

# 基于脉冲交错的 ISAR 成像雷达资源自适应调度算法

孟 迪<sup>1,2</sup>, 张 群<sup>1,2</sup>, 罗 迎<sup>1,2</sup>, 陈怡君<sup>1,2</sup>, 倪嘉成<sup>1,2</sup>

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 信息感知技术协同创新中心, 西安, 710077)

**摘要** 针对多功能相控阵雷达成像任务的调度问题, 提出了一种基于脉冲交错的成像雷达资源调度算法。该方法首先根据目标特征认知结果计算稀疏孔径 ISAR 成像所需的雷达资源, 在此基础上, 建立合理的脉冲交错驻留的资源调度模型, 在时间与能量资源双重约束下对雷达资源进行合理分配, 优化脉冲交错实现方法, 并提出了平均交错度(AID)作为衡量雷达成像任务资源调度的性能指标, 最后采用基于压缩感知的稀疏孔径 ISAR 成像方法对不同目标分别成像, 在满足目标期望成像分辨率的前提下, 显著提高雷达资源利用率。仿真实验验证了该算法的可行性。

**关键词** 相控阵雷达; 资源调度; 脉冲交错; 稀疏孔径成像

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.02.005

**中图分类号** TN957.52 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)02-0025-07

## An Adaptive Scheduling Algorithm for ISAR Imaging Radar Based on Pulse Interleaving

MENG Di<sup>1,2</sup>, ZHANG Qun<sup>1,2</sup>, LUO Ying<sup>1,2</sup>, CHEN Yijun<sup>1,2</sup>, NI Jiacheng<sup>1,2</sup>

(1 Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;  
2. Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Aimed at the problem of imaging task scheduling of multifunction phased array radar, this paper puts forward an adaptive scheduling algorithm for ISAR imaging radar based on pulse interleaving. Firstly, the paper calculates the required resources for sparse aperture ISAR imaging according to initial cognition of target feature. On the basis of that, a rational and optimized scheduling model of interleaved pulse-dwelling is established, and then radar resources can be allocated reasonably under condition of the dual restraints by time and energy. Average interleaving degree is proposed as an indicator of measuring imaging radar resources scheduling. At last, different targets are imaged respectively by using compressed sensing-based sparse aperture ISAR imaging method, and the required imaging resolution is achieved while the resource utilization rate is enhanced apparently. The simulation result shows that this algorithm is feasible.

**Key words:** phased array radar; resource scheduling; pulse interleaving; sparse aperture imaging

**收稿日期:** 2016-08-29

**基金项目:** 国家自然科学基金(61471386); 陕西省青年科技新星计划(2016KJXX-49)

**作者简介:** 孟 迪(1992—), 女, 辽宁沈阳人, 硕士生, 主要从事相控阵雷达资源管理研究. E-mail: mengdi1105@163.com

**引用格式:** 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 Di, ZHANG Qun, LUO Ying, 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.

近年来,相控阵雷达技术获得了长足的发展,并已经得到了广泛应用。相比于常规机械扫描雷达,相控阵雷达微秒量级的波束捷变能力、可控制的空间功率和时间资源分配等特点使其在时间、能量管理方面具有无法比拟的优势<sup>[1]</sup>。合理、灵活、高效的调度策略是其能否发挥其优势的关键所在<sup>[2]</sup>。

相控阵雷达的调度方法主要可分为两大类:模板法和自适应调度方法,其中自适应调度方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,是最有效但也最为复杂的调度方法<sup>[2]</sup>。文献[3~7]针对目标搜索、跟踪等不同雷达任务提出多种自适应调度算法,但是系统的资源并没有被充分地挖掘出来。脉冲交错理论的提出为进一步提升系统的资源利用率提供了新的途径,其基本思想是可利用收发脉冲间的等待期交错调度其他任务。文献[8~9]分别提出了针对相控阵雷达和 MIMO 雷达在线脉冲交错调度算法,提高了时间利用率和能量利用率。文献[10]针对数字阵列雷达波束驻留调度问题,提出了基于调度间隔分析的调度算法。文献[11~13]利用脉冲交错技术,对传统的雷达资源调度算法的资源利用率进行了优化。然而这些算法大都只是对目标的搜索和跟踪任务进行资源调度,没有将成像任务考虑在内。在实际情况下,目标成像可为目标分类与识别提供重要支撑信息,是相控阵雷达的重要功能之一。现有的相控阵雷达资源调度策略大多需要分出一部分连续的固定的资源实现成像功能,因此资源利用率较低。

在压缩感知理论框架下,对目标的连续观测成像可以转化为随机稀疏观测成像,并在稀疏孔径条件下获得高质量的目标 ISAR 像<sup>[14]</sup>,这为将成像任务需求纳入相控阵雷达资源调度模型提供了有效的技术支撑。文献[15]提出了一种基于稀疏孔径成像的资源调度算法,然而该算法只是从波束角度进行调度,没有利用驻留等待期的时间资源。因此,在此基础上,本文提出一种基于脉冲交错的 ISAR 成像雷达资源调度算法,从脉冲角度出发,进一步提高雷达资源的利用率。

