

## 基于认知 ISAR 成像的相控阵雷达资源自适应调度算法

陈怡君<sup>\*①</sup> 罗迎<sup>①</sup> 张群<sup>①②</sup> 李开明<sup>①</sup> 孙凤莲<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

<sup>②</sup>(复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室 上海 200433)

<sup>③</sup>(中国人民解放军 93303 部队 沈阳 110015)

**摘要:** 现有相控阵雷达资源调度策略通常没有考虑成像任务的要求, 需要分出一部分固定资源实现成像功能。该文将认知成像的思想引入到雷达资源自适应调度中, 提出一种基于稀疏孔径认知 ISAR 成像的雷达资源自适应调度算法, 并给出了具体的性能评估指标。在对目标特征进行认知的基础上, 根据反馈信息对雷达的时间资源进行自适应调度, 能够在对不同目标进行跟踪和搜索的同时实现认知成像, 从而显著提高了雷达的工作效率。仿真实验验证了该算法的有效性。

**关键词:** 相控阵雷达; 压缩感知; 认知ISAR成像; 资源调度

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)07-1566-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00822

## Adaptive Scheduling Algorithm for Phased Array Radar Based on Cognitive ISAR Imaging

Chen Yi-jun<sup>①</sup> Luo Ying<sup>①</sup> Zhang Qun<sup>①②</sup> Li Kai-ming<sup>①</sup> Sun Feng-lian<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

<sup>②</sup>(Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves, Ministry of Education, Fudan University, Shanghai 200433, China)

<sup>③</sup>(Unit 93303 of PLA, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** The mission of imaging is usually not considered in existing resource scheduling strategies of phased array radar, and it is required to separate a fixed part of resources for target imaging. In this paper, the concept of cognitive imaging is introduced to the radar resource scheduling strategy, and then a novel adaptive scheduling algorithm is proposed based on sparse-aperture cognitive Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) imaging. The corresponding performance evaluation indicators of the proposed algorithm are also given. Based on the cognition of targets' characteristics, the time resource of radar can be allocated adaptively according to the feedback information, and then the cognitive imaging of targets is achieved simultaneously during implementing tracking and searching tasks. As a result, the efficiency of the radar is improved significantly. Simulation results validate the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** Phased array radar; Compressed Sensing (CS); Cognitive ISAR imaging; Resource scheduling

### 1 引言

合理有效的资源调度算法是充分发挥多功能相控阵雷达高度自适应潜力的基础<sup>[1]</sup>。目前相控阵雷达资源调度算法主要分为模板法和自适应调度法<sup>[2]</sup>, 其中自适应调度法能够根据工作环境和任务需求灵活地调整资源调度策略, 获得了广泛关注。文献[3]

在维持目标期望跟踪状态的前提下, 实现了对雷达工作模式和波形的有效调度; 文献[4]给出了雷达任务二次规划模型的一种最优解解析求解算法, 提高了高优先级任务的调度成功率; 文献[5]基于时间窗的思想, 有效减小了延迟敏感任务的时间偏移及目标丢失概率。但这些算法大都没有考虑成像要求对调度策略的影响。

现有多功能雷达在执行目标搜索和跟踪的同时, 需要分出一部分固定资源来实现成像功能, 导致雷达工作效率不高。因此, 将认知成像技术<sup>[6,7]</sup>引入到资源调度算法中, 在跟踪和搜索的同时实现成

2013-06-07 收到, 2014-01-26 改回

国家自然科学基金(61201369, 61172169), 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室 2011 年度开放基金项目(21102)资助课题

\*通信作者: 陈怡君 cheniyijun519@126.com

像, 可以提高雷达工作效率。在这种工作模式下, 单个目标的回波信号在时域必然是稀疏的, 需要对方位向稀疏孔径下的 ISAR 成像展开研究。压缩感知(Compressed Sensing, CS)理论是一个全新的充分利用信号稀疏性或可压缩性的信号获取和重构理论<sup>[8-10]</sup>。文献[11]实现了基于 CS 的 2 维稀疏采样 ISAR 成像。

本文将成像要求考虑到雷达资源调度策略中, 提出一种基于稀疏孔径认知 ISAR 成像的雷达资源自适应调度算法, 显著提高雷达的工作效率。

## 2 基于压缩感知的稀疏孔径 ISAR 成像

ISAR 成像时, 目标回波的大部分能量仅由少数散射中心贡献, 回波信号具有稀疏性, 因此, 可以基于 CS 实现稀疏孔径 ISAR 成像。设目标为散射点模型, 雷达发射线性调频信号, 方位向相干积累时间  $T_c$ , 则雷达共发射  $N = \text{PRF} \cdot T_c$  个脉冲(PRF 为脉冲重复频率), 全孔径回波信号为  $s_q(t, \tau_m), m = 1, 2, \dots, N$ , 其中  $t$  为快时间,  $\tau_m$  为慢时间采样序列。若雷达仅对目标发射  $M (M < N)$  个子脉冲, 则稀疏孔径信号为  $s_r(t, \tau_{m'})$ ,  $m' = 1, 2, \dots, M$ 。

