

基于周期分区的相控阵雷达任务交叉调度研究

叶朝谋^{*①②} 丁建江^① 俞志强^① 蔡轶^①

^①(空军预警学院 武汉 430019)

^②(中国人民解放军 95112 部队 佛山 528227)

摘要: 传统相控阵雷达任务调度算法中,各单驻留任务不可分割,发射与接收之间的空闲等待时间未被有效利用,系统调度能力受限。针对此问题,该文在深入分析交叉规则及选取策略的基础上,提出一种基于采样周期最大公约数分区的任务实时交叉调度(PDI)算法,其可解决交叉调度过程中任务因采样周期不同而产生冲突的难题,该文还分析了调度算法流程,交叉算法流程及过载处理等。仿真结果表明,该算法可大幅提高系统调度的负载能力,调度性能明显优于传统算法。

关键词: 相控阵雷达; 资源管控; 任务交叉调度

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)02-0435-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00475

Study on Task Interleaving Scheduling of Phased Array Radar Based on Period Division

Ye Chao-mou^{①②} Ding Jian-jiang^① Yu Zhi-qiang^① Cai Yi^①

^①(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

^②(Unit 95112 of PLA, Foshan 528227, China)

Abstract: The waiting time between transmitting and receiving time is not used in conventional task scheduling methods for phased array radar in which dwell is impartible, thus system scheduling capacity is restrained. Based on analysis of dwell interleaving rules and rule selection guidelines, a dwell interleaving scheduling algorithm is proposed based on sampling period division, which can solve the task confliction issue caused by different sampling periods. The scheduling flow, interleaving flow and tactic for overload are also analyzed. The simulation results show that the proposed algorithm improves scheduling capability greatly and achieves better performance compared with conventional task scheduling algorithm.

Key words: Phased radar; Resource management; Task interleaving scheduling

1 引言

相控阵雷达波束快速扫描与波形捷变等技术优势的充分发挥需要解决好资源优化管理这一难题,驻留任务调度则是其中最为关键的技术之一。相关研究成果较多,如文献[1]提出的混合遗传调度算法具有较好性能但计算要求高。文献[2]提出的基于时间窗算法具有任务延迟控制优势。文献[3,4]通过综合两个属性参数得到任务综合优先级,使系统具有更高的调度能力。文献[5]提出的时长可变调度算法使任务调度更为灵活,调度能力得到提升。文献[6]提出了一种多波束情况下的整数规划模型及调度算法。然而,上述传统任务调度方法中发射与接收之

间的空闲等待时间未得到有效利用,因此系统最大调度负载能力受到限制。

针对上述不足,文献[7]首次提出的交叉调度思想有效利用了空闲等待时间,从而可进一步提高系统调度能力。后续相关研究也取得了若干成果,如文献[8]提出的基于优先级交叉算法使得系统调度能力得到一定程度的提高;文献[9,10]针对同时接收多波束的情形,提出的基于优先级的交叉调度算法也取得了较好的性能。文献[11,12]提出了宏观上的任务交叉调度规划方法;文献[13]则在其基础上提出了基于效益的交叉调度算法,但该算法任务时间窗要求高。文献[14]针对同时多波束能力的多普勒相控阵雷达,提出了相应的整数规划模型与交叉调度算法。另外,文献[15-17]分别提出的基于拉格朗日松弛技术算法、贪婪算法、基于时间指针算法在调度性能上均有所提高。但上述交叉调度方法仍未能有效解

2013-04-11 收到, 2013-10-16 改回

全军军事学研究生课题(2011JY002-537, 2012JY002-602)资助课题

*通信作者: 叶朝谋 1060623450@qq.com

决任务因采样周期不同而产生冲突的问题。针对此问题, 本文提出一种基于周期分区的任务实时交叉调度算法, 可有效解决上述难题。

2 任务模型

2.1 交叉调度驻留任务描述

交叉调度时任务描述除了包含单驻留任务各要素外, 还需要考虑各单驻留任务的区分以及能量限制等条件的影响。一般情况下, 交叉调度时驻留任务可由下列要素表示: $(M, t_a, t_d, t_e, I, P, \text{TI}, O)$, 其中 M 表示交叉驻留模式, 包含 5 个要素: (t, w, r, tt, E) , t 表示发射起始不可抢占持续时间, w 表示空闲时间, r 表示接收起始不可抢占持续时间, tt 表示实际发射时间 ($t \geq tt$), E 表示驻留任务能量消耗; t_a 表示任务到达时间; t_d 表示任务截止期; t_e 表示任务实际执行时间; I 表示任务优先级; P 表示交叉驻留采样周期; TI 表示交叉驻留所包含的各单驻留与首个单驻留的发射时间间隔数组; O 表示各单驻留的系统编号数组。