## 1 基于压缩感知的稀疏孔径认知 ISAR 成像

建立合理的脉冲交错驻留的资源调度模型,需要根据目标特征认知结果计算稀疏孔径 ISAR 成像所需的雷达资源。基于压缩感知的稀疏孔径 ISAR 成像在近年来已经取得丰硕的研究成果。为了提高雷达成像过程中的自适应能力,可首先对目标特征进行认知,并根据目标特征认知结果计算目标成像对雷达资源的需求度<sup>[15]</sup>。具体方法为:目标距离

$\hat{R}_k$ 、速度  $\hat{V}_k$  和航向  $\hat{\theta}_k$  使用传统雷达常规算法进行测定;对各目标发送少量连续脉冲,得到粗分辨率 ISAR 像。速度  $\hat{V}_k$  和航向  $\hat{\theta}_k$  可使用传统雷达常规算法进行测定;目标尺寸  $\hat{S}_k$  可由目标的粗分辨率 ISAR 像估计得出;方位向稀疏度  $\hat{K}$  定义为对目标粗分辨率 ISAR 像各方位向的距离单元大于设定阈值的距离单元数;观测时间  $\hat{T}_c$  通过定义基准目标成像所需的基准方位向分辨率计算得出;相对优先级  $P_i$  根据目标的距离、速度和航向等参数加权得到。

在 ISAR 成像过程中,回波中主要的位置和幅度信息大部分都是由强散射点提供,弱散射点在回波中贡献较少。因此可在对目标特征认知的基础上,实现基于压缩感知的稀疏孔径认知 ISAR 成像。

假设经过特征认知后得到第  $i$  个目标成像积累时间为  $\hat{T}_c$ ,则雷达共发射  $N = PRF \cdot \hat{T}_c$  个脉冲,将完成距离向处理的全孔径信号离散化表示为  $s_r(t, m), m = 1, 2, \dots, N$ 。仅对目标发射  $M (M < N)$  个子脉冲,稀疏孔径信号可表示为  $s_r(t, m'), m' = 1, 2, \dots, M$ 。若第  $i$  个目标目标的估计稀疏度为  $\hat{K}_i$ ,则第  $i$  个目标降维处理后的方位向观测维度为:

$$M_i \geq c \hat{K}_i \ln(N_i) \quad (1)$$

式中: $c$  为一个与恢复精度有关的常数。选择傅里叶变换矩阵作为信号  $x$  的稀疏变换矩阵  $\Psi$ 。根据稀疏孔径分布情况,设计观测矩阵  $\Phi$  满足:

$$\varphi(m', m) = \begin{cases} 1, & \{(m', m) \mid m' = m\} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

已经证明<sup>[16]</sup>,观测矩阵  $\Phi$  和稀疏变换矩阵  $\Psi$  不相关。通过求解最优化问题重构方位向信息:

$$\begin{aligned} \Theta &= \min \| \Psi \Phi^H S_r(f, \tau_m) \|_1, \\ \text{s. t. } S_r(f, \tau_m) &= \Psi \Phi^H \Theta \end{aligned} \quad (3)$$

对每一距离单元按上述方法进行方位向成像,得到的矩阵形式即为目标二维 ISAR 像。

## 2 雷达成像任务资源调度算法

本文面向 ISAR 成像任务,基于稀疏孔径认知 ISAR 成像技术,提出一种基于脉冲交错的雷达成像资源自适应调度策略,在满足目标期望成像分辨率的前提下,显著提高雷达资源利用率。

### 2.1 脉冲交错技术

雷达任务的驻留时间一般由 3 个部分组成,即发射期、等待期和接收期。其中雷达在发射和接收脉冲的过程中是非抢占的,而在等待期内,天线处于空闲状态。因此,可以在不与原驻留任务发射期和接收期相冲突的前提下,充分利用等待期的时间资源,用于

发射或接收其他驻留任务。这就是脉冲交错的实质。通过将波束层面细化到脉冲层面,可以进一步发挥相控阵雷达波束捷变的优势,提高雷达资源利用率。

脉冲交错的方式有 2 种,分别为交叉交错和内部交错。2 种交错形式见图 1。

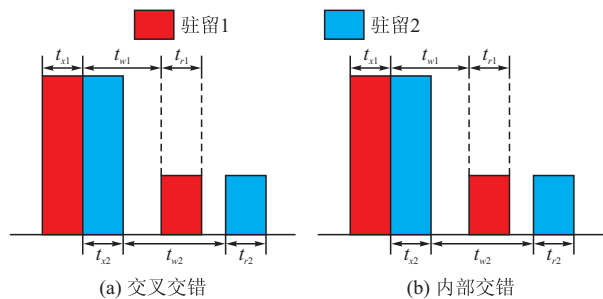


图 1 脉冲交错的 2 种形式

Fig. 1 Two forms of pulse interleaving

图中,  $t_{xj}$ ,  $t_{wj}$ ,  $t_{rj}$  分别代表驻留  $j$  ( $j=1, 2$ ) 的发射期,等待期和接收期。2 种交错方式需要分别满足的时间约束条件分别为式(4)、式(5):

