

动态优先级下防空相控阵雷达在线交错调度算法

张浩为¹, 谢军伟¹, 师俊朋¹, 宗彬锋², 盛 川¹

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西西安 710051; 2. 94710 部队, 江苏无锡 214000)

摘 要: 针对防空相控阵雷达中时间资源分配主观性强、利用率低的问题, 结合任务内部结构, 提出一种新的在线交错调度算法. 该算法在将任务的重要性和紧急性均置于动态优先级的基础上, 使得雷达任务收、发波束之间的等待期可以用来执行其它任务的发射期或接收期. 仿真结果表明, 相比于任务模式优先级加截止期的调度算法, 所提算法的调度成功率、时间利用率和执行威胁率均得到有效提升.

关键词: 相控阵雷达; 调度算法; 动态优先级; 交错调度

中图分类号: TN954⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)01-0055-06

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.008

Online Interleaving Scheduling Algorithm over Dynamic Priority for the Air Defense Phased Array Radar

ZHANG Hao-wei¹, XIE Jun-wei¹, SHI Jun-peng¹, ZONG Bin-feng², SHENG Chuan¹

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China;

2. Unit 94710, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: Aiming at the subjectivity of the time resource allocation and the low utility of the time resource in the air defense phased array radar, a novel online task interleaving scheduling algorithm was proposed by considering the internal structure of the task. On the basis of setting the importance and the urgency of the task into dynamic priorities, the algorithm can execute other task's transmitting period or receiving period during the task waiting period. The simulations show that the proposed algorithm significantly improves the successful scheduling ratio, the time utilization ratio, and the treat ratio of execution compared with the highest task mode priority and earliest deadline first (HPEDF) algorithm.

Key words: phased array radar; scheduling algorithm; dynamic priority; interleaving scheduling

1 引言

防空相控阵雷达对时间资源的高效分配, 使其具有灵活、快速的波束捷变和波形自适应能力, 可以同时承担搜索、确认、跟踪等多种任务. 因此, 实现时间资源对雷达任务的优化分配, 对于充分发挥相控阵雷达的潜能有着重要意义^[1].

相控阵雷达中, 波束调度算法决定着雷达任务的时序安排, 相关的研究成果较多. 文献[2, 3]提出了高任务模式优先级优先 (high task mode priority first, HPF) 算法, 通过预先根据任务种类划分的优先级, 优先对高优先级的任务进行调度. 文献[4, 5]提出了时间平衡 (time balance, TB) 算法, 利用时间平衡值代表每个任务的紧迫程度, 优先对临近截止期的任务进行调度. 文献

[6~8]提出了基于队列的调度算法. 依照任务等级和参数值将任务划分为多个队列, 在每个队列中运用先入先出 (FIFO) 算法或截止期优先 (EDF) 算法进行任务调度. 文献[9~11]将任务的模式优先级和截止期映射到同一层面来计算任务的综合优先级, 并利用时间指针进行任务调度. 仿真结果表明, 算法比仅利用单个任务参数来计算优先级的算法^[1-5]性能更佳. 文献[12, 13]将成像任务考虑进调度过程中, 使得雷达在对不同目标进行跟踪的同时实现认知成像. 文献[14, 15]研究了圆台型相控阵雷达的调度方法. 随着研究的深入, 脉冲交错技术被提出, 其使得雷达收发、波束之间的等待期得到充分利用, 提升了时间资源的利用率, 但也增加了调度分析的复杂性. 文献[16~18]尝试用模板法进

行求解,通过打包在时间、能量限制下能够进行交错的任务,利用预置的模板进行任务调度.模板法简化了脉冲交错技术的应用,但由于模板多为离线设计,难以适应雷达工作环境的动态变化.为此,文献[19~21]提出了在线交错算法来调度雷达任务,其能够适应不同情况下的雷达负载,取得了较好效果.文献[22,23]提出了可变驻留时间的概念,使得任务调度更加灵活,但其认为雷达任务的综合优先级是事先已知的.