2.2 搜索任务模型

设搜索区域 i 分为 B^{si} 个搜索波位, 可得到该区域搜索任务模型为

$$\left. \begin{aligned} D_j^{si} &= \{D_j^i | j = 1, 2, \dots, B^{si}\} \\ D_j^{si} &= \{M^{si}, t_{aj}^{si}, t_{dj}^{si}, t_{ej}^{si}, I^{si}, P^{si}, \text{TI}_j^{si}, O_j^{si}\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 D_j^{si} 表示搜索区域 i 的第 j 波位驻留请求。

各驻留请求到达时间与截止期关系分别为

$$t_{a1}^{si} = t_0, t_{aj}^{si} = t_{a(j-1)}^{si} + T^{si}, j = 2, 3, \dots, B^{si} \quad (2)$$

$$t_{dj}^{si} = t_0 + P^{si} - (B^{si} - j + 1) \cdot T^{si}, j = 1, 2, \dots, B^{si} \quad (3)$$

2.3 跟踪任务模型

设跟踪任务 i 模型为

$$\left. \begin{aligned} D_j^{ti} &= \{D_j^i | j = 1, 2, \dots, B^{ti}\} \\ D_j^{ti} &= \{M_j^{ti}, t_{aj}^{ti}, t_{dj}^{ti}, t_{ej}^{ti}, I^{ti}, P^{ti}, \text{TI}_j^{ti}, O_j^{ti}\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 B^{ti} 表示对目标 i 的跟踪采样次数。

设发现目标后立即发射一个验证驻留, 且验证驻留后的首个跟踪驻留请求间隔时间可取为小于该类目标跟踪采样周期的任意值, 则该目标各驻留请求到达时间与截止期的关系为

$$\left. \begin{aligned} t_{a1}^{ti} &= t_{\text{cap}}, t_{a2}^{ti} = t_{e1}^{ti} + \Delta P^{ti} \\ t_{aj}^{ti} &= t_{e(j-1)}^{ti} + P^{ti} - \Delta t^{ti} / 2, j = 3, 4, \dots, B^{ti} \\ t_{d1}^{ti} &= t_{a1}^{ti} + \Delta t_1^{ti}; t_{dj}^{ti} = t_{aj}^{ti} + \Delta t_j^{ti}, j = 2, 3, \dots, B^{ti} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 t_{cap}^{ti} 表示该目标捕获时间; P^{ti} 为该目标跟踪采样周期; ΔP^{ti} 为验证驻留后首个跟踪驻留的采样间

隔; Δt_j^{ti} 表示验证驻留的时间窗; Δt^{ti} 表示目标 i 各驻留的时间窗。

3 驻留任务交叉规则

设有两驻留请求 D_1 与 D_2 , 且不失一般性地设等待时间 $w_1 \leq w_2$, 交叉后得到交叉驻留模块 D 。

(1) 若 $w_1 \leq T_2$, 此时驻留不存在包含关系, 可采用图 1 所示的交叉规则, 交叉时 w 取较大的空闲等待时间值。分析图 1 中交叉条件可知, 两驻留可能同时符合其中两种规则, 此时应采用使交叉后空闲时间较大的交叉规则。

