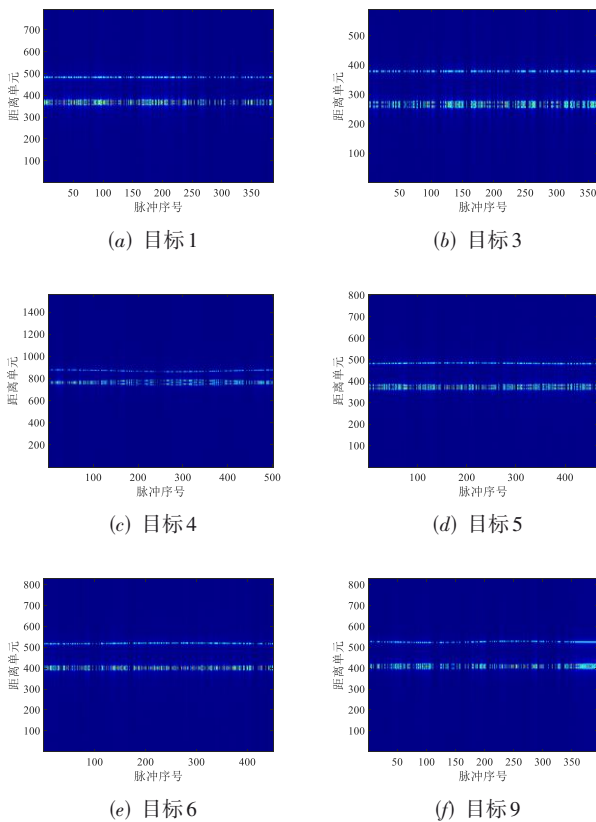


图4 6个目标缺损回波

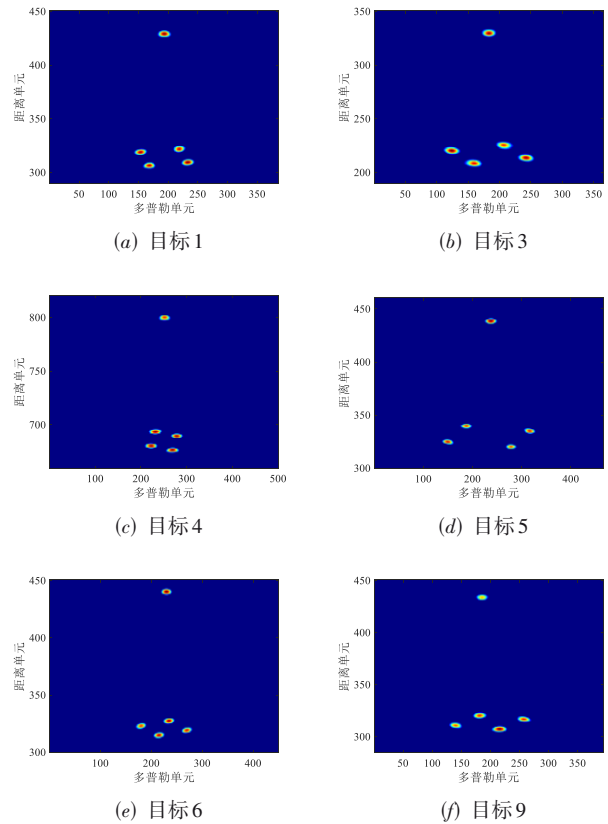


图6 6个目标基于ADMM的RID像

表3 两种成像方法所得图像熵对比

目标编号	基于短时傅里叶变换的成像方法	基于ADMM的成像方法
目标1	5.252 6	2.056 6
目标3	4.870 1	2.877 9
目标4	5.201 6	1.593 8
目标5	4.921 8	2.246 5
目标6	4.876 8	1.672 8
目标9	5.028 9	2.249 7

5 结论

本文基于脉冲交错技术,根据时间和能量约束构建了适用于微动目标的认知ISAR成像资源调度模型.针对该模型难以获得解析解且现有求解方法稳定性不高等问题,提出基于遗传-启发算法的微动目标认知ISAR成像资源调度方法,进而提出基于ADMM的微动目标稀疏回波RID成像方法.最后,仿真实验验证了所提方法的有效性.未来将进一步深入研究基于认知ISAR的微动多目标成像资源调度、高分辨成像及识别一体化方法.