上述方法尚存在如下不足:一是算法中未能充分利用目标的先验信息;二是雷达任务仍属于人为划分任务模式优先级的范畴,并且由此来评定实现价值率的高低,受主观因素的影响较大.对此,文献[24]综合目标的威胁程度、任务驻留时间和任务截止期来调度雷达任务,使得雷达任务的重要性和紧迫性均可以动态变化.但文献[24]中的雷达任务模型被简化为非抢占式的单个驻留,没有考虑任务的内部结构,也没有利用脉冲交错技术.因此,在文献[24]的基础上,本文构建了更为通用的雷达任务模型,并提出一种新的在线脉冲交错调度策略,来构建基于动态优先级和在线脉冲交错技术的雷达调度算法.最后,通过一系列仿真实验,证明了算法的有效性.

2 基本理论建模

2.1 雷达任务模型

当雷达系统产生请求任务后,调度算法将根据任务请求和雷达资源约束对任务进行安排,调度结果可分为执行队列、延时队列和删除队列.延时队列中的任务将会被再次送往请求队列,以在后续时间内得到调度.执行队列和删除队列中的任务将分别被执行和舍弃.第 k 个相控阵雷达任务模型可以描述为:

$$T_k = \{P_k, t_{ak}, t_{xk}, t_{wk}, t_{rk}, P_{tk}, t_{duk}, w_k, t_{dk}, \Delta t_k, N_k, I_{nk}\} \quad (1)$$

式中, P_k 代表任务类型; t_{ak} 为任务的请求时刻; t_{xk} 为发射期持续时间; t_{wk} 为等待期; t_{rk} 为接收期持续时间; P_{tk} 为任务执行完毕时消耗的功率值; t_{duk} 为任务驻留时间; w_k 为任务时间窗; t_{dk} 为任务截止期; Δt_k 为任务的采样间隔; N_k 为任务的执行次数.在搜索、确认任务中, I_{nk} 可视为由上级提供的空情信息;在跟踪任务中, I_{nk} 为滤波算法预测所得的目标信息;失跟处理任务中, I_{nk} 为上一次成功执行对该目标跟踪任务后所得到的目标信息.其中,任务的整体驻留时间满足:

$$t_{duk} = t_{xk} + t_{wk} + t_{rk} \quad (2)$$

任务的等待期值 t_{wk} 由目标的距离决定.任务的截止期满足:

$$t_{dk} = t_{ak} + w_k \quad (3)$$

任务间请求时刻关系为:

$$t_{ak} = t_{e(k-1)} + \Delta t_k \quad (4)$$

式中, $t_{e(k-1)}$ 为上一次任务成功执行时刻. I_n 可表示为:

$$I_n = \{T_Y, R, v, \theta, h, p_{th}\} \quad (5)$$

式中, T_Y 代表目标类型; R 代表目标径向距离; v 代表目标速度; θ 代表目标角度; h 代表目标高度; p_{th} 代表目标威胁程度.式(5)中变量均满足文献[24]中的目标威胁模型.当缺乏目标的先验信息时,雷达任务将被看作为是非抢占式的单个驻留,其驻留时长 t_{duk} 由雷达的探测远界决定.在任务的调度过程中,调度器负责记录任务的执行次数 N_k .

2.2 雷达任务约束

2.2.1 时间资源约束

相控阵雷达调度任务是以调度间隔(Scheduling Interval, SI)为基础的.在一个调度间隔内,雷达要处理前一个调度间隔内的回波信号,同时要决定下一调度间隔内任务的执行情况.因此,一个调度间隔内成功执行的 N_1 个任务必须满足以下时间资源约束:

$$\sum_{k=1}^{N_1} (t_{xk} + t_{rk}) \leq t_{SI} \quad (6)$$

$$\max(t_{start}, t_{ak} - w_k) \leq t_{ek} \leq \min(t_{ak} + w_k, t_{start} + t_{SI} - t_{duk}) \quad (7)$$

式中, t_{start} 为调度间隔的开始时刻; t_{SI} 为调度间隔时长.若任务不满足执行要求,则会被延时执行或删除.传统算法^[3-13]将雷达任务看作是非抢占式的单个驻留,即一旦开始执行,便不能被中断.脉冲交错技术使得雷达任务收、发之间的等待期可以被用来交错执行其它任务的发射期或接收期,提升了雷达系统对时间的利用率.但雷达任务的发射或接收期不能被其它任务打断,否则会导致任务的执行失败.因此,成功执行的 N_1 个任务还需要满足以下约束:

$$\bigcap_{k=1}^{N_1} (t_{ek}, t_{ek} + t_{xk}) \cup (t_{ek} + t_{xk} + t_{wk}, t_{ek} + t_{xk} + t_{wk} + t_{rk}) = \emptyset \quad (8)$$