$$t_{w1} \geq t_{x2}, t_{w2} \geq t_{r1}, t_{x2} + t_{w2} \geq t_{x1} + t_{r1} \quad (4)$$

$$t_{w1} \geq t_{x2} + t_{w2} + t_{r2} \quad (5)$$

在实际调度过程中,脉冲交错的数目要受到能量约束条件的限制,以避免发射机持续工作时间过长而损坏。雷达系统的能量约束分为稳态能量约束和瞬态能量约束。由于稳态能量约束设定的总能量消耗阈值受到设备自身性能的制约,因此通常只考虑瞬态能量约束。系统在  $t$  时刻的瞬态能量可以表示为:

$$E(t) = \int_0^t P(x) e^{-(x-t)/\tau} dx \quad (6)$$

式中:  $P(x)$  为系统的功率参数;  $\tau$  为系统的回退参数,与系统本身的散热性能有关。式(6)的实质是对功率函数进行指数加权求和,早期发射脉冲的能量加权系数小,近期发射脉冲的能量加权系数大。

由于接收脉冲消耗的能量远小于发射脉冲消耗的能量,为计算简便可忽略不计。若系统在  $t$  时刻的能量状态临近瞬态能量上限  $E_{\max}$ ,则此时不能继续发射脉冲,需要一段冷却时间  $t_c$  使能量恢复到正常值  $E_l$ 。也就是说,在  $[t, t+t_c]$  时间段内,系统不再发射脉冲,但可以正常接收脉冲。若设  $t$  时刻系统的瞬态能量为  $E(t)$ ,则在  $t+t_c$  时刻,系统的瞬态能量为:

$$E(t+t_c) = E(t) e^{-t_c/\tau} \quad (7)$$

令  $E(t) = E_{\max}$ ,  $E(t+t_c) = E_l$ ,则系统冷却时间  $t_c$  的表达式为:

$$t_c = -\tau \ln\left(\frac{E_l}{E_{\max}}\right) \quad (8)$$

进而得到系统冷却速率  $v_E$  的表达式为:

$$v_E = \frac{1}{\tau} (E_l - E_{\max}) \ln\left(\frac{E_{\max}}{E_l}\right) < 0 \quad (9)$$

系统的能量状态在  $\Delta t$  时间内的减少量  $\Delta E$  可表示为:

$$\Delta E = v_E \Delta t = \frac{\Delta t}{\tau} (E_l - E_{\max}) \ln\left(\frac{E_{\max}}{E_l}\right) \quad (10)$$

在脉冲交错的过程中,系统的能量约束条件可定义为系统在任意  $t$  时刻均不能超过最大瞬时能量阈值  $E_{\max}$ ,即:

$$E(t) \leq E_{\max} \quad (11)$$

需要指出的是,在仿真过程中,可以通过天线增益、发射功率、脉冲宽度和脉冲累计数等参数,事先得估算出雷达发射波束的能量消耗与  $\Delta t$  时间内能量状态的变化量以降低算法复杂度。

## 2.2 基于脉冲交错的雷达成像任务资源调度算法

本文提出一种基于脉冲交错的雷达成像资源自适应调度算法。首先采用文献[15]中的方法对目标特征进行认知,计算各目标成像所需观测时间  $\hat{T}_{ci}$ , 方位向观测维度  $\hat{M}_i$  和相对优先级  $P_{ki}$ 。在此基础上采用脉冲交错技术,按照任务相对优先级由高到低依次分配雷达资源。任务驻留中脉冲等待期  $t_{wj}$  可由认知估计得到的目标与雷达间距离  $\hat{R}_i$  计算得出。图 2 给出了成像任务驻留脉冲交错示意图。