在 CS 理论框架下, 选择傅里叶变换矩阵为稀疏矩阵  $\Psi$ , 并根据子孔径的分布情况, 设计一个  $M \times N$  维的随机部分单位矩阵作为观测矩阵  $\Phi$ <sup>[7]</sup>, 满足

$$\phi_{m', m} = \begin{cases} 1, & \{(m', m) | \tau_{m'} = \tau_m\} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

容易证明<sup>[7]</sup>, 观测矩阵与稀疏矩阵不相关, 因此可以通过最优化算法重构方位向信息<sup>[12]</sup>

$$\begin{aligned} \Theta &= \min \|\Psi \Phi^H S_r(f, \tau_{m'})\|_1, \\ \text{s.t. } S_r(f, \tau_{m'}) &= \Phi X = \Phi \Psi^H \Theta \end{aligned} \quad (2)$$

对每一距离单元按上述方法进行方位向成像, 并排成一个矩阵, 即可得到目标 2 维 ISAR 像。

## 3 雷达资源自适应调度算法

### 3.1 传统相控阵雷达自适应调度算法

设调度时间间隔为  $T$ , 调度间隔  $[t_0, t_0 + T]$  内有  $N$  个任务请求组成集合  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ , 第  $k$  个任务请求的期望执行时刻为  $t_{dk}$ , 实际执行时刻为  $t_{ek}$ , 执行时间长度为  $\Delta T_k$ , 时间窗为  $W_k$ , 优先级为  $P_k$ 。则调度算法优化模型为<sup>[13]</sup>

$$\left. \begin{aligned} & \max \left\{ \sum_{k=1}^N P_k \cdot U(t_0 + T - t_{ek} - \Delta T_k) \right\} \\ & \text{s.t. } \max(t_0, t_{dk} - W_k) \leq t_{ek} \\ & \quad \leq \min(t_{dk} + W_k, t_0 + T - \Delta T_k) \\ & \quad \min(t_{ej} - t_{ek}) \geq \Delta T_k, \quad j \in \{j | t_{ej} > t_{ek}\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中

$$U(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

### 3.2 基于稀疏孔径认知成像的雷达资源自适应调度算法

上述雷达资源自适应调度算法并没有考虑成像功能, 实际上, 当参加调度的任务请求个数不多时, 会有少量时间处于空闲状态, 可以将这些空闲时间分配给成像任务进行目标稀疏观测, 再利用基于 CS 的稀疏孔径 ISAR 成像算法获得目标 2 维 ISAR 像。

本文将认知成像引入到雷达资源自适应调度策略中, 通过发送少量脉冲对目标特征进行认知, 根据反馈信息计算各目标对资源的需求, 在此基础上对雷达时间资源进行合理分配, 在跟踪和搜索的同时实现目标成像, 从而显著提高雷达的工作效率。

**3.2.1 目标特征认知** 假设每一个成像任务仅对一个目标进行成像, 且目标做平稳运动。首先对目标发射少量脉冲进行回波信号分析, 使用传统算法估计各目标距离  $\hat{R}_k$ , 速度  $\hat{V}_k$  和航向  $\hat{\theta}_k$ , 而目标尺寸  $\hat{S}_k$ , 方位向稀疏度  $\hat{K}_k$ , 所需方位向相干积累时间  $T_{c,k}$ , 方位向观测维度  $M'_k$  和优先级  $P_k$  的计算方法如下:

(1) 目标尺寸的估计: 根据少量脉冲回波信号可得到第  $k$  个成像目标的粗分辨 ISAR 像  $s_{pk}(f, f_{\tau m})$ , 对  $s_{pk}(f, f_{\tau m})$  作归一化处理:

$$s'_{pk}(f, f_{\tau m}) = \frac{|s_{pk}(f, f_{\tau m})| - \min_{f, f_{\tau m}} |s_{pk}(f, f_{\tau m})|}{\max_{f, f_{\tau m}} |s_{pk}(f, f_{\tau m})| - \min_{f, f_{\tau m}} |s_{pk}(f, f_{\tau m})|} \quad (5)$$

设置一个合适的阈值  $T_s$ , 记  $f_s = \min_f \{f | s'_{pk}(f, f_{\tau m}) > T_s\}$ ,  $f_b = \max_f \{f | s'_{pk}(f, f_{\tau m}) > T_s\}$ , 则第  $k$  个目标的距离向尺寸  $\hat{S}_{ky} = (c/(2\mu))(f_b - f_s) = (f_b - f_s)T_p \rho_r$ , 其中  $\rho_r$  为距离向分辨率。同理, 记  $f_{s\tau} = \min_{f_{\tau m}} \{f_{\tau m} | s'_{pk}(f, f_{\tau m}) > T_s\}$ ,  $f_{b\tau} = \max_{f_{\tau m}} \{f_{\tau m} | s'_{pk}(f, f_{\tau m}) > T_s\}$ , 可得第  $k$  个目标的方位向尺寸  $\hat{S}_{kx} = (f_{b\tau} - f_{s\tau})T_c \rho_c$ , 其中  $\rho_c$  为方位向分辨率,  $\rho_c = \frac{\lambda \hat{R}_k}{2\hat{V}_k \cos \hat{\theta}_k}$ 。第  $k$  个目标的估计尺寸为  $\hat{S}_k = \hat{S}_{kx} \hat{S}_{ky}$ 。