2.2.2 能量资源约束

实际中,由于散热性能的限制,雷达发射机必需实时满足暂态约束条件^[25]:

$$P_\tau(t) \leq \bar{P}_{\tau\max} \quad (9)$$

式中, $\bar{P}_{\tau\max}$ 为雷达瞬时消耗功率上限; $P_\tau(t)$ 为 t 时刻雷达消耗的功率,可具体表示为:

$$P_\tau(t) = \frac{1}{\tau} \int_0^t p(x) e^{(x-t)/\tau} dx \quad (10)$$

式中, $p(x)$ 为雷达的功率函数; τ 为回退参数,表征了雷达的散热性能.由于雷达接收期消耗的能量很小,在此忽略不计.

3 在线脉冲交错算法描述

为对时间资源进行充分利用,引入脉冲交错技术,

在文献[24]动态优先级的基础上,构造基于动态优先级和脉冲交错的调度算法.

图 1(a)和(b)为雷达任务交错执行的两种方式.其中,阴影的矩形框代表雷达任务 0,空白的矩形框代表雷达任务 1, t_{p0} 和 P_0 分别为调度开始时刻和功率消耗值.从中可以看出,在(a)和(b)两种情况下,交错执行的任务 0 和任务 1 在时间上需要分别满足以下条件:

■ 任务0 □ 任务1

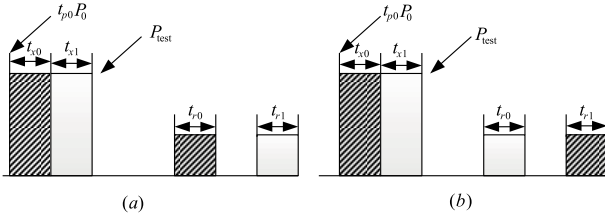


图1 雷达任务的两种交错方式

$$(a) \begin{cases} t_{u0} \geq t_{x1} \\ t_{r0} \leq t_{w1} \end{cases} \quad (11)$$

$$(b) \quad t_{u0} \geq t_{x1} + t_{w1} + t_{r1} \quad (12)$$

同时,交错执行的任务还需满足能量资源的约束.任务的交错执行使得调度分析更加复杂.因此,提出一种新的在线的交错分析方法,其包含时间约束分析和能量约束分析两部分:假设在一个调度间隔内有已按照预定条件排列的 N_{re} 个请求任务,分别记为任务 0, 1, 2, ..., $N_{re} - 1$. 调度开始后,初始化剩余时间轴为整个调度间隔时长: $[t_{start}, t_{end}]$, 令时间指针 $t_{p0} = t_{start}$. 其中, t_{start} 和 t_{end} 分别为调度间隔的开始和结束时刻,且满足 $t_{end} = t_{start} + t_{sr}$. 假设在 t_{p0} 时刻能够成功调度任务 0. 若任务 0 中的 t_{u0} 未知,则更新指针为 $t_{p0} = t_{p0} + t_{du0}$, 更新功率指针为:

$$P_0 = P_0 e^{-t_{du0}/\tau} + P_{i0} (1 - e^{-t_{du0}/\tau}) \quad (13)$$

然后,分析任务 1, 并将任务 1 置为任务 0. 若任务 0 中 t_{u0} 已知且任务 1 中 t_{w1} 未知,继续按以上步骤更新 t_{p0} 和 P_0 , 然后,对任务 1 的可调度性进行分析. 若任务 0 中 t_{u0} 已知且任务 1 中 t_{w1} 已知,则更新时间指针: $t_{p0} = t_{p0} + t_{x0}$. 此时,剩余时间轴被任务 0 的发射期和接收期划分为两部分: $[t_{p0}, t_{p0} + t_{u0}]$ 和 $[t_{p0} + t_{u0} + t_{r0}, t_{end}]$. 然后,对任务 1 的可调度性进行分析:首先检验任务 1 的发射期若在 t_{p0} 时刻调度,能否满足剩余时间资源约束:

$$\begin{cases} t_{p0} \geq t_{p0} \\ t_{p0} + t_{x1} \leq t_{p0} + t_{u0} \end{cases} \quad (14)$$