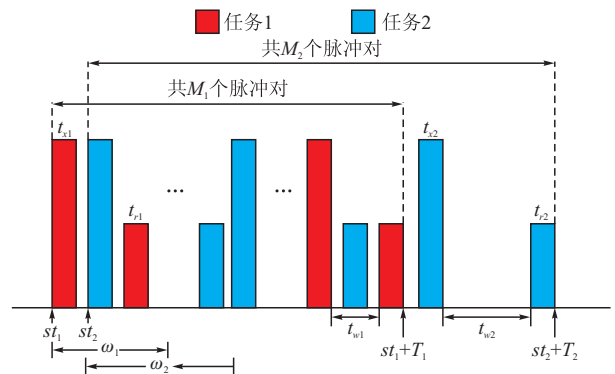


图 2 成像任务驻留脉冲交错示意图

Fig. 2 The schematic of ISAR task scheduling based on pulse interleaving

假设需要调度 2 个成像任务,且任务 1 的优先级高于任务 2 的优先级。首先确定任务 1 的实际调度起始时刻  $st_1$ ,并根据目标成像所需观测时间  $T_{c1}$  确定调度结束时刻  $st_1 + T_{c1}$ ,并在此区间内随机插入  $M_1$  个发射脉冲对。对任务 1 调度完成后,在时间窗允许的范围内调整任务 2 的实际调度起始时刻  $T_{c2}$  与调度结束时刻  $st_2 + T_{c2}$ ,并在与任务 1 的驻留脉冲不发生冲突的前提下,插入  $M_2$  个发射脉冲对,完成对任务 2 的调度。

定义资源调度性能指标如下:

1) 调度成功率(SSR): 调度成功率定义为申请执行的成像任务数与实际执行的成像任务数之比。表达式如下:

$$SSR = \frac{N'}{N} \quad (12)$$

2) 时间资源利用率(TUR): 时间资源利用率定义为所有任务驻留脉冲所占时间与总调度时间之比。表达式如下:

$$TUR = \frac{\sum_{i=1}^{N'} (t_{xi} + t_{ri}) M_i}{T_{total}} \quad (13)$$

3) 能量资源利用率(EUR): 能量资源利用率定义为所有发射脉冲消耗的能量与系统提供的总能量之比。表达式如下:

$$EUR = \frac{P_t \sum_{i=1}^{N'} (t_{xi} M_i)}{P_{av} T_{total}} \quad (14)$$

4) 平均交错度(AID): 本文提出平均交错度作为衡量脉冲交错程度的性能指标。定义交错度为一个任务驻留等待期中成功插入其他驻留的发射脉冲个数。平均交错度为整个调度间隔中所有驻留交错

度的平均值。显然, 平均交错度与雷达成像目标的数量和距离、系统的发射功率、系统的能量阈值和最小滑动步长等参数的选取有关。当其他参数确定时, 可以通过观察平均交错度的变化趋势得到系统最大资源容限。其表达式如下:

$$AID = \frac{\sum_{i=1}^{N'} \sum_{j=1}^{M_i} \text{num}_{i,j}}{\sum_{i=1}^N M_i} \quad (15)$$

式中:  $N$  为申请执行的成像任务数;  $N'$  为实际执行的成像任务数;  $t_{xi}$  和  $t_{ri}$  分别表示第  $i$  个任务驻留中脉冲的发射时间和接收时间;  $M_i$  为第  $i$  个任务的方位向观测维度;  $T_{total}$  为总仿真时间;  $P_{av}$  为雷达能提供的平均功率;  $P_t$  为每个发射脉冲的峰值功率;  $\text{num}_{i,j}$  表示第  $i$  个任务第  $j$  个发收脉冲对中成功交错其他驻留的发脉冲个数。

基于此, 建立雷达成像驻留任务模型如下:

$$\max \left\{ q_1 \frac{N'}{N} + q_2 \sum_{i=1}^{N'} \frac{\sum_{i=1}^{N'} (t_{xi} + t_{ri}) M_i}{T_{total}} + q_3 \frac{P_t \sum_{i=1}^{N'} (t_{xi} M_i)}{P_{av} T_{total}} + q_4 \frac{\sum_{i=1}^{N'} \sum_{j=1}^{M_i} \text{num}_{i,j}}{\sum_{i=1}^N M_i} \right\}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \max(et_i, st_i) \leq st_i \leq \min(et_i + \omega_i, t_{end}), i = 1, 2, \dots, N' \\ \bigcap_{i=1}^{N'} [st_i, st_i + t_{ui}] \cup [st_i + t_{xi} + t_{ui}, st_i + t_{xi} + t_{ui} + t_{ri}] = \emptyset \\ T[st_i : st_i + t_{xi}] = T[st_i + T_{ci} - t_{ri} - t_{ui} - t_{xi} : st_i + T_{ci} - t_{ri} - t_{ui}] = a_i \\ T[st_i + t_{xi} + t_{ui} : st_i + t_{xi} + t_{ui} + t_{ri}] = T[st_i + T_{ci} - t_{ri} : st_i + T_{ci}] = -a_i \\ \text{在 } (st_i, st_i + T_{ci}) \text{ 中插入 } M_i - 2 \text{ 个发收脉冲对} \\ E(t) \leq E_{max}, t \in [t_0, t_{end}] \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $et_i$  与  $st_i$  分别为第  $i$  个任务的期望调度起始时刻和实际调度起始时刻;  $T_{ci}$  为第  $i$  个任务的方位向相干累积时间;  $\omega_i$  为第  $i$  个任务的时间窗, 规定最早调度起始时间为期望调度起始时刻; 向量  $T$  表示离散化后时间间隔的调度状态;  $a_i$  为第  $i$  个任务的编号;  $q_1, q_2, q_3, q_4$  为调整系数。第 1 个和第 2 个约束表示任务调度需满足的时间约束条件; 第 3 到第 5 个约束表示成像任务需要满足的稀疏孔径条件和观测时间范围; 第 6 个约束条件表示任务调度需满足的能量约束条件。