(2) 目标方位向稀疏度的估计: 对  $s_{pk}(f, f_{\tau m})$  作如下归一化处理:

$$\begin{aligned} & s''_{pk}(f_{\tau m}) \\ &= \frac{\max_f |s_{pk}(f, f_{\tau m})| - \min_{f_{\tau m}} \left\{ \max_f |s_{pk}(f, f_{\tau m})| \right\}}{\max_{f_{\tau m}} \left\{ \max_f |s_{pk}(f, f_{\tau m})| \right\} - \min_{f_{\tau m}} \left\{ \max_f |s_{pk}(f, f_{\tau m})| \right\}} \end{aligned} \quad (6)$$

设置一个合适的阈值  $T_k$ , 将  $s''_{pk}(f_{\tau m})$  离散化表示为向量  $\mathbf{s}''_{pk}$ , 则第  $k$  个目标的方位向稀疏度  $K_k$  定义

为向量  $\mathbf{s}_{pk}''$  中大于  $T_k$  的元素个数。

(3) 方位向相干积累时间的确定: 设对于基准尺寸目标 ( $S_{\text{ref}}$ ) 成像所需的基准方位向分辨率为  $\rho_{\text{ref}}$ , 以适当降低大目标分辨率为原则

$$\rho_k = \frac{\hat{S}_k}{S_{\text{ref}}} \rho_{\text{ref}} \quad (7)$$

因此第  $k$  个目标的方位向相干积累时间为

$$T_{c,k} = \frac{S_{\text{ref}}}{\hat{S}_k} \frac{\hat{R}_k}{\hat{V}_k |\cos(\hat{\theta}_k)|} \frac{\lambda}{2\rho_{\text{ref}}} \quad (8)$$

(4) 方位向观测维度的确定: CS 理论指出, 观测维数满足  $M \geq c_1 K \ln(N)$ ,  $c_1 \approx 2^{[14]}$  时, 正交匹配追踪算法能高概率重构原始信号, 因此将第  $k$  个目标所需的方位向观测维度定义为

$$M_k \geq c_1 \hat{K}_k \ln(N_k) \quad (9)$$

其中  $N_k = \text{PRF} \cdot T_{c,k}$ 。由于  $T_{c,k} > T$ , 需要将  $T_{c,k}$  进行分段, 则单位调度间隔内的方位向观测维度为

$$M'_k \geq \frac{T}{T_{c,k}} M_k \quad (10)$$

(5) 优先级的确定: 通常认为距离近、速度快且面向雷达运动的目标更具有威胁性, 需要更高的优先级, 因此将第  $k$  个成像目标的初始优先级定义为

$$P_{k,0} = p_a \left( \frac{1}{\hat{R}_k} \right)' + p_b \hat{V}_k + p_c (\sin \hat{\theta}_k)', \quad p_a, p_b, p_c \geq 0, p_a + p_b + p_c = 1 \quad (11)$$

其中  $\left( \frac{1}{\hat{R}_k} \right)' = \frac{1/\hat{R}_k}{\max(1/\hat{R}_k)}$ ,  $\hat{V}_k' = \frac{\hat{V}_k}{\max(\hat{V}_k)}$ ,  $(\sin \hat{\theta}_k)' = \frac{\sin \hat{\theta}_k}{\max(\sin \hat{\theta}_k)}$ ,  $p_a, p_b, p_c$  为调整系数, 代表不同目标

信息对优先级的影响程度。显然, 目标的成像初始优先级  $P_k \in [0, 1]$ , 可保证成像任务的优先级小于精密跟踪任务、普通跟踪任务和搜索任务(优先级分别设为 3, 2 和 1)。为保证资源调度过程中发射的成像脉冲不被浪费, 采用优先级动态调整策略, 即若第  $i$

个调度间隔执行了第  $k$  个成像任务, 则在第  $i+1$  个调度间隔内将此任务的优先级适当提高。

$$P_{k,i+1} = P_{k,i} + \Delta P, \Delta P = \frac{P_M - P_{k,0}}{T_{c,k}/T} \quad (12)$$

其中  $P_M$  表示所有雷达任务中的最高优先级。

通常, 根据  $s_{pk}(f, f_{\text{tm}})$  估计得到的目标方位向稀疏度  $\hat{K}_k$  存在较大误差, 需要在成像过程中进行更新。