如果满足,则更新时间指针为 $t_{p0} = t_{p0} + t_{x1}$, 更新剩余空闲时间轴为 $[t_{p0}, t_{p0} + t_{u0} - t_{x1}]$, $[t_{p0} + t_{u0} - t_{x1} + t_{r0}, t_{end}]$. 继续检验任务 1 的接收期能否满足剩余时间资源约束:

$$\begin{cases} t_{p0} + t_{w1} \geq t_{p0} \\ t_{p0} + t_{w1} + t_{r1} \leq t_{p0} + t_{u0} - t_{x1} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} t_{p0} + t_{w1} \geq t_{p0} + t_{u0} - t_{x1} + t_{r0} \\ t_{p0} + t_{w1} + t_{r1} \leq t_{end} \end{cases} \quad (16)$$

当任务 1 的接收期满足式(15)或式(16)时,则任务 1 满足时间资源约束. 当任务 1 的发射期在 t_{p0} 时刻不能满足时间资源约束时,更新时间指针 $t_{p0} = t_{p0} + t_{u0} + t_{r0}$, 继续检验任务 1 的发射期能否在 t_{p0} 时刻调度:

$$\begin{cases} t_{p0} \geq t_{p0} \\ t_{p0} + t_{x1} \leq t_{end} \end{cases} \quad (17)$$

如果满足,则更新时间指针 $t_{p0} = t_{p0} + t_{x1}$, 剩余时间轴更新为 $[t_{p0} - t_{x1} - t_{r0} - t_{u0}, t_{p0} - t_{x1} - t_{r0}]$, $[t_{p0}, t_{end}]$. 然后,检验任务 1 的接收期能否满足剩余时间资源约束:

$$\begin{cases} t_{p0} + t_{w1} \geq t_{p0} \\ t_{p0} + t_{w1} + t_{r1} \leq t_{end} \end{cases} \quad (18)$$

若任务 1 满足时间资源约束,则继续分析能量资源约束;否则,滑动时间指针,更新相关参数为:

$$\begin{cases} t_{p0} = t_{p0} + \Delta t_p \\ P_0 = P_0 e^{-\Delta t_p/\tau} \end{cases} \quad (19)$$

式中, Δt_p 为预先设定的最小指针滑动步长. 继续检验任务 1 是否满足时间资源约束. 当任务 1 满足时间资源约束时,计算 P_{test} , 判断其是否满足能量约束. 若任务 1 满足能量约束,则调度该任务;若不满足能量约束,则按照式(19)滑动时间指针,更新相关参数,继续对任务 1 的可调度性进行分析. 其中, P_{test} 的计算公式为:

$$P_{test} = P_0 e^{-t_{u0}/\tau} + P_{i1} (1 - e^{-t_{u0}/\tau}) \quad (20)$$

当 $P_{test} \leq \bar{P}_{\tau_{max}}$ 时,任务 1 即满足能量约束条件. 在分析任务 2 的可调度性时,参照任务 1 的分析方式. 通过以上时间指针和剩余时间轴的更新,可以忽略任务进行交错的具体形式,从而大大简化任务可调度性的分析过程.

综上所述,基于脉冲交错的动态优先级调度算法具体步骤如下:

步骤 1 获取该调度间隔的初始参数:请求队列长度 N_{re} , 时间指针 t_{p0} , 结束时间 t_{end} , 任务功率指示参数 P_0 , 令 $i = 0$. 此时,剩余时间轴为 $[t_{p0}, t_{end}]$.

步骤 2 设申请任务队列中共有 M 个截止期小于 t_{p0} 的任务,将它们删除,则 $i = i + M$.

步骤 3 从申请任务队列中取出最早可执行时间小于等于 t_{p0} 的任务,按照文献[24]计算它们的综合优先级,选出最大优先级的任务 T_i .

