

文章编号: 1672-2892(2011)01-0017-05

数字阵列雷达波束驻留调度间隔分析算法

赵洪涛, 程 婷, 何子述

(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要: 针对数字阵列雷达波束驻留调度问题, 研究了基于调度间隔分析的调度算法。该算法综合分析了 1 个调度间隔内申请执行的波束驻留任务, 且调度过程中进行了脉冲交错。调度准则充分考虑了任务的工作方式优先级和截止期, 并以任务丢失率、实现价值率、系统时间利用率作为评估指标。仿真结果表明修正截止期准则主要强调任务的紧迫性, 修正工作方式优先级主要强调任务的重要性, 而截止期—工作方式优先级和工作方式—截止期调度准则可以在二者间更好地折中, 在总体性能上要优于其他调度准则。

关键词: 数字阵列雷达; 驻留调度; 脉冲交错; 时间约束; 能量约束; 综合优先级

中图分类号: TN958.92

文献标识码: A

Dwell scheduling algorithm based on analyzing scheduling interval for digital array radar

ZHAO Hong-tao, CHENG Ting, HE Zi-shu

(School of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: Aiming at the problem of beam-dwell scheduling for digital array radar, the algorithm based on analyzing scheduling interval was studied. This algorithm analyzed the dwells applied to be executed in one scheduling interval and introduced pulse interleaving. The scheduling criterion took both priorities and deadlines into account fully, with the Task Drop Ratio, Hit Value Ratio, Time Utilization Ratio as evaluation indexes. The simulation results showed that the modified deadline criterion mainly emphasized the urgency of tasks, while the modified priority criterion mainly emphasized the importance of tasks; the deadline-priority and priority-deadline scheduling criterions could make good balance between urgency and importance, thus superior to other criterions in overall performances.

Key words: digital array radar; dwell scheduling; pulse interleaving; time constraint; energy constraint; synthetic priority

数字阵列雷达是一种发射和接收均采用数字波束形成技术的全数字化相控阵雷达。与传统相控阵雷达相比, 数字阵列雷达具有探测复杂目标能力强, 抗干扰能力强, 复杂地形环境适应能力强, 探测精确度高, 实现多功能能力强等优势^[1-2], 因而越来越受到人们的关注。数字阵列雷达性能的充分发挥以有效的波束驻留调度算法为基础。驻留调度是指在雷达时间、能量资源的约束下, 如何实时地平衡雷达事件请求来选取最佳调度序列的一种管理机制。目前, 常用的驻留调度算法包括模板法^[3-4]和自适应调度方法^[5-7], 其中模板法中的模板均离线设计完成, 缺乏对系统工作环境的灵活性和适应性, 因此自适应波束驻留调度算法被视为最有效的一类方法。文献[7]中的自适应波束驻留调度算法综合分析在各调度间隔内申请执行的驻留任务, 这种基于调度间隔分析的调度算法适用于传统相控阵雷达。鉴于数字阵列雷达的全数字信号处理特征, 文献[8]在传统基于调度间隔分析的调度算法中加入了脉冲交错, 使之更加适用于数字阵列雷达, 文中算法所考虑的调度准则为工作方式优先级—截止期准则, 未分析其他调度准则下算法的调度性能。针对该问题, 本文将全面地考虑以截止期和工作方式优先级这 2 个参数为基础的调度准则, 对基于调度间隔的调度思想在修正截止期、修正工作方式优先级以及截止期—工作方式优先级多种综合优先级调度准则下进行分析。这几种准则本质上是将这 2 个量纲完全不同的参数映射到同一层面上, 再进行一定的加权, 使其能够适应不同的负载情况。文中以任务丢失率(Task Drop Ratio, TDR)、实现价值

率(Hit Value Ratio, HVR)、系统时间利用率(Time Utilization Ratio, TUR)作为评估指标,将多种综合优先级调度准则下的算法性能进行比较,仿真结果为数字阵列雷达实际应用基于调度间隔分析的调度算法提供了综合优先级的选择依据。

1 问题模型

1.1 任务模型

雷达波束驻留任务可用下述模型描述:

$$T = \{w, rt, d, pri, M, P\} \quad (1)$$

式中: T 表示驻留任务; w 为工作方式优先级; rt 为任务的到达时间; d 为截止期; pri 为脉冲重复周期; M 为脉冲重复个数; P 为发射功率。由于接收功率非常小,所以忽略不计。在线调度时可以根据跟踪驻留的目标预测位置或者搜索驻留的搜索区域范围计算出驻留任务的具体参数,如发射期、第 1 等待期、第 2 等待期和接收期等。数字阵列雷达任务调度采用新式脉冲交错技术,即前 1 个驻留任务的等待期可以用来执行其他驻留任务的发射或者接收子任务,且不同驻留任务的等待期和接收期可以在时间上重叠。