**3.2.2 成像积累时间的自适应调整** 相控阵雷达在对多目标进行成像时, 不同目标所需成像积累时间不同, 可以利用认知雷达接收端和发射端之间的闭环反馈回路, 自适应地调整各目标的成像积累时间, 提高雷达资源的时间利用率。在每一个调度间隔结束后, 利用到该调度间隔为止之前的所有观测子脉冲进行目标 ISAR 成像, 并选择相邻两个调度间隔结束后重构得到的目标 ISAR 像的互相关系数作为目标成像质量的评估标准。记第  $i$  个调度结束后重构的目标 ISAR 像为  $S_{k,i}(f, f_{\text{tm}})$ , 则相邻调度所得目标像的互相关系数  $\alpha$  的计算公式为

$$\alpha = \frac{\int |S_{k,i+1}(:, f_{\text{tm}})| |S_{k,i}(:, f_{\text{tm}})| df_{\text{tm}}}{\sqrt{\int |S_{k,i+1}(:, f_{\text{tm}})|^2 df_{\text{tm}} \cdot \int |S_{k,i}(:, f_{\text{tm}})|^2 df_{\text{tm}}}} \quad (13)$$

当  $\alpha$  较小时, 说明目标像相似度低, 没有包含目标的全部信息; 反之,  $\alpha$  较大时, 说明继续增加成像积累时间已无法获得更多的目标有效信息。因此, 选择适当的阈值, 当  $\alpha$  小于此阈值时, 下一个调度间隔继续对该成像任务进行调度执行, 反之则认为目标成像质量已达到要求, 该成像任务执行完毕。

**3.2.3 基于稀疏孔径认知成像的雷达资源自适应调度算法** 基于上述基础, 对雷达资源调度算法定义 3 个性能指标: 雷达执行任务的优先级之和(SPE); 执行任务个数在总任务数中所占的比例(ROE); 时间利用率(TUR)。针对以上性能指标, 本文提出基于稀疏孔径认知成像的雷达资源调度算法优化模型:

$$\begin{aligned} & \max \left\{ \omega_1 \sum_{k=1}^{N_{\text{fss}} + N_{\text{ims}}} P_k + \omega_2 \frac{N_{\text{fss}} + N_{\text{ims}}}{N_a} + \omega_3 \frac{\sum_{k=1}^{N_{\text{fss}}} \Delta T_k + \sum_{k=1}^{N_{\text{ims}}} M'_k / \text{PRF}}{T} \right\} \\ & \text{s.t. 对跟踪或搜索任务, 有} \left\{ \begin{aligned} & \max(t_0, t_{dk} - W_k) \leq t_{ek} \leq \min(t_{dk} + W_k, t_0 + T - \Delta T_k) \\ & \min(t_{ej} - t_{ek}) \geq \Delta T_k, j \in \{j | t_{ej} > t_{ek}\} \end{aligned} \right\} \quad (14) \\ & \sum_{k=1}^{N_{\text{fss}}} \Delta T_k + \sum_{k=1}^{N_{\text{ims}}} M'_k / \text{PRF} \leq T \end{aligned}$$

其中  $N_a$  为雷达任务请求总数,  $N_{\text{fss}}$  为调度间隔内执行的跟踪和搜索任务数,  $N_{\text{ims}}$  为调度间隔内执行的

成像任务数,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  为调整系数, 代表不同性能指标对调度算法的影响程度。

基于稀疏孔径认知成像的雷达资源自适应调度算法的具体步骤可归纳为：

步骤 1 对各成像目标发射少量脉冲，根据回波信号对各目标特征进行初始认知，初始化观测矩阵  $\Phi_0 = \emptyset$ ；

步骤 2 计算各目标的单位调度间隔内所需方位向的观测维度和优先级；

步骤 3 根据调度算法优化模型分配第  $i$  个调度间隔内的雷达时间资源，根据所分配的子孔径分布情况构造观测矩阵  $\Phi_i'$ ，则第  $i$  个调度结束后观测矩阵为  $\Phi_i = [\Phi_{i-1}, \Phi_i']$ ；

步骤 4 使用基于 CS 的稀疏孔径 ISAR 成像算法对目标成像，更新方位向稀疏度估计和单位调度间隔内的方位向观测维度，计算相邻两个调度间隔结束后所得 ISAR 像的互相关系数，若大于阈值，则将该任务优先级置零，反之，将该任务送入下一个调度间隔进行分析；

步骤 5 转步骤 3，对下一个调度间隔进行雷达资源分配。

#### 4 仿真实验与分析

算法仿真中仅考虑跟踪、搜索和成像任务，其中跟踪和搜索任务的典型参数如表 1 所示，成像任务的目标参数如表 2 所示。对于跟踪和搜索任务，雷达发射窄带信号，载频  $f_c = 10$  GHz，脉宽  $T_p = 1 \mu\text{s}$ ，信号带宽  $B = 10$  MHz，脉冲重复频率 PRF = 1000 Hz。对于成像任务，雷达发射线性调

频信号，载频  $f_c = 10$  GHz，脉宽  $T_p = 1 \mu\text{s}$ ，信号带宽  $B = 300$  MHz，脉冲重复频率 PRF = 1000 Hz。

表 1 跟踪、搜索任务的参数列表

任务类型	优先级	驻留时间 (ms)	时间窗 (ms)	更新率 (Hz)
精密跟踪	3	2	5	5
普通跟踪	2	3	5	2
搜索	1	4	10	80

表 2 成像任务目标参数

目标	距离 $R(\text{km})$	速度 $V(\text{m/s})$	航向 $\theta(^{\circ})$	尺寸 $S(\text{m}^2)$
目标 1	11	300	0	125
目标 2	9	500	10	48
目标 3	10	280	-20	127