步骤 4 按照式(11)~(18)判断 T_i 能否满足剩余时间约束,若能够满足,则根据式(20)计算调度后能否满足能量约束;若不能满足,则按照式(19)更新参数,然后,返回步骤 2. 若该任务能够同时满足能量约束,则在 t_{p0} 时刻调度执行该任务,更新相关参数,并令 $i = i + 1$.

步骤 5 当 $t_{p0} \geq t_{end}$ 或 $i \geq N_{re}$ 时, 转到步骤 6; 否则, 返回步骤 2.

步骤 6 遍历余下请求任务, 若任务满足延时条件, 则送入延时任务队列, 更新参数: $t_{ak} = t_{end}$, $w_k = w_k - (t_{end} - t_{ak})$; 反之, 送入删除队列.

步骤 7 调度间隔分析结束, 得到调度执行链表、延时任务链表和删除链表以及参数 t_{p0} 和 P_0 .

4 仿真校验

4.1 参数设定

整个系统仿真框架同文献[24], 以目标数量来代表不同情况下的雷达负载. 目标数量 10 ~ 100 批, 防空雷达精跟、普跟、监视目标数目之比为 2:3:5. 目标威胁模型中, 设定参数为: $R_1 = 250\text{km}$, $R_2 = 400\text{km}$, 其它参数设定同文献[24]. 指针最小滑动步长 $\Delta t_p = 0.5\text{ms}$, 仿真时长 50s (1000 个调度间隔). 每增加 10 批目标, 重复进行 100 次仿真实验. 仿真中, 选取调度成功率^[9-11]、执行威胁率^[24]和时间利用率^[16-20]作为评估指标. 对比本文算法、文献[11]中的 HPEDF 算法和文献[19]中的固定优先级交错算法(传统交错算法). 在文献[11, 19]的算法中, 任务由确认到搜索, 任务的模式优先级逐次递减.

4.2 仿真结果及分析

仿真结果如图 2 ~ 图 4 所示.

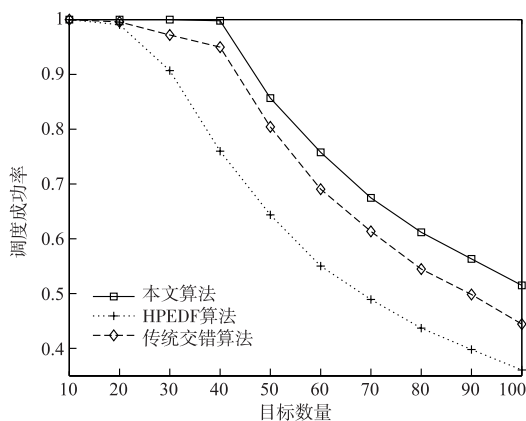


图2 调度成功率对比

图 2 为三种算法的调度成功率对比. 从中可以看出, 当跟踪目标数量超过 20 批时, HPEDF 算法和传统交错算法开始错失请求任务, 调度成功率开始下降; 而本文算法在跟踪目标数量达到 40 批时才开始错失请求任务. 雷达跟踪目标的最大数量得到有效提升. 其中, HPEDF 算法没有运用交错驻留技术, 因此, 调度成功率下降得最快. 而传统交错算法和本文算法均运用了交错驻留技术, 使得雷达驻留任务收、发之间的等待期得到充分利用. 但从图 3 可以看出, 本文算法更具优势, 调度成功率下降得更为缓慢.