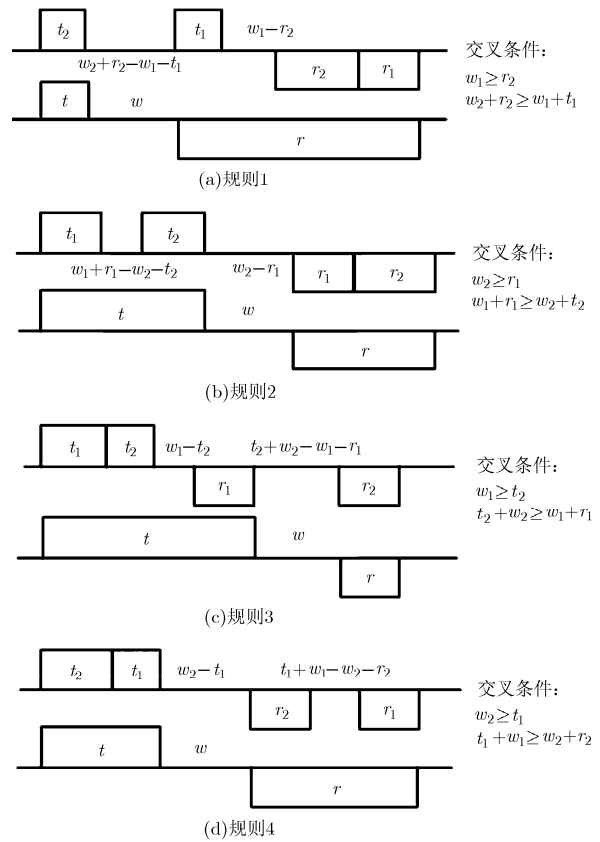


图 1 非包含关系时交叉规则

(2) 若 $w_1 \geq T_2$, 此时驻留存在包含关系, 可采用图 2 所示交叉规则。

4 任务调度算法

4.1 算法基本思想

设各类跟踪任务不同采样周期 P_k 组成的集合为 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_k, \dots, P_n\}$, 其最大公约数为 P_{gcd} 。

将各 P_k 平分为 N_k 个长度为 P_{gcd} 的标准区间

$$N_k = P_k / P_{\text{gcd}}, k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

再对标准区间进一步平分为 N_s 个标准调度分区 (记为 Plot), 则有 $\text{Plot} = P_{\text{gcd}} / N_s$,

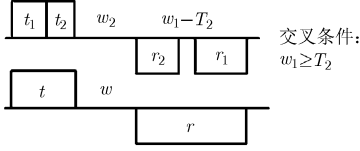


图 2 包含关系交叉规则示意图

$$N_s = \begin{cases} 1, & P_{gcd} < \min\{P_1, P_2, \dots, P_n\} \\ 2, & P_{gcd} = \min\{P_1, P_2, \dots, P_n\} \end{cases} \quad (7)$$

将某采样周期 P_k 跟踪任务集分为 $N_k \cdot N_s$ 个子任务集(表示为 t_k^{js})， t_k^{js} 占用时间长度设为 L_k^{js} 。调度时， t_k^{js} 将会分别在 P_k 的 $N_k \cdot N_s$ 个标准调度分区间中循环调度执行。于是某第 i 号标准调度分区间 $Plot_i$ 所包含的跟踪任务可表示为

$$Task_i = \sum_{k=1}^n t_k^{js}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

其中 $j = \text{mod}([i / N_s], N_k)$; $s = \text{mod}(i, N_s)$ 。

同时，在调度过程中需要保持 P_k 类各子任务集 t_k^{js} 负载相等；在 $Plot_i$ 内，各采样周期的任务子集分别集中在一个相对固定的时段内执行；且将跟踪任务占用时间之外的剩余时间尽量平均分配到各类跟踪任务子集结束时间点 E_k^s 之后。注意各 E_k^s 后须保留一定的空闲时间 R_k^s 作为目标失跟等任务备用时间。图 3 所示为采样周期 P_1 为 1 s, P_2 为 2 s 的两类跟踪任务的调度分配关系。

4.2 算法实现流程

各类任务在调度过程中将按标准调度分区间进行调度，具体算法实现流程如图 4 所示。

步骤 1 时间指针 tp 跳转至本标准调度分区间第 1 类跟踪任务的起始时刻 S_1^s ；

步骤 2 $k=k+1$ ；若 $k \leq n$ ，则交叉调度 P_k 类任务子集 t_k^{js} ， tp 跳转至 S_k^s ；若 $k > n$ ，跳转至步骤 5；