1.2 约束条件

由于数字阵列雷达采用不同于传统相控阵雷达的脉冲交错技术^[9],雷达长时间处于发射波束状态,系统消耗能量将持续上升,所以必须考虑能量约束,防止其过热损坏。系统消耗能量 $E(t)$ 可表示为^[10]:

$$E(t) = \int_0^t \left[P(x) e^{\frac{(x-t)}{\tau}} \right] dx \quad (2)$$

式中: $P(x)$ 为系统功率函数; τ 为回退函数,它表征了系统自身的散热性能。

若 E_{th} 表示系统能承受的消耗能量,则必须有:

$$E(t) \leq E_{th} \quad (3)$$

此外,为了能够实现交错调度,需要满足一定的时间约束。所有调度执行的任务必须在截止期前执行完成;执行脉冲交错时,执行任务的发射期之间以及发射期与接收期之间在时间上不会发生冲突。

2 算法描述

2.1 综合优先级表的设计

由于在固定优先级调度算法中,任务的优先级在调度处理之前固定并已知,这并不适应于数字阵列雷达任务动态变化的特点,因此对于数字阵列雷达系统的任务调度而言,动态优先级调度算法是其关注的重点。数字阵列雷达调度任务的执行过程需要在系统时间和能量的约束下,而设计调度的算法则需要遵循一定的调度优先级原则以及时间的约束。优先级原则保证了高优先级任务的首先调度执行。本文综合考虑截止期和工作方式优先级这两个参数,对基于调度间隔分析的算法在以下各种不同调度准则下进行比较:修正工作方式优先级调度(Modified Highest Priority First, MHPF),修正截止期优先级调度(Modified Earliest Deadline First, MEDF),工作方式优先级—截止期调度(Highest Priority Earliest Deadline First, HPEDF),截止期—工作方式优先级调度(Earliest Deadline Highest Priority First, EDHPF)。

MHPF 为修正的工作方式优先级准则,此准则把工作方式优先级作为首要考虑的因素,截止期为次要考虑的因素,即进行优先级排序时先按照工作方式优先级排序,工作方式优先级相同则按照截止期优先级进行排序。

MEDF 为把工作方式作为次要优先级的修正截止期优先级调度准则,即截止期早的任务不管其工作方式优先级的大小,其综合优先级都要高于其他任务。

HPEDF 为文献[8]中采用的准则。

EDHPF 为截止期—工作方式优先级调度准则。这种调度策略,可以在 2 个参数中进行一定的折中,均衡考虑。即在对任务进行优先级排序时,首先按照综合优先级排序,综合优先级相同则按照截止期最早进行排序。综合优先级可用下式计算出:

$$sp_i = Nd_i + Np_i \quad (4)$$

式中: sp_i 表示任务 T_i 综合优先级; Nd_i 和 Np_i 表示任务 T_i 在截止期和工作方式优先级中的序号。

2.2 算法基本思想

该算法又被形象地称为任务寻找执行时刻点算法,即具体的一个任务在可以利用的空闲时间段内找寻最适合调度执行的时间隙。假设有 N 个波束驻留任务申请在调度间隔 $[t_0, t_e]$ 内执行,该算法的基本原理如下:

- 1) 根据 2.1 节计算各驻留任务的综合优先级,并将驻留任务请求按照综合优先级高低顺序进行排列,令 $i=1$, $t_{\text{remain}}=t_e-t_0$;
- 2) 取任务 T_i ,考察该任务是否已被交错执行。若是,则转步骤 3),否则转步骤 4);
- 3) $i=i+1$,若 $i \leq N$,则转步骤 2),否则转步骤 7);
- 4) 根据 T_i 的期望执行时刻和截止期确定在该调度间隔内可执行时间范围 $[t_1, t_2]$,并在其中寻找满足 $t_1 + \text{pri}_{T_i} \cdot M_{T_i} \leq t_2$ 的空闲时间段,其中 t_1 为空闲时间段的起始时刻, t_2 为空闲时间段的结束时刻。一旦找到满足条件的空闲段,则计算若在 t_1 调度执行任务 T_i 时,该驻留任务每个脉冲重复周期中发射期及驻留任务结束时刻的系统能量消耗值 $E_{\text{test}}(l), l=1, 2, \dots, M_{T_i}$ 和 $E_{\text{end}}^{[7]}$ 。同时,计算在此任务后面已调度执行驻留任务各脉冲重复周期内发射期结束时刻的能量消耗值 $E_{p_test}(l), l=1, 2, \dots, M_p, p=1, 2, \dots, P^{[7]}$,若满足能量以及时间约束^[7],进入步骤 6);若未找到满足条件的空闲时间段或不满足约束条件,则转步骤 5);
- 5) 判断 T_i 的最晚可执行时刻是否满足大于 t_e ,若是则将该任务放入延迟队列,否则删除该任务。令 $i=i+1$,若 $i \leq N$,则返回步骤 2),否则转步骤 7);
- 6) 在未调度分析的任务中取出与 T_i 具有相同脉冲重复周期和个数的任务,按文献[7]判断它们能否与 T_i 交错执行,若交错成功,则更新能量参数;若不存在这种任务或是交错失败,则 $i=i+1, t_{\text{remain}}=t_{\text{remain}} - \text{pri}_{T_i} \cdot M_{T_i}$ 。若 $i \leq N$ 且 $t_{\text{remain}} \geq \min(\text{pri}_{T_j} \cdot M_{T_j}), j=i, i+1, \dots, N$,则返回步骤 2),否则转步骤 7);
- 7) 调度分析结束。