对各成像任务目标发射少量脉冲，本文取为 80 个，利用在缺失数据部分填零的方法重构长度为  $N_k = \text{PRF} \cdot T_{c,k}$  (相干积累时间  $T_{c,k}$ ) 的目标粗分辨 ISAR 像。各目标的散射点模型和粗分辨 ISAR 像如图 1 所示。

根据式(5)和式(6)对各目标的粗分辨 ISAR 像进行处理，选择阈值  $T_s = 0.2, T_k = 0.3$ ，可得到各目标的尺寸估计  $\hat{S}_k$  和稀疏度估计  $\hat{K}_k$ 。设尺寸为  $S_{\text{ref}} = 100 \text{ m}^2$  的目标成像所需的方位向分辨率为

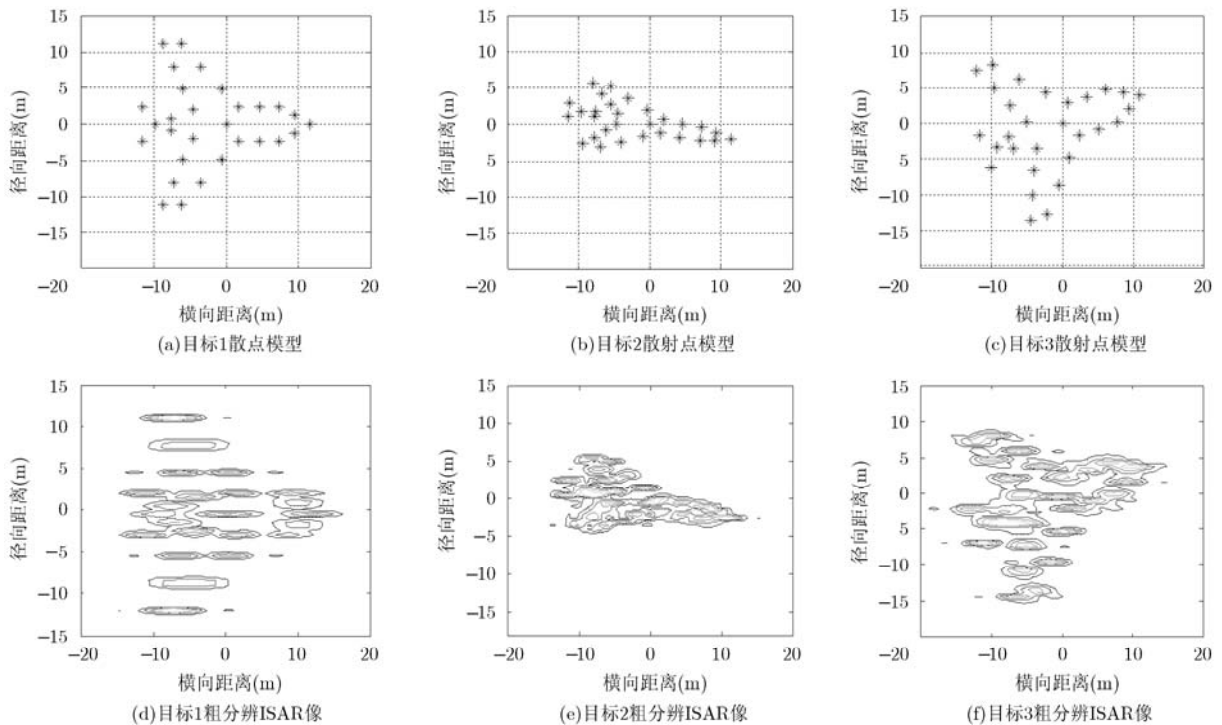


图 1 成像目标散射点模型与粗分辨 ISAR 像

$\rho_{\text{ref}} = 0.5 \text{ m}$ ，雷达资源调度时间间隔长度为  $T = 50 \text{ ms}$ ，进一步根据式(8)，式(10)和式(11)计算各目标的方位向相干积累时间、单位调度内所需稀疏孔径维度和优先级。其中调整系数取为  $p_a = 0.3, p_b = 0.4, p_c = 0.3$ ，结果如表3所示。从表3中可以看出，成像目标2尺寸小、速度快且面向雷达运动，因此成像优先级最高。

表3 各成像目标优先级、单位调度内所需稀疏孔径维度和相邻调度成像互相关系数阈值

	目标1	目标2	目标3
尺寸 $\hat{S}_k \text{ (m}^2\text{)}$	130	58	133
稀疏度 $\hat{K}_k$	47	56	53
方位向相干积累时间 $T_{c,k} \text{ (s)}$	0.8462	0.9454	0.8573
单位调度稀疏孔径维数 $M'_k$	8	9	8
初始优先级 $P_{k,0}$	0.5673	0.9015	0.3840

设多功能相控阵雷达需对工作区域内的22个目标进行精密跟踪，45个目标进行普通跟踪，并对上述3个目标进行成像。基于表3所示的初始认知结果，根据式(14)的调度算法优化模型对雷达时间资源合理分配，调整系数取为  $\omega_1 = 0.6, \omega_2 = 0.3, \omega_3 = 0.1$ ，可以得到资源调度时序图如图2所示，各成像目标的稀疏度估计值自适应更新过程及成像互相关系数变化过程如图3所示。