步骤 3 若 t_k^{js} 未调度完毕但 tp 已到达 E_k^s ，则转而执行下一类跟踪任务，跳转至步骤 2；

步骤 4 若 t_k^{js} 调度结束后， $tp < E_k^s$ ，则按任务优先级交叉调度搜索任务， tp 到达 E_k^s 或搜索任务执行完毕则转而执行下一类跟踪任务，跳转至步骤 2；注意，搜索发现新目标，则将其置于本类跟踪任

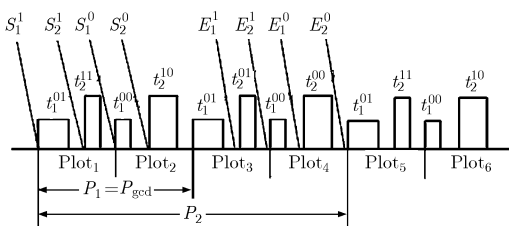


图 3 基于周期分区的任务调度关系

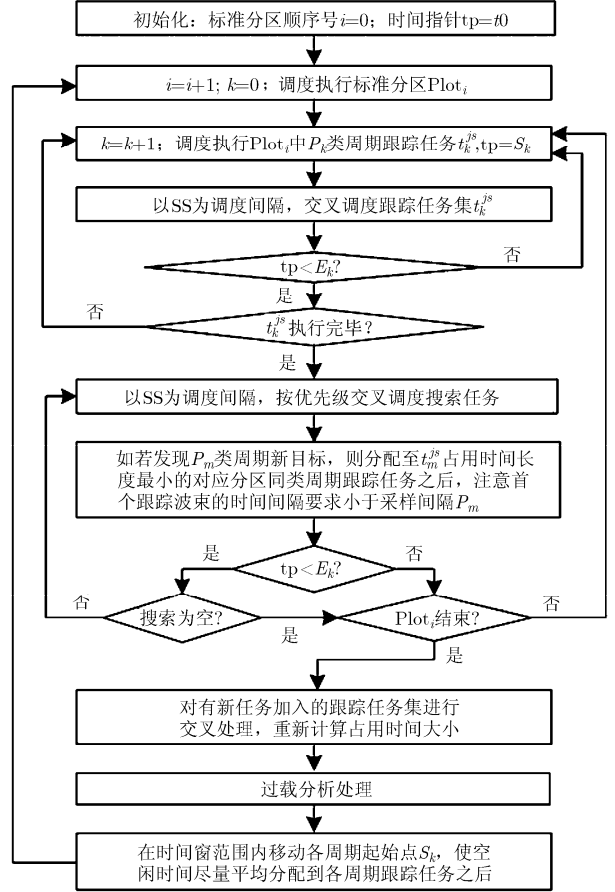


图 4 基于周期分区的任务交叉调度流程图

务子集最小 L_k^{js} 的对应跟踪任务子集列表之后，并确保首次采样周期不大于该类采样周期；

步骤 5 对有新任务加入的任务子集进行交叉，计算交叉后的占用时间长度；

步骤 6 进行负载分析与过载处理，若过载，则删除部分低优先级任务；

步骤 7 调整各类任务起始时刻 S_k^s ，使各类跟踪任务子集之后尽量平均分配空闲时间；

步骤 8 该标准调度分区间结束，转入下一标准调度分区间。

4.3 任务交叉流程

设落入某交叉间隔内的 n 个驻留请求按到达时间排序组成任务申请链表 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ ，具体交叉实现流程如图 5 所示。这里交叉间隔是指起始时间与本调度间隔相等，长度不小于调度间隔的一个时间范围，如可取为最大时间窗。