3 仿真分析

3.1 仿真场景的设置

仿真中选取搜索、验证和跟踪这 3 种雷达工作方式。

搜索分地平线搜索和空域搜索。跟踪任务分为普通跟踪和精密跟踪,这 2 类跟踪任务所跟踪的目标数目之比为 4:1。雷达空域搜索监视范围为 30 km~120 km,地平线搜索监视范围为 30 km~150 km,精密跟踪目标出现在 30 km~60 km 范围内,普通跟踪目标出现在 60 km~120 km 范围内。

仿真中目标的飞行速度在 100 m/s~230 m/s 之间随机选取。所有任务的脉冲重复个数为 8,且其中发射期长度为 40 μs ,表 1 给出了其他的驻留任务参数。整个仿真时间为 8 s,调度间隔为 50 ms, $E_{\text{th}}=10 \text{ J}$, $\tau=200 \text{ ms}$ 。仿真中,对于每个目标的捕获时刻,假定是从仿真起始时刻到该目标第 1 个跟踪采样周期内随机选取,目标消失时刻为仿真结束时刻。

表1 雷达驻留任务参数表
Table1 Parameters of radar tasks

task type	priority	dwel time/ms	transmitting power/W	dwel number	time window/ms	period/s
confirmation	5	6.8	200	1	15	-
precise tracking	4	3.6	100	1	15	0.5
normal tracking	3	6.8	180	1	25	1.0
horizon searching	2	8.4	180	100	-	2.0
airspace searching	1	7.2	200	150	-	4.0

在该场景下,对比分析了数字阵列雷达基于时间指针分析的波束驻留调度算法在不同调度准则下的调度性能。这里从 3 个方面对算法性能进行评估,包括 $TDR, HVR^{[11]}, TUR$ 。

$$TDR = N'' / N_{\text{total}} \quad (5)$$

$$HVR = \frac{\sum_{i=1}^N w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (6)$$

$$TUR = (T_x + T_r) / T_{\text{total}} \quad (7)$$

式中: N'' 为未被调度成功的任务数; N_{total} 为申请调度执行的任务总数; N' 为实际调度执行的任务数; w_i 表示工作方式优先级; T_x 表示总的仿真时间内总的发射时间; T_r 表示总的仿真时间内总的接收时间; T_{total} 代表总的仿真时间。