从图2和图3中可以看出，成像任务请求中目

标2的优先级最高，因此利用第1个调度间隔内的空闲时间孔径对其进行观测成像；在第16个调度间隔结束后，由于相邻调度间隔所得目标像互相关系数大于阈值，达到了成像质量要求，因此优先级置零，下一个调度间隔不再对其进行资源分配。同样，由于目标1的成像优先级大于目标3，因此在第4个调度间隔存在空闲时间孔径时对其进行观测成像；在第15个调度间隔结束后，互相关系数大于阈值，任务执行完毕。而优先级最小的目标3的成像任务请求在第16个调度间隔被执行，在第30个调度间隔达到成像质量要求，任务执行完毕。同时，图3表明，随着调度次数的增加，目标的稀疏度估计值呈下降趋势且趋于平稳，而目标成像的互相关系数不断提高，最终达到成像质量要求。这是因为随着成像积累时间的增加，目标ISAR像的分辨率得到提高，使得目标稀疏度的估计越来越精确，相邻调度间隔所得目标ISAR像的相似度也越来越高。

下面对雷达资源自适应调度算法的性能指标进行评估分析。表4给出了3.1节中的传统调度算法与本文所提算法的性能指标比较结果。

从表4中可以看出，本文方法各项性能指标均有所提高，可以显著提高雷达工作效率。为验证雷达进行跟踪和搜索的同时实现目标成像的有效性，

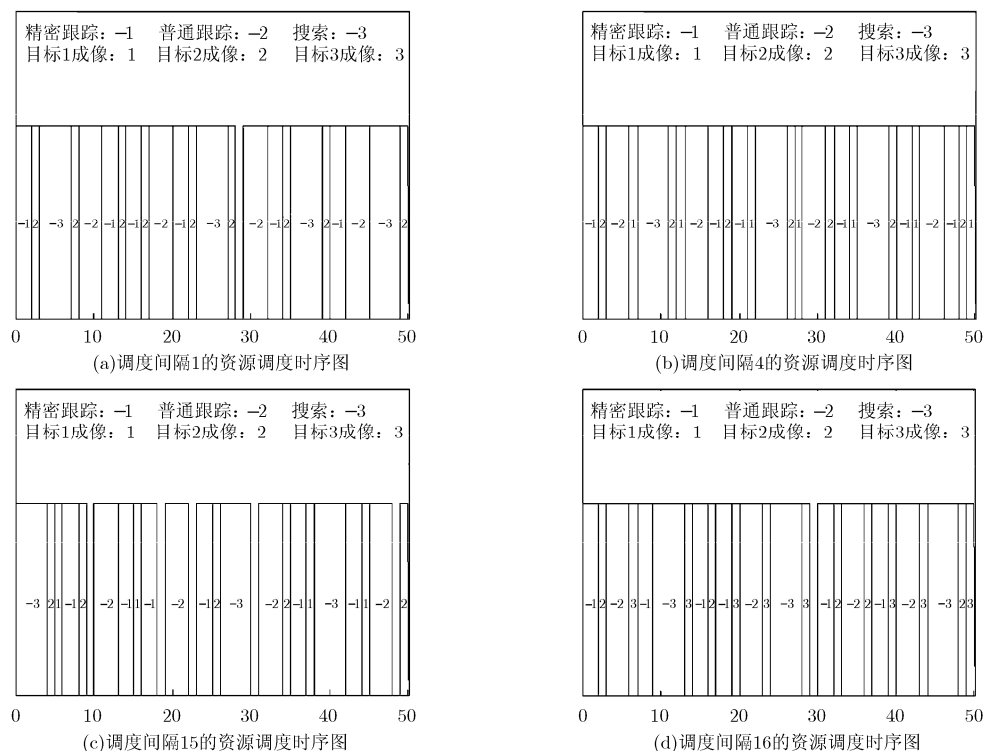


图2 资源调度时序图

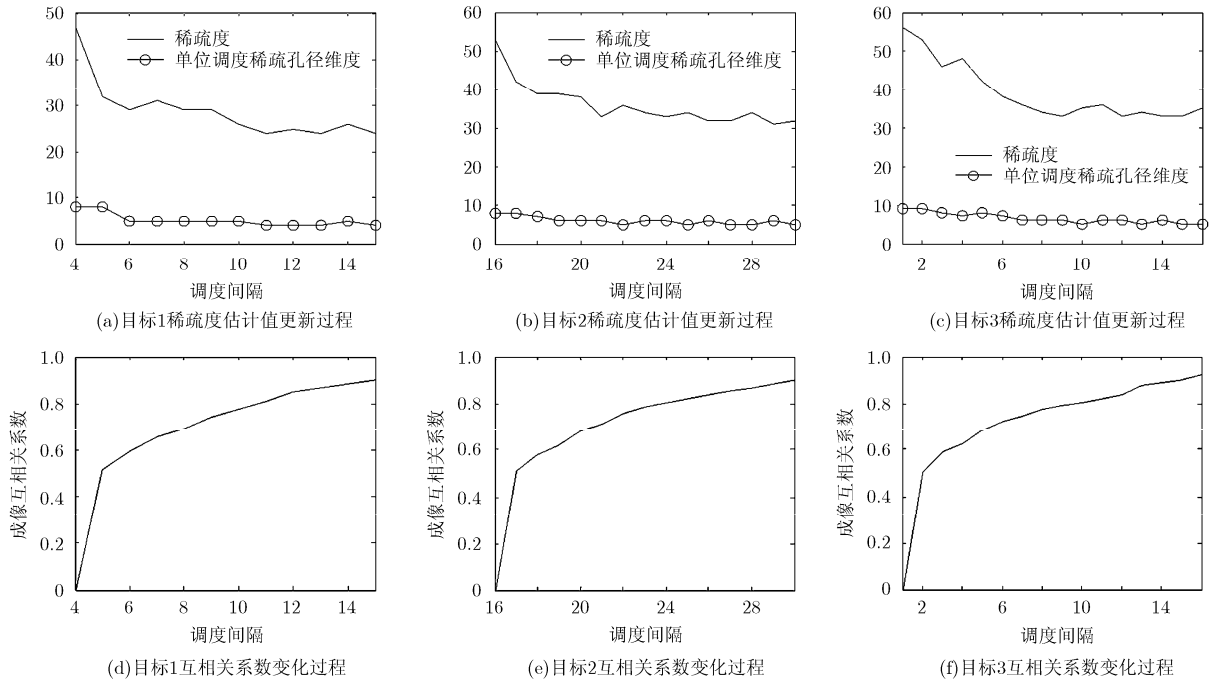


图3 目标稀疏度估计值自适应更新过程及成像互相关系数变化过程

表4 性能评估参数表

算法	SPE	ROE(%)	TUR(%)
传统调度算法	29.80	78.98	80.07
本文算法	31.12	87.55	97.07

将基于本文算法获得的目标 ISAR 像与传统全孔径 ISAR 成像结果进行比较, 结果如图 4 所示, 两种算法所得的各目标 ISAR 像互相关系数分别达到 0.9218, 0.9491 和 0.9035, 说明本文算法能够在有效提高雷达工作效率的同时获得满意的成像效果。