通常，系统还要求满足时间与能量的限制条件，可分别近似表示为^[11]

$$\left(1 - \frac{t+w+r}{A}\right)(TDC_{th} + tt) \leq TDC_{th} \quad (9)$$

$$\left(1 - \frac{t+w+r}{A}\right)(E_{th} + E) \leq E_{th} \quad (10)$$

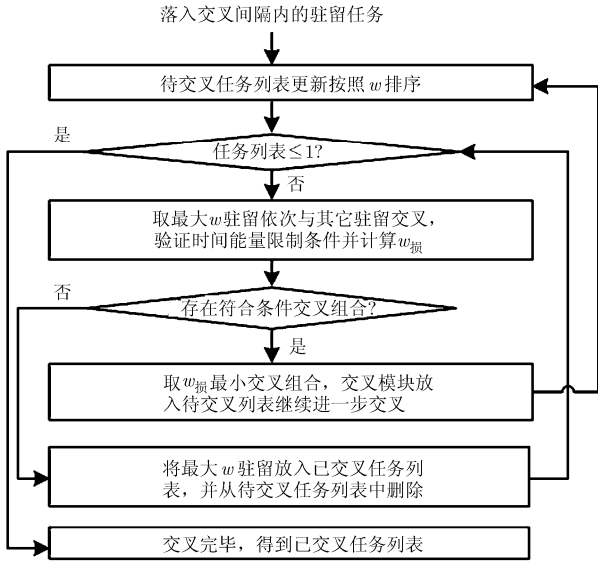


图 5 任务交叉流程

从上述算法实现流程来看, 某 $Plot_i$ 的计算负载主要在于该分区间内的任务交叉计算上。设调度间隔为 SS , 交叉间隔为 IS , 每个 IS 内约有 N 个单驻留任务, 则每个 IS 最多需要进行 $N!$ 次任务交叉计算, $Plot_i$ 内任务交叉计算的复杂度约为 $O(Plot/SS \cdot N!)$, 且实际中 $Plot/SS$ 与 N 值都不会很大。另外, 由于各类跟踪任务被均分到 $N_k \cdot N_s \geq 2$ 个标准调度分区间, 因此任一标准调度分区间有 $N_k \cdot N_s - 1 \cdot Plot$ 的计算时间, 因此系统对计算资源要求不高。

5 调度负载分析

定义任务时间占用率为任务集实际调度过程中占用时间与采样周期的比值。根据前面建立的任务模型及算法, 可得

某 P_k 类的跟踪任务时间占用率为

$$\eta_k^t = \sum_{j=1}^{N_k} L_k^j / P_k \quad (11)$$

某 i 区搜索任务的时间占用率为

$$\eta_i^{s'} = B^{s_i} \cdot T^{s_i} / P^{s_i} \quad (12)$$

任务总时间占用率为

$$\eta' = \eta^{t'} + \eta^{s'} = \sum_k \eta_k^{t'} + \sum_i \eta_i^{s'} \geq \eta \quad (13)$$

当 $\eta' \leq 1 - \sum R_k / P_{gcd}$ 时, 表示系统负载正常,

否则表示过载, 此时可根据实际需要采取适当的调整措施降低任务负载。

6 仿真结果与分析

仿真条件: 设 3 类目标任务参数如表 1 所示, 表中 w 为初始值且其值根据目标所处距离范围分段计算; 仿真时间为 150 s, 目标均向站直线飞行, 调度间隔为最小时间窗, 各类目标随机产生, 各目标直到仿真结束才消失; 任意 1 s 内的平均发射时间小于 400 ms, 能量消耗小于 200 kJ。图 6 为 1 类与 2 类目标数固定时, PDI 算法在较小时间窗时与某经典算法(HPI)^[16]最大负载能力对比, 图 7 为 PDI 在较小时间窗时与 HPI 算法的调度性能对比, 图 8 为 PDI 算法在不同时间窗条件下的调度性能对比; 图 6~图 8 中, PDI 算法的各类跟踪任务小时间窗取值分别为 30 ms, 50 ms, 60 ms, 大时间窗分别为 50 ms, 100 ms, 150 ms, HPI 算法的时间窗为采样周期。

仿真结果分析:

(1)由图 6 可知, 当满足采样周期整数倍关系的 1 类与 2 类目标数越小时, PDI 算法最大负载率高于 HPI 算法; 两个算法的最大负载率明显高于非交叉算法的理论最大负载能力 100%。

(2)由图 7 可知, HPI 算法未发生调度失败, 但时间窗要求为采样周期, 实际中难以满足; PDI 算法当新目标在较短时间内集中大量产生时, 发生了新任务调度失败现象, 但能满足较严格时间窗要求且系统负载率大于 HPI 算法。