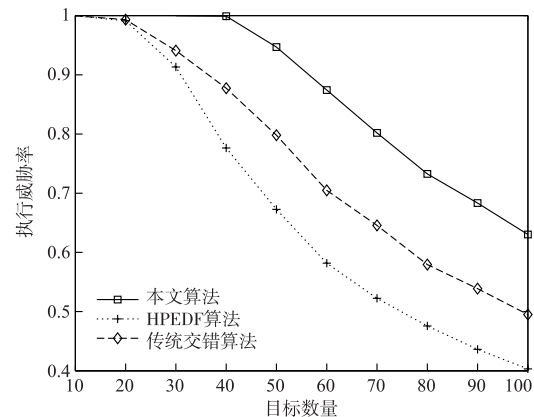


图3 执行威胁率对比

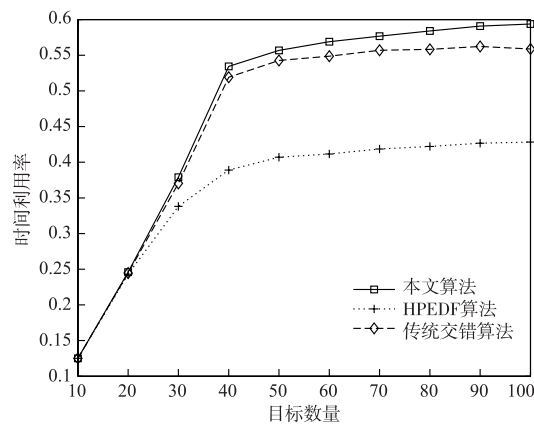


图4 时间利用率对比

图 3 为三种算法的执行威胁率对比. 与调度成功率相似, 本文算法取得的执行威胁率最高. HPEDF 算法由于未运用交错驻留技术, 取得的执行威胁率最低. 传统交错算法虽运用了交错驻留技术, 但任务的重要性由人为进行划分, 主观性较强. 因此, 取得的执行威胁率低于本文算法.

图 4 为三种算法的时间利用率对比. 从中可以看出, 当目标数量达到 100 批时, 在均运用交错技术的前提下, 传统交错算法的时间利用率维持在 55% 左右, 而本文算法的时间利用率最终维持在 60% 左右. 由于 HPEDF 算法未运用交错驻留技术, 取得的时间利用率最低, 在 43% 左右. 因此, 本文算法的性能最佳.

综合仿真结果可知, 传统交错算法中, 任务的重要性被人为固定; 而本文算法将任务的重要性和紧迫性均置于动态优先级中, 可以优先调度更加重要和紧急的任务. 并且本文算法运用了交错驻留技术, 使得任务的等待期得到充分利用, 因此, 本文算法的调度成功率、时间利用率和执行威胁率均高于传统交错算法. 相比于 HPEDF 算法, 当跟踪目标数量达到 100 批时, 本文算法的调度成功率提升了 43%, 时间利用率提升了 39%, 执行威胁率提升了 56%.

5 结论

针对防空相控阵雷达的波束调度问题,本文充分利用目标的先验信息,在进一步考虑雷达任务内部结构的基础上,提出了基于动态优先级和在线交错的调度算法:

(1) 充分利用目标的先验信息计算任务的重要性,克服了人为划分的不足.

(2) 引入脉冲交错技术,使得任务内部的等待期得以充分利用.

(3) 提出一种新的在线交错调度分析方法,通过时间资源约束分析和能量资源约束分析,降低了原有交错算法的复杂度.

(4) 与传统算法进行对比,仿真结果表明,本文算法相比于任务模式优先级加截止期的调度算法,调度成功率提高了 43%,时间利用率提高了 39%,执行威胁率提升了 56%.