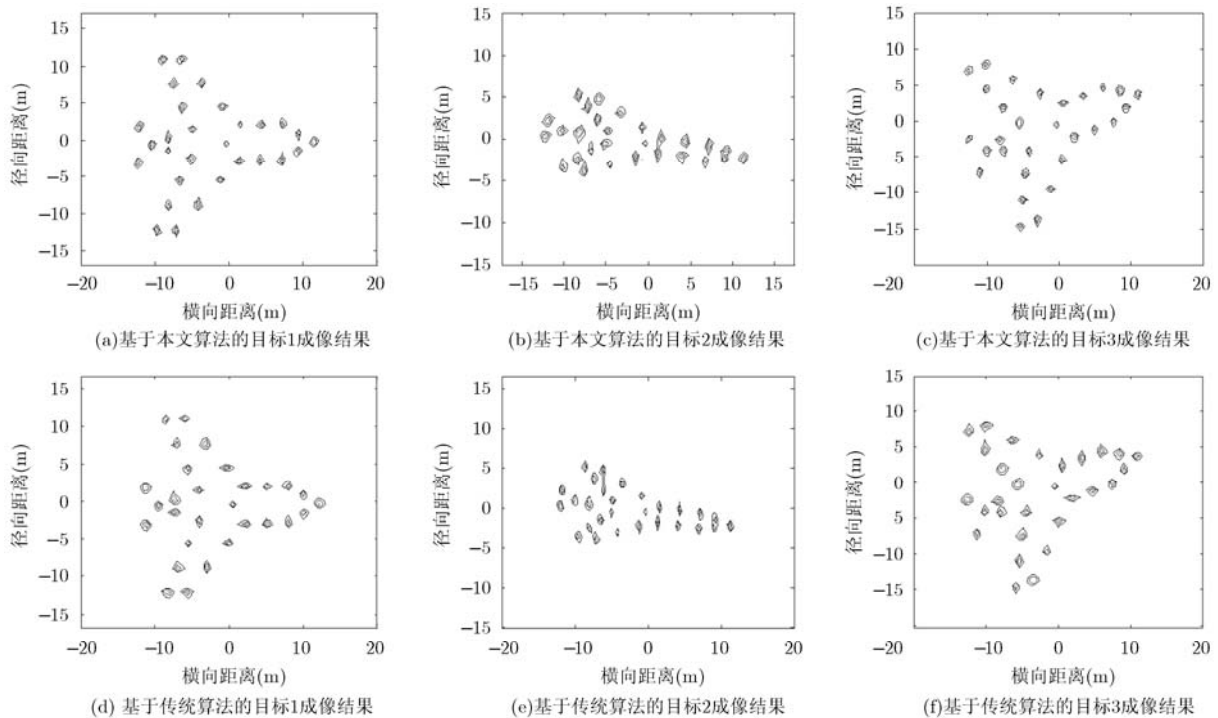


图4 成像效果对比图

## 5 结束语

本文提出了一种新的雷达资源自适应调度算法。通过目标特征进行认知,将成像功能考虑到资源调度策略中,在跟踪和搜索的同时实现了目标成像。仿真结果表明,该算法能够显著提高雷达工作效率并获得高质量的目标 ISAR 像。应该指出,在本文的研究中,为了简化分析,假设目标平稳飞行,然而针对机动目标成像,还需要考虑最优成像时间段的选择问题。可以根据目标跟踪获得的速度和航向信息,在目标平稳飞行时间段加入成像任务并合理设置时间窗,使其仅在平稳飞行时间段被调度执行。相关内容有待进一步深入研究。

### 参考文献

- [1] 程婷, 何子述, 李会勇. 一种数字阵列雷达自适应波束驻留调度算法[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 2025-2029.  
Cheng Ting, He Zi-shu, and Li Hui-yong. An adaptive dwell scheduling algorithm for digital array radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(9): 2025-2029.
- [2] 陈大伟. 相控阵雷达自适应调度算法研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2011.  
Chen Da-wei. A study of adaptive scheduling algorithm of phased array radar[D]. [Master dissertation], Electronic Science and Technology University, 2011.
- [3] 卢建斌, 肖慧, 席泽敏, 等. 相控阵雷达波束波形联合自适应调度算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 84-88.  
Lu Jian-bin, Xiao Hui, Xi Ze-min, et al. Joint adaptive scheduling algorithm of beam and waveform for phased array radars[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(1): 84-88.
- [4] 赵宇, 李建勋, 曹兰英, 等. 基于二次规划的相控阵雷达任务自适应调度算法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(4): 698-703.  
Zhao Yu, Li Jian-xun, Cao Lan-ying, et al. Adaptive scheduling algorithm based on quadratic programming for multifunction phased array radars[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(4): 698-703.
- [5] Jang Dae-sung, Choi Han-lim, and Roh Ji-eun. A time-window-based task scheduling approach for multi-function phased array radars[C]. 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, 2011: 1250-1255.
- [6] 孙凤莲, 张群, 罗迎, 等. 基于压缩感知的稀疏孔径认知 ISAR 成像方法[J]. 通信学报, 2012, 33(Z2): 1-8.  
Sun Feng-lian, Zhang Qun, Luo Ying, et al. Imaging method based on compressed sensing for the cognitive sparse aperture of ISAR[J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(Z2): 1-8.
- [7] Luo Ying, Zhang Qun, Hong Wen, et al. Waveform design and high-resolution imaging of cognitive radar based on compressive sensing[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2012, 55(11): 2590-2603.
- [8] 王建, 盛卫星, 韩玉兵, 等. 基于压缩感知的自适应数字波束形成算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 438-443.  