将系统时间作离散化处理, 每个时间槽长度为  $\Delta t$ 。假设要在调度间隔  $[t_0, t_{end}]$  内对  $N$  个目标进行成像, 基于脉冲交错的 ISAR 成像雷达资源调度算法步骤描述如下:

**步骤 1** 发送少量脉冲对目标特征进行认知, 根据回波反馈信息, 计算各目标成像所需要的方位向相干积累时间、观测维度。

**步骤 2** 将  $N$  个成像任务中最晚调度起始时刻

小于  $t_0$  的任务和最早调度起始时刻与方位向相干累积时间之和大于  $t_{end}$  的任务加入删除链表, 剩余  $N-K$  个任务按照优先级从高到低排列送入执行链表, 初始化该调度间隔内的各时间槽能量状态, 令  $i=1$ 。

**步骤 3** 定义  $t_{p\_first}$  指向第  $i$  个成像任务的第一个发射脉冲, 即期望调度起始时刻。  $t_{p\_end}$  指向最后一个发射脉冲, 则  $t_{p\_end} = t_{p\_first} + T_{ci} - t_{wi}$ 。

**步骤 4** 若在  $t_{p\_first}$  与  $t_{p\_end}$  确定的首尾发收脉冲对区间内, 满足时间和能量约束条件成功插入  $M_i - 2$  个发收脉冲对, 则按此方式调度该成像任务, 并更新各时间槽能量状态,  $i=i+1$ , 转步骤 5。否则, 令  $t_{p\_first} = t_{p\_first} + \Delta t_p$ ,  $t_{p\_end} = t_{p\_end} + \Delta t_p$  ( $\Delta t_p$  为最小指针滑动步长)。若  $t_{p\_first} < et_i + \omega_i$ , 返回步骤 4, 否则认为该任务调度失败并将其加入删除链表,  $i=i+1$ , 并返回步骤 3。

**步骤 5** 若  $i \leq N - K$ , 返回步骤 3, 否则转步骤 6。

**步骤 6** 采用基于压缩感知的稀疏孔径 ISAR 成像方法对调度成功的任务成像, 调度结束。

算法的具体实现框架见图 3。相应的调度算法流程图见图 4。



图 3 成像任务资源调度框架

Fig. 3 The flame of ISAR task resource scheduling

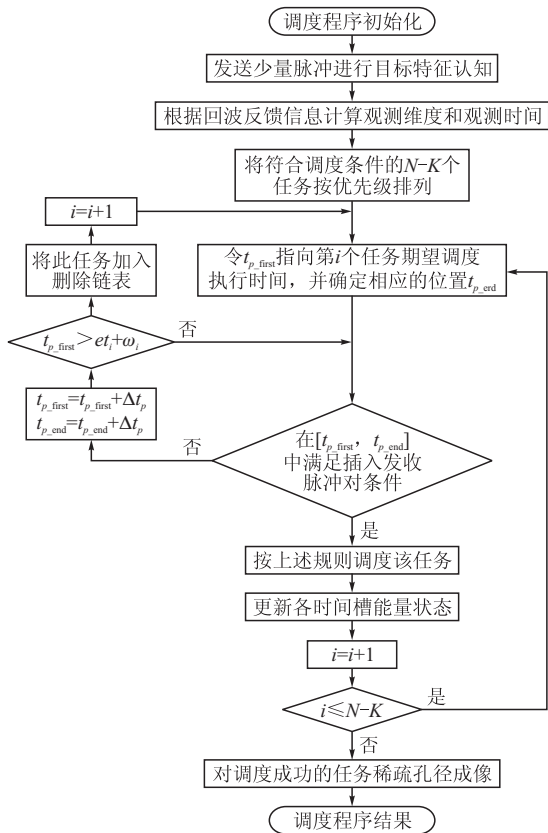


图 4 调度算法流程图

Fig. 4 The flow chart of scheduling algorithm

### 3 仿真与分析

在进行仿真实验时,设雷达发射的为线性调频信号,为了得到更为精确的仿真结果,设置发射脉冲宽度为  $10 \mu\text{s}$ ,最小指针滑动步长设为  $10 \mu\text{s}$ ,时间窗取  $1 \text{ ms}$ ,仿真时间  $1 \text{ s}$ ,脉冲发射功率  $4 \text{ kW}$ ,雷达平均功率  $500 \text{ W}$ 。各目标到雷达的距离为  $0 \sim 30 \text{ km}$ 。