3.2 仿真结果与分析

下面给出不同调度准则下，100 次蒙特卡罗仿真实验平均效果图。

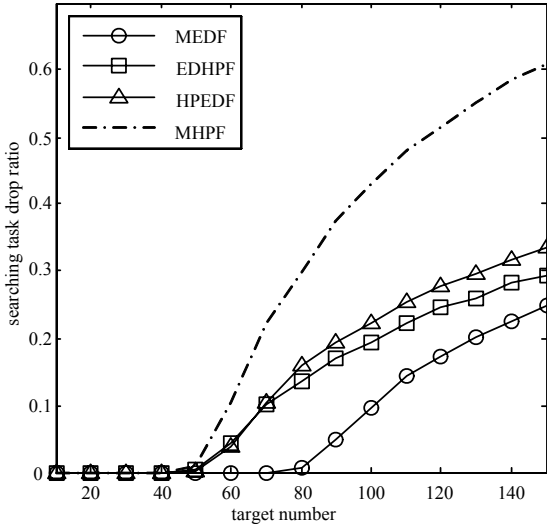


Fig.1 Drop ratio curves for searching task
图1 搜索任务丢失率

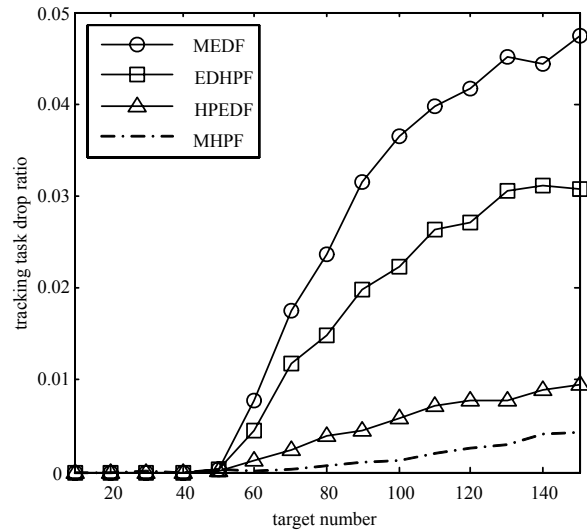


Fig.2 Drop ratio curves for tracking task
图2 跟踪任务丢失率曲线

图 1 和图 2 为搜索和跟踪任务丢失率曲线。可以看出，当目标数目小于 50 时，由于申请调度的任务较少，所有任务都可以被调度执行，所以任务丢失率为零。当目标数目进一步增大时，所有调度准则下的算法都开始丢失任务。MHPF 准则删除掉的任务基本上为低优先级搜索任务，即保证了高优先级跟踪任务的执行；MEDF 准则基本上没有考虑任务的工作方式优先级，虽然该算法删除的搜索任务最少，但是其删除了一定量的高优先级跟踪任务；而 EDHPF 和 HPEDF 准则却能在删除较少搜索任务的同时，基本上保证了跟踪任务的执行。

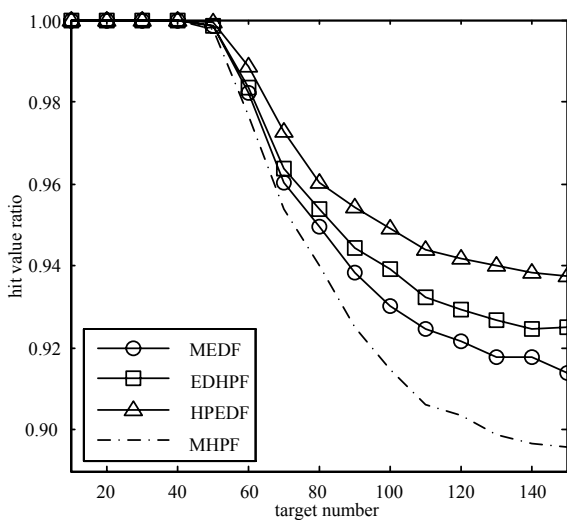


Fig.3 Curves for hit value ratio
图3 实现价值率曲线

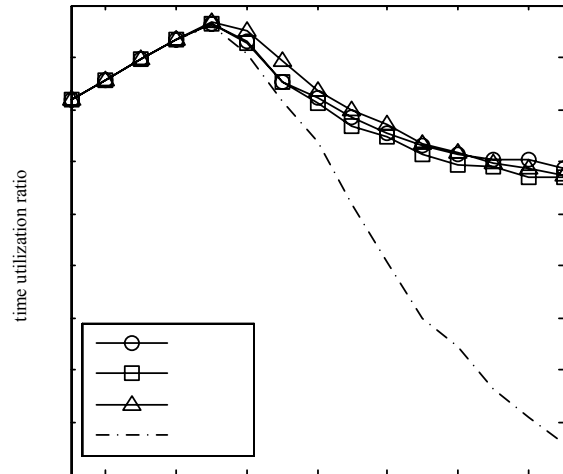


Fig.4 Curves for time utilization ratio
图4 时间利用率曲线

图 3 为实现价值率曲线。与任务丢失率曲线类似，当目标数目较小时，所有任务都可以被调度执行，所考虑调度准则下的实现价值率均为 1。当目标数目增大到 50 时，实现价值率开始下降，由图可见 MHPF 准则的下降速度最快，HPEDF 准则实现价值率最高。其余 2 个准则居中。

图 4 为时间利用率曲线。从曲线整体趋向可看出，系统的时间利用率呈 \wedge 型分布，在任务数达到 50 时，系统的时间利用率达到最高点。而在所有的准则中，MHPF 准则的时间利用率是最低的，其余准则下调度算法时间利用率相似。

根据仿真结果可知，在进行驻留任务的调度时，若强调时间紧迫性，需要更多的任务在期望时间内调度执行，则可以优先考虑 MEDF 准则；若强调任务的重要性，即优先级越高的任务越早调度，则可以优先考虑 MHPF 准