Wang Jian, Sheng Wei-xing, Han Yu-bing, et al. Adaptive digital beamforming algorithm based on compressed sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(2): 438-443.
- [9] 金坚, 谷源涛, 梅顺良. 压缩采样技术及其应用[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(2): 470-475.  
Jin Jian, Gu Yuan-tao, and Mei Shun-liang. An introduction to compressive sampling and its applications[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(2): 470-475.
- [10] Shi Guang-ming, Gao Da-hua, Song Xiao-xia, et al. High-resolution imaging via moving random exposure and its simulation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(1): 276-282.
- [11] 朱丰, 张群, 段艳丽, 等. 基于二维稀疏采样的 HRRP 合成及 ISAR 成像方法[J]. 电子科技大学学报, 2012, 41(6): 847-852.  
Zhu Feng, Zhang Qun, Duan Yan-li, et al. HRRP synthesizing and ISAR imaging method based on two dimension sparse sampling[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2012, 41(6): 847-852.
- [12] 张晓伟, 李明, 左磊. 基于基追踪-Moore-Penrose 逆矩阵算法的稀疏信号重构[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 388-393.  
Zhang Xiao-wei, Li Ming, and Zuo Lei. Sparse signal reconstruction based on basis pursuit-moore-penrose inverse matrix[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(2): 388-393.
- [13] 卢建斌, 胡卫东, 郁文贤. 多功能相控阵雷达实时驻留的自适应调度算法[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(12): 1981-1984.  
Lu Jian-bin, Hu Wei-dong, and Yu Wen-xian. Adaptive scheduling algorithm for real time dwells in multifunction phased array radars[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(12): 1981-1984.
- [14] 石光明, 刘丹华, 高大化, 等. 压缩感知理论及其研究进展[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1070-1081.  
Shi Guang-ming, Liu Dan-hua, Gao Da-hua, et al. Advances in theory and application of compressed sensing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(5): 1070-1081.

陈怡君: 女, 1989 年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理、压缩感知。

罗迎: 男, 1984 年生, 讲师, 研究方向为雷达信号处理、雷达成像与目标识别。

张群: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像、雷达目标识别、雷达对抗等。

李开明: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、目标识别。

孙凤莲: 女, 1988 年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理。