参考文献

- [1] Miranda S L C, Baker C J, Woodbridge K, et al. Comparison of scheduling algorithms for multifunction radar [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2007, 1(6): 414 - 424.
- [2] Orman A J, Potts C N, Shahani A K, et al. Scheduling for a multi-function phased array radar system [J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, 90: 13 - 25.
- [3] 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)
- [4] BULTER J M. Multi-function Radar Tracking and Control [D]. London: UCL University of London, 1998.
- [5] Reinoso-rondinel R, Yu T Y, Torres S. Multifunction phased-array radar: Time balance scheduler for adaptive weather sensing [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(11): 1854 - 1867.
- [6] HUIZING A G, BLOEMEN A A F. An efficient scheduling algorithm for a multifunction radar [A]. *Proceedings of IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology-Revolutionary Developments in Phased Arrays* [C]. IEEE, 1996. 359 - 364.
- [7] Jimenze M I, Izquierdo A, Villacorta J J, et al. Analysis and design of multifunction radar task schedulers based on queue [A]. *Proceedings of 28th Digital Avionics Systems Conference* [C]. IEEE/AIAA Press, 2009. 295 - 302.
- [8] Jimenze M I, Del Val L, Villacorta J J. Design of task scheduling process for a multifunction radar [J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2012, 6(5): 341 - 347.
- [9] 卢建斌, 胡卫东, 郁文贤. 多功能相控阵雷达实时任务调度研究 [J]. *电子学报*, 2006, 34(4): 732 - 736.
Lu J B, Hu W D, Yu W X. Research on real-time scheduling algorithm for multifunction phased array radar [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(4): 732 - 736. (in Chinese)
- [10] LU J B, XIAO H, XI Z M, et al. Multifunction phased array radar resource management: real-time scheduling algorithm [J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2011, 7(2): 385 - 393.
- [11] LU J B, XIAO H, XI Z M, et al. Phased array radar resource management: task scheduling and performance evaluation [J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2013, 9(3): 1131 - 1138.
- [12] 陈怡君, 罗迎, 张群, 等. 基于认知 ISAR 成像的相控阵雷达资源自适应调度算法 [J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(7): 1566 - 1572.
CHEN Y J, LUO Y, ZHANG Q, et al. Adaptive scheduling algorithm for phased array radar based on cognitive ISAR imaging [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(7): 1566 - 1572. (in Chinese)
- [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] Galati G, Piracci E G. Scheduling methods for a conformal, phased array multifunction radar [A]. *Proceedings of the Second International Conference on Advances in Information Processing and Communication Technology* [C]. IEEE Press, 2015. 103 - 108.
- [15] Galati G, Madia F, Carta P, et al. Time for a change in phased array radar architectures-Part II: the d-radar [A]. *Proceedings of the Second International Conference on Advances in Information Processing and Communication Technology* [C]. IEEE Press, 2015. 918 - 923.
- [16] Lee C G, Kang P S, Shih C S, et al. Schedulability envelope for real-time radar dwell scheduling [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2006, 55(12): 1599 - 1613.
- [17] Gopalakrishnan S, Caccamo M, Shih C S, et al. Finite-horizon scheduling of radar dwells with online template construction [J]. *Real-Time Systems*, 2006, 33(1): 47 - 75.
- [18] Gopalakrishnan S, Caccamo M, Sha L. Sharp thresholds for scheduling recurring tasks with distance constraints [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2008, 57(3): 344 - 358.
- [19] Cheng T, He Z S, Tang T. Novel radar dwell scheduling algorithm based on pulse interleaving [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2009, 20(2): 247 - 253.
- [20] Cheng T, Liao W W, He Z S. MIMO radar dwell schedu-

- ling based on novel pulse interleaving technique[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24(2): 234 - 241.
- [21] 叶朝谋, 丁建江, 俞志强, 等. 基于周期分区的相控阵雷达任务交叉调度研究[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(2): 435 - 440.
- YE Z M, DING J J, YU Z Q, et al. Study on task interleaving scheduling of phased array radar based on period division[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(2): 435 - 440. (in Chinese)
- [22] Mir H S, Abdelaziz F B. Cyclic task scheduling for multi-function radar[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2012, 9(3): 529 - 537.
- [23] Mir H, Guitouni A. Variable dwell time task scheduling for multifunction radar[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2014, 11(2): 463 - 472.
- [24] 张浩为, 谢军伟, 师俊朋, 等. 饱和时序下防空相控阵雷达动态优先级调度方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(12): 2722 - 2729.
- ZHANG H W, XIE J W, SHI J P, et al. Dynamic priority scheduling for phased array radar in overload situations [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(12): 2722 - 2729. (in Chinese)
- [25] Ghosh S, Hansen J, Rajkumar R, et al. Integrated resource management and scheduling with multi-resource constraints[A]. Proceedings of the 25th IEEE International Real-Time Systems Symposium[C]. IEEE, 2004. 12 - 22.

作者简介



张浩为 男, 1992年2月出生于河北唐山. 2014年、2016年在空军工程大学防空反导学院分别获得学士学位和硕士学位. 现为该学院在读博士研究生, 研究方向为相控阵雷达资源管理.

E-mail: zhw_xhz@163.com



谢军伟 男, 1970年出生, 河南禹州人. 1993年、1996年和2009年在空军工程大学防空反导学院分别获得学士学位、硕士学位和博士学位. 现为该学院教研室主任, 博士生导师. 主要从事新体制雷达, 干扰与抗干扰方面的研究.

E-mail: xjw_xjw_123@163.com