表 1 雷达任务参数表

工作方式	优先级	发射功率(kw)	驻留参数 t, w, r (ms)	时间窗(ms)	波位数	速度(km/s)	采样周期(s)
搜索 3	1	300	0.7, 0, 3.3		64		3
搜索 2	2	400	1.5, 3.8, 2.8		24		2
搜索 1	3	500	2.0, 7.0, 3.0		18		2
跟踪 3	4	300	0.5, -, 1.0	60~150		2.0	3
跟踪 2	5	400	1.2, -, 1.7	50~100		1.5	2
跟踪 1	6	500	1.5, -, 2.0	30~50		0.5	1
验证 3	7	300	0.7, 0, 3.3	30~50			
验证 2	8	400	1.5, 3.8, 2.8	30~50			
验证 1	9	500	2.0, 7.0, 3.0	30~50			

注: “-” 表示跟踪方式时, w 是可以变的。

(3)由图 8 可知, PDI 算法具有较好的时间窗适应性, 在更小的时间窗条件下性能无明显下降; 且负载饱和时系统可按优先级进行过载任务删除。

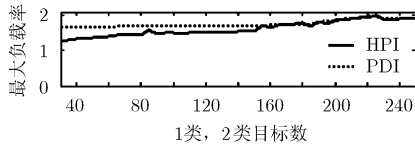
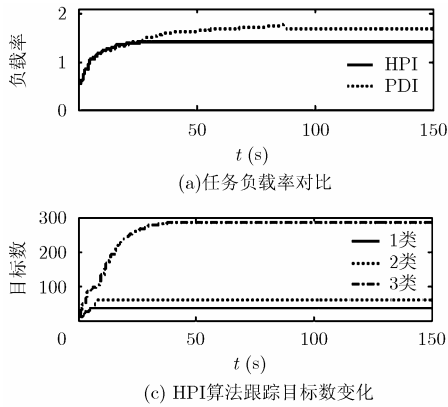


图 6 1 类, 2 类目标数固定时最大负载率对比



7 结束语

本文针对传统相控阵雷达任务调度方法最大负载能力受限的问题, 提出了一种基于采样周期最大公约数分区的实时任务交叉调度算法, 该算法可解决任务调度时因采样周期不同而产生冲突的难题, 从而进一步提高了系统调度能力。仿真结果表明, 该算法是有效可行的, 可应用于相控阵雷达调度器设计, 且对一般实时调度系统也有参考价值。