参考文献

- [1] BAI X R, WANG G, LIU S Q, et al. High-resolution radar imaging in low SNR environments based on expectation propagation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(2): 1275-1284.
- [2] KANG L, LUO Y, ZHANG Q, et al. 3-D scattering image sparse reconstruction via radar network[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1275-1284.
- [3] 杨虹, 张雅声, 徐灿. 基于trace特征的ISAR像空间目标识别[J]. *电子学报*, 2020, 48(3): 431-441.
YANG H, ZHANG Y S, XU C. Space target recognition based on trace feature of ISAR image[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2020, 48(3): 431-441. (in Chinese)
- [4] 李东, 赵婷, 宋伟, 等. 一种低信噪比下稳健的ISAR平动补偿方法[J]. *电子学报*, 2018, 46(9): 2049-2056.
LI D, ZHAO T, SONG W, et al. A robust translational motion compensation method for ISAR imaging under low SNR environment[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(9): 2049-2056. (in Chinese)
- [5] HAYKIN S, XUE Y B, DAVIDSON T N. Optimal waveform design for cognitive radar[C]//2008 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove: IEEE, 2008: 3-7.
- [6] CHARLISH A, HOFFMANN F, DEGEN C, et al. The development from adaptive to cognitive radar resource management[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2020, 35(6): 8-19.
- [7] GIUSTI E, SAVERINO A L, MARTORELLA M, et al. A rule-based cognitive radar design for target detection and imaging[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2020, 35(6): 34-44.
- [8] 陈怡君, 张群, 罗迎, 等. 基于稀疏孔径ISAR成像的雷达资源自适应调度算法[J]. *弹箭与制导学报*, 2013, 33(4): 171-176.
CHEN Y J, ZHANG Q, LUO Y, et al. Adaptive scheduling algorithm for radar based on sparse aperture ISAR imaging[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2013, 33(4): 171-176. (in Chinese)
- [9] 孟迪, 张群, 罗迎, 等. 基于脉冲交错的ISAR成像雷达资源自适应调度算法[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2017, 18(2): 25-31.
MENG D, ZHANG Q, LUO Y, et al. An adaptive scheduling algorithm for ISAR imaging radar based on pulse interleaving[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2017, 18(2): 25-31. (in Chinese)
- [10] LIU X W, ZHANG Q, LUO Y, et al. ISAR imaging task allocation for multi-target in radar network based on potential game[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(23): 11192-11204.
- [11] BAI X R, ZHOU F, BAO Z. High-resolution three-dimensional imaging of space targets in micromotion[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(7): 3428-3440.
- [12] BAI X R, ZHOU F, HUI Y. Obtaining JTF-signature of space-debris from incomplete and phase-corrupted data[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(3): 1169-1180.
- [13] CHEN Y J, ZHANG Q, YUAN N, et al. An adaptive ISAR-imaging-considered task scheduling algorithm for multi-function phased array radars[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(19): 5096-5110.
- [14] 王隼. 认知ISAR关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
WANG Y. Study on Key Technologies of Cognitive ISAR[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [15] 陈鑫康. 认知ISAR波形设计与高分辨成像及资源调度方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
CHEN X K. Study on Waveform Design, High-Resolu-

tion Imaging, and Resources Scheduling for Cognitive ISAR[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)

- [16] 万铮, 孟庆鹏. 含时间窗的资源调度算法性能分析[J]. 雷达与对抗, 2018, 38(4): 7-10, 33.
WAN Z, MENG Q P. Performance analysis of resource scheduling algorithm with time window[J]. Radar & ECM, 2018, 38(4): 7-10, 33. (in Chinese)
- [17] SHIH C S, GOPALAKRISHNAN S, GANTI P, et al. Template-based real-time dwell scheduling with energy constraint[C]//Proceedings of the 9th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2003. Toronto: IEEE, 2003: 19-27.
- [18] 张浩为, 谢军伟, 胡祺勇, 等. 数字阵列雷达在线交错调度算法[J]. 电子学报, 2019, 47(6): 1260-1266.
ZHANG H W, XIE J W, HU Q Y, et al. Online interleaving task scheduling for digital array radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(6): 1260-1266. (in Chinese)
- [19] NING Y, BAI X R, ZHOU F, et al. Method for inverse synthetic aperture radar imaging of space debris using improved genetic algorithm[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2017, 11(5): 812-821.
- [20] 祁浩凡. 逆合成孔径雷达多目标高分辨成像方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
QI H F. Study on High-Resolution Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging of Multiple Targets[D]. Xi'an: Xidian University, 2021. (in Chinese)
- [21] 薛高茹, 梁彦, 谯平, 等. 基于EM的主动段弹道导弹跟踪算法研究[J]. 电子学报, 2017, 45(7): 1770-1774.
XUE G R, LIANG Y, QIAO P, et al. Research on boost-phase ballistic missile tracking algorithm using EM[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(7): 1770-1774. (in Chinese)
- [22] ZHANG F, TIAN K S, XI M L. The ballistic missile tracking method using dynamic model[C]//Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar. Proceedings: IEEE, 2011: 789-794.

作者简介



王 樾 男, 1995年4月出生, 山东烟台人. 现为西安电子科技大学电子工程学院博士研究生. 主要研究方向为高分辨雷达成像.
E-mail: wy_xidian95@163.com



黄 璐 女, 1987年出生, 河南舞阳人. 现为北京跟踪与通信技术研究所助理研究员, 专业为电子科学与技术, 发表学术论文10余篇. 主要研究方向为雷达工程和雷达信号处理.
E-mail: luhuang0087@163.com



白雪茹(通讯作者) 女, 1984年10月出生, 陕西西安人. 现为西安电子科技大学电子工程学院教授, 博士生导师. 主要研究方向为新体制雷达成像、基于高分辨图像的目标特征提取与识别等.
E-mail: xrbai@xidian.edu.cn