则；若同时强调任务的重要性和紧迫性，HPEDF 和 EDHPF 准则能进行较好的折中，可以在保证高优先级任务执行的同时，调度执行较多的任务，其调度性能要优于其他调度准则。

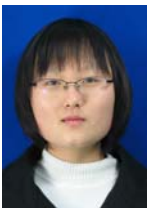
4 结论

本文对基于调度间隔分析的数字阵列雷达波束驻留调度算法进行研究，调度准则综合考虑了任务的工作方式优先级和截止期。调度算法在不同的调度准则下表现出不同的调度性能，实际应用中，需根据具体应用环境选择合适的调度准则。文中对 4 种常用调度准则下的调度性能进行了比较和分析，结果表明 MEDF 适用于侧重时间紧迫性的情况，MHPF 适用于侧重任务重要性的情况，而 HPEDF 和 EDHPF 为前两者的折中，调度性能优于前两者。本文的结论对于实际应用基于调度间隔分析的数字阵列雷达波束驻留调度算法具有一定参考价值。

参考文献：

- [1] 吴曼青. 数字阵列雷达的发展与构想[J]. 雷达科学与技术, 2008,12(6):401-405. (WU M Q. The Development of Digital Array Radar[J]. Journal of CAEIT, 2008,12(6):401-405.)
- [2] 汤小为,汤俊,彭应宁. 数字阵列雷达并行信号处理算法及实现[J]. 信息与电子工程, 2009,7(4):294-299. (TANG Xiaowei, TANG Jun,PENG Yingning. Parallel algorithm for digital array radar and its implementation[J]. Information and Electronic Engineering, 2009,7(4):294-299.)
- [3] Shih C S,Gopalakrishnan S,Ganti P,et al. Template-based real-time dwell scheduling with energy constraint[C]// IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium. Toronto:IEEE, 2003:19-27.
- [4] Shih C S,Ganti P,Gopalakrishnan S,et al. Synthesizing task periods for dwells in multi-function phased array radars[C]// Proceedings of the IEEE Radar Conference. Philadelphia,PA:IEEE, 2004:145-150.
- [5] 张伯彦,蔡庆宇. 相控阵雷达的自适应调度和多目标数据处理技术[J]. 电子学报, 1997,25(9):1-5. (ZHANG B Y,CAI Q Y. Adaptive Scheduling and Multitarget Data Processing Techniques of Phased Array Radars[J]. Acta Electronica Sinica, 1997,25(9):1-5.)
- [6] 张伯彦,蔡庆宇. 相控阵雷达的计算机控制技术[J]. 系统工程与电子技术, 1999,21(1):45-49. (ZHANG B Y,CAI Q Y. Computer Control Techniques of Phased Array Radars[J]. Systems Engineering and Electronics, 1999,21(1):45-49.)
- [7] 曾光,卢建斌,胡卫东,等. 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,et al. Research on Adaptive Scheduling Algorithm for Multifunction Phased Array Radar[J]. Modern Radar, 2004,26(6):14-18.)
- [8] 程婷,何子述,李会勇. 一种用于数字阵列雷达的自适应波束驻留调度研究[J]. 电子学报, 2009,37(9):2025-2029. (CHENG T, HE Z S,LI H Y. A Dwell Scheduling Algorithm for Digital Array Radar[J]. Acta Eletronica Sinica, 2009,37(9): 2025-2029.)
- [9] Farina A,Neri P. Multitarget interleaved tracking for phased array radar[J]. IEE Proceedings,Part F:Communication,Radar and Signal Processing, 1980,127(4):312-318.
- [10] Baugh R A. Computer control of modern radars[M]. New York:RCA Corporation, 1973:69-72.
- [11] 王强,徐俊刚,王宏安,等. 一种新的基于优先级表的实时调度算法[J]. 电子学报, 2004,32(2):310-313. (WANG Q,XU J G,WANG H A,et al. A New Priority Table based Real-Time Scheduling Algorithm[J]. Acta Eletronica Sinica, 2004, 32(2):310-313.)

作者简介：



赵洪涛(1986-),女,山东省枣庄市人,在读硕士研究生,研究方向为数字阵列雷达资源管理.email:jinzht@163.com.

程婷(1982-),女,江西省景德镇市人,博士,讲师,研究方向为相控阵雷达资源管理、数据融合等研究.

何子述(1962-),男,四川省新繁县人,博士生导师,教授,研究方向为阵列处理与相控阵雷达、自适应信号处理及应用、MIMO通信和MIMO雷达等研究.