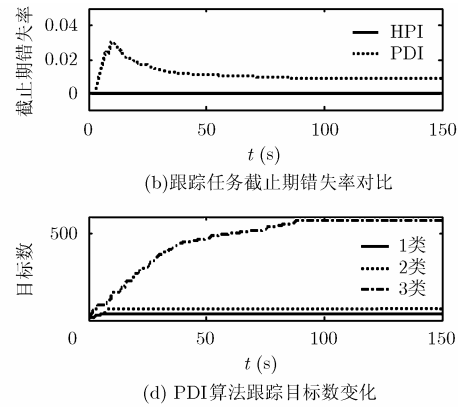


图 7 调度性能对比

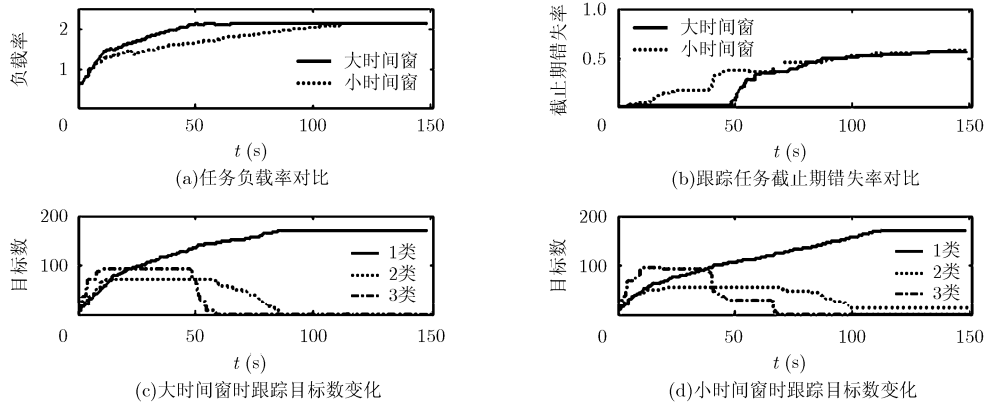


图 8 PDI 不同时间窗时的调度变化

参 考 文 献

[1] 周颖, 王国玉, 王雪松, 等. 基于启发式混合遗传算法的相控阵雷达最优化调度[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(7): 992-996.
Zhou Ying, Wang Guo-yu, Wang Xue-song, *et al.*. Optimal scheduling using hybrid GA with heuristic rules for phased array radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(7): 992-996.

[2] Jang D S, Choi H L, and Roh J E. A time-window-based task scheduling approach for multifunction phased array radars[C]. 11th International Conference on Control, Automation and Systems, KINTEX, Gyeonggi-do, Korea, 2011: 1250-1255.

[3] 卢建斌. 相控阵雷达资源优化管理的理论与方法[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2007.
Lu Jian-bin. Theory and method of resource optimization and management for phased array radars[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2007.

[4] Lu Jian-bin, Xiao Hui, Xi Ze-min, *et al.*. Phased array radar resource management: task scheduling and performance evaluation[J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2013, 9(3): 1131-1138.

[5] Mir H and Abdelaziz F B. Cyclic task scheduling for

- multifunction radar[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2012, 9(3): 529-537.
- [6] Chen Jie, Tian Zhon, Wang Lei, *et al.* Adaptive simultaneous multi-beam dwell scheduling algorithm for multifunction phased array radars[J]. *Journal of Information & Computational Science*, 2011, 8(14): 3051-3061.
- [7] Farina A and Neri P. Multitarget interleaved tracking for phased array radar[J]. *IEE Proceedings F Communications, Radar and Signal Processing*, 1980, 127(4): 312-318.
- [8] Izquierdo-Fuente A and Casar-Corredera J R. Approach to multifunction radar scheduling simulation[C]. IEEE National Telesystems Conference, San Diego, CA, 1994: 67-70.
- [9] Cheng Ting, He Zi-shu, and Li Hui-yong. Adaptive dwell scheduling for digital array radar based on online pulse interleaving[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2009, 18(3): 574-578.
- [10] Cheng Ting, He Zi-shu, and Tang Ting. Novel radar dwell scheduling algorithm based on pulse interleaving[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2009, 20(2): 247-253.
- [11] Lee C G, Kang P S, Shih C S, *et al.* Radar dwell scheduling considering physical characteristics of phased array antenna [C]. IEEE Real-Time Systems Symposium, Cancun, Mexico, 2003: 14-24.
- [12] 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.
- [13] Lee C G. A novel framework for quality-aware resource management in phased array radar systems[C]. Proceedings of the 11th IEEE Real Time and Embedded Technology and Applications Symposium, San Francisco, 2005: 322-331.
- [14] Jang D S and Choi H L. Heuristic pulse interleaving algorithms for multi-target tracking on pulse doppler phased array radars[C]. IEEE International Conference on Radar, Atlanta, GA, 2012: 558-563.
- [15] Elshafei M, Shirali H D, and Smith J C. Radar pulse interleaving for multi-target tracking[J]. *Naval Research Logistics*, 2004, 51(1): 72-94.
- [16] Mir H S and Wilkinson J D. Task scheduling algorithm for an air and missile defense radar[C]. IEEE Radar Conference, Rome, 2008: 1-6.
- [17] Xie Xiao-xiao, Zhang Wei, and Chen Ming-yan. A novel time pointer-based fast radar pulse interleaving algorithm[C]. 5th International Congress on Image and Signal Processing, Chongqing, 2012: 1870-1874.
- 叶朝谋: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为雷达组网资源管控。
- 丁建江: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达组网、目标智能检测与识别。
- 俞志强: 男, 1964年生, 教授, 主要研究方向为雷达系统与目标识别。