需要说明的是,由于目标的距离向尺寸会影响雷达回波的到达时间,为了保证成像质量,需要对脉冲的接收期进行适当拓宽。若雷达与第  $i$  个目标间距离为  $R_i$ ,第  $i$  个目标的距离向尺寸为  $\hat{S}_{y_i}$ ,则第  $i$  个目标的实际接收脉冲的宽度应设为:

$$t_{wi}' = \frac{2(R_i + \hat{S}_{y_i})}{c} \quad (17)$$

对比文献[15]中所述的雷达成像任务调度算法(下文称为传统算法)和基于脉冲交错的雷达成像任

务调度算法(下文称为本文算法)。为了能够有效接收所有成像目标的回波,将传统算法中的驻留等待期设置为雷达与最远目标之间波束的往返时间。以下给出 100 次仿真平均结果。

图 5 给出了传统算法和本文算法的 4 种性能指标对比。

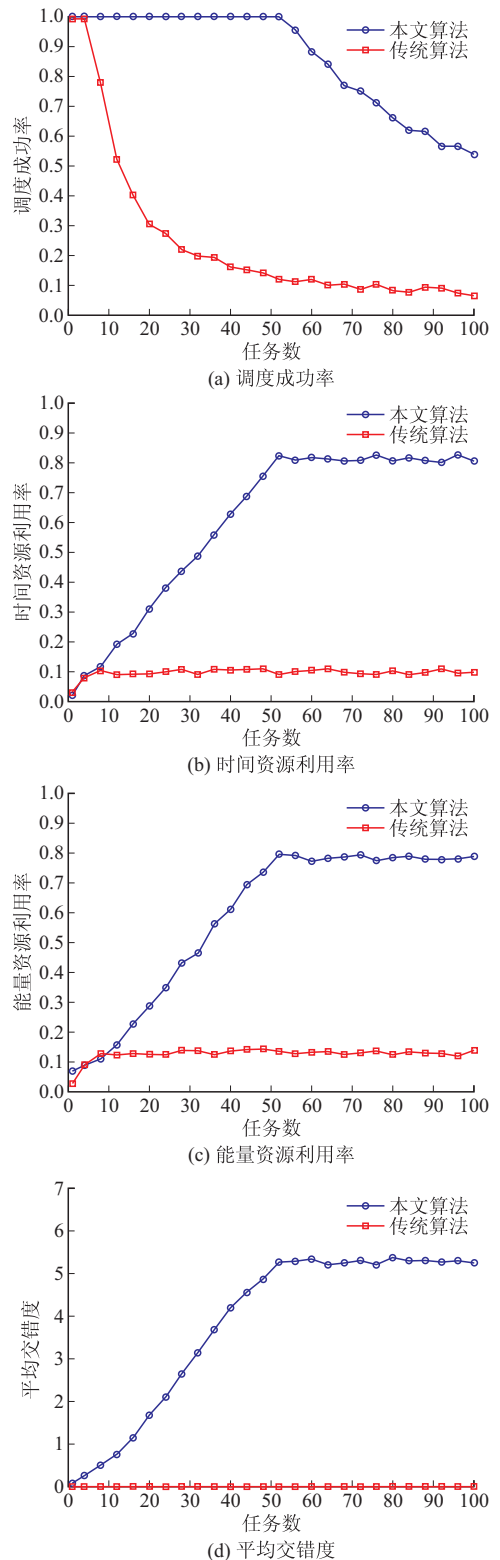


图 5 传统算法和本文算法的性能指标对比

Fig. 5 The comparison of two scheduling algorithms

从图 5(a)中可以看出,当任务数较少时,2 种算法均可以对所有成像任务进行成功调度,调度成功率均达到 100%。当任务数超过 6 以后,传统算法的调度成功率开始较大幅度下降,而本文算法仍然可以成功调度所有任务直到任务数达到 50。这是因为本文算法充分利用了任务脉冲间的空闲时间调度其它任务,较传统算法而言,可以更加充分地利用系统的时间资源。

图 5(b)和(c)中的变化曲线表明,由于本文算法充分利用了脉冲等待期的时间资源,在相同调度时间内成功调度的任务数多,使得系统时间资源利

用率和能量资源利用率均达到 80%左右,在成像任务数超过 6 之后,远远高于传统算法。

从图 5(d)中可以看出,在目标较少时,雷达资源充足,平均交错度随着任务数的增加而增加。当目标达到 50 时,平均交错度趋于平稳。这是由于系统的脉冲交错能力受到时间资源约束和能量资源约束的双重限制。当平均交错度不再增加时,系统的调度成功率达到饱和,此时系统的资源利用率达到最高。

在基于本文算法成功调度的成像任务中选取 3 个目标,将其分别与传统全孔径 ISAR 成像结果进行比较,结果见图 6。

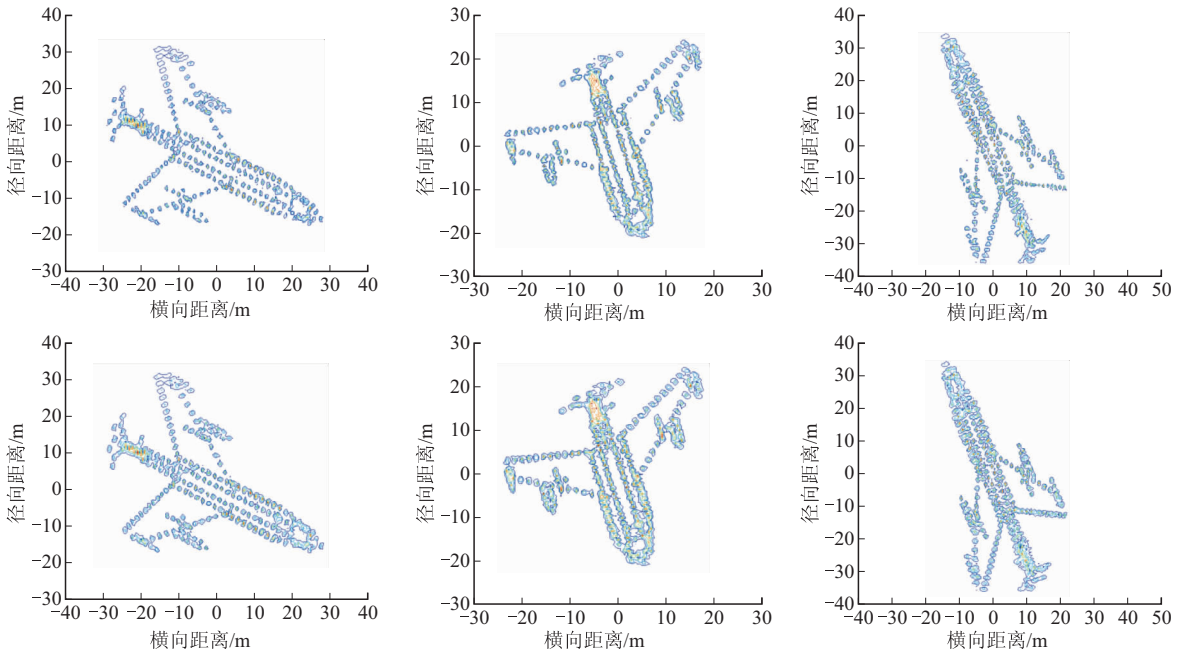


图 6 本文算法与传统全孔径成像效果对比

Fig. 6 The comparison of the conventional full aperture imaging result with the algorithm in this paper

采用峰值信噪比 (PSNR) 衡量本文方法的成像效果,峰值信噪比定义如下:

$$PSNR = 10 \lg \left( \frac{255^2}{MSE} \right) \quad (18)$$

式中均方误差 MSE 表示为:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [\hat{\sigma}(i, j) - \sigma(i, j)]^2 \quad (19)$$

其中  $\hat{\sigma}(i, j)$  表示本文稀疏孔径成像结果,  $\sigma(i, j)$  表示传统全孔径成像结果,  $m, n$  分别表示 ISAR 像矩阵的行数与列数。PSNR 的值越大说明成像效果越好。表 1 为传统全孔径成像结果与本文稀疏孔径成像结果峰值信噪比与均方误差。

表 1 成像结果的峰值信噪比与均方误差

Tab. 1 Peak SNR and mean square error of imaging results

	目标 1	目标 2	目标 3
PSNR/dB	43.89	39.44	40.81
MSE	2.653	7.391	5.235

可以看出,本文算法能够在并不明显降低成像

质量的前提下,大幅提高雷达工作效率。

## 4 结语

本文提出了一种基于脉冲交错的稀疏孔径 ISAR 成像的雷达资源自适应调度算法,建立了合理的脉冲交错驻留的资源调度模型,设计了时间与能量资源双重约束下在线脉冲交错的实现方法,通过仿真实验证明了:

1) 与传统调度算法相比,本文算法通过合理利用脉冲等待期的资源,大大提高了系统的调度成功率和资源利用率。

2) 在成像目标特征认知后,可以通过平均交错度的变化曲线推断出系统的饱和容量,使调度算法更有效。

3) 通过计算本文稀疏孔径成像结果与传统全孔径成像结果的峰值信噪比,可以看出,本文算法能够在显



著提高雷达资源利用率的同时,获得满意的成像质量。

## 参考文献(References):

- [1] 曾光, 卢建斌, 胡卫东. 多功能相控阵雷达自适应调度算法研究[J]. 现代雷达, 2004, 26(6): 14-18.  
ZENG G, LU J B, HU W D. Research on Adaptive Scheduling Algorithm for Multifunction Phased Array Radar[J]. Modern Radar, 2004, 26(6): 14-18. (in Chinese)
- [2] 张娟, 夏忠婷. 基于信息熵的自适应资源调度算法[J]. 现代雷达, 2015, 37(8): 33-36.  
ZHANG J, XIA Z T. An Adaptive Resource Scheduling Searching Method Based on Information Entropy[J]. Modern Radar, 2015, 37(8): 33-36. (in Chinese)
- [3] JANG D S, CHOI H L, ROH J E. A Time-Window-based Task Scheduling Approach for Multi-Function Phased Array Radars [C]// 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems. Daejeon, 2011: 1250-1255.
- [4] LEE C G, KANG P S, SHIH C S, et al. Radar Dwell Scheduling Considering Physical Characteristics of Phased Array Antenna [C]// Proceedings of the 24th IEEE International Real-Time Systems Symposium (RTSS'03). Columbus, 2003: 14-24.
- [5] 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): 1981-1987.  
LU J B, HU W D, YU W X. Adaptive Scheduling Algorithm for Real-Time Dwells in Multi Function Phased Array Radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(12): 1981-1987. (in Chinese)
- [6] 季明刚, 张友益. 多功能相控阵雷达资源综合调度算法研究[C]//电子技术学术委员会 2006 年学术年会电子技术学术论文集. 贵阳, 2006: 309-317.  
JI M G, ZHANG Y Y. Research on Adaptive Integrated Scheduling Algorithm for Multifunction Phased Array Radar[C]// Proceeding of 2006 Annual Conference of Electronic Technology Committee. Guiyang, 2006: 309-317. (in Chinese)
- [7] 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 Y, LI J X, CAO L Y, et al. Adaptive Scheduling Algorithm Based on Quadratic Programming for Multifunction Phased Array Radars[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(4): 698-703. (in Chinese)
- [8] 谢潇潇, 张伟, 陈杰, 等. 一种改进的相控阵雷达脉冲交错算法[J]. 雷达科学与技术, 2013, 4(2): 185-191.  
XIE X X, ZHANG W, CHEN J, et al. A Time Pointer Based on Line Pulse Interleaving Algorithm for Phased Array Radar[J]. Radar Science and Technology, 2013, 4(2): 185-191. (in Chinese)
- [9] CHENG T, LIAO W W, HE Z S. MIMO Radar Dwell Scheduling Based on Novel Pulse Interleaving Technique[J]. Journal of System Engineering and Electronics, 2013, 24(2): 234-241.
- [10] 赵洪涛, 程婷, 何子述. 数字阵列雷达波束驻留调度间隔分析算法[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(1): 17-21.  
ZHAO H T, CHENG T, HE Z S. Dwell Scheduling Algorithm Based on Analyzing Scheduling Interval for Digital Array Radar[J]. Information and Electronic Engineering, 2011, 9(1): 17-21. (in Chinese)
- [11] MOUSTAFA E, SHERALI H O, COLE S J. Radar Pulse Interleaving for Multi-Target Tracking[J]. Naval Research Logistics, 2010, 51(51): 72-94.
- [12] 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 T, HE Z S, LI H Y. An Adaptive Dwell Scheduling Algorithm for Digital Array Radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 2025-2029. (in Chinese)
- [13] 唐婷, 何子述, 程婷. 一种基于模板法的自适应雷达驻留调度算法[J]. 信号处理, 2010, 26(7): 998-1002.  
TANG T, HE Z S, CHENG T. A Template-Based Adaptive Radar Dwell Scheduling Algorithm[J]. Signal Processing, 2010, 26(7): 998-1002. (in Chinese)
- [14] 李文静, 陈红卫. 一种基于压缩感知的 ISAR 成像方法[J]. 计算机仿真, 2015, 32(8): 10-13.  
LI W J, CHEN H W. A Kind of ISAR Imaging Algorithm Based on Compressed Sensing[J]. Computer Simulation, 2015, 32(8): 10-13. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 李军, 邢孟道, 张磊, 等. 一种高分辨的稀疏孔径 ISAR 成像方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(3): 441-447.  
LI J, XING M D, ZHANG L, et al. High Resolution Imaging Method for the Sparse Aperture of ISAR[J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(3): 441-447. (in Chinese)
- [17] 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 G M, LIU D H, GAO D H, et al. Advance in Theory and Application of Compressed Sensing[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 1070-1081. (in Chinese)
- [18] 毕增军, 鲁力, 徐晨曦, 等. 相控阵雷达资源管理技术的发展与应用研究[J]. 现代防御技术, 2015, 43(5): 116-122.  
BI Z J, LU L, XU C X, et al. Development and Application of Phased Array Radar Resource Management[J]. Modern Defence Technology, 2015, 43(5): 116-122. (in Chinese)