

# 一种改进的相控阵雷达脉冲交错算法

谢潇潇<sup>1</sup>, 张伟<sup>1,2</sup>, 陈杰<sup>1</sup>, 陈明燕<sup>1,2</sup>

- (1. 电子科技大学电子科学技术研究院, 四川成都 611731;  
2. 教育部综合电子系统技术重点实验室, 四川成都 611731)

**摘要:** 针对相控阵雷达波束快速扫描能力, 提出了一种基于时间指针的相控阵雷达在线脉冲交错调度算法。首先建立了雷达驻留任务模型并分析了调度约束条件, 然后引入时间指针来指向当前调度分析时刻, 分别从波束的角度和脉冲的角度分析了驻留任务交错的几种方式, 并给出了三种脉冲重叠方式的时间约束条件, 最后在满足时间和能量资源约束的条件下, 选取综合优先级最高的雷达驻留任务进行调度。仿真结果表明, 与基于收益的调度算法相比, 此算法能有效地降低任务丢失率, 提高时间利用率和能量利用率。

**关键词:** 脉冲交错; 驻留调度; 时间指针; 能量约束; 时间约束

**中图分类号:** TN958.92; TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2337(2013)02-0185-07

## A Time Pointer-Based On-Line Pulse Interleaving Algorithm for Phased Array Radar

XIE Xiao-xiao<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2</sup>, CHEN Jie<sup>1</sup>, CHEN Min-yan<sup>1,2</sup>

(1. *Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*; 2. *Key Laboratory of Advanced Integrated Electronic System, Ministry of Education, Chengdu 611731, China*)

**Abstract:** According to the ability of waveform agility of phased array radar, a time pointer-based on-line interleaving algorithm for phased array radar is proposed. Firstly, a reasonable beam dwell scheduling model is built and the scheduling constraints are analyzed. Secondly, based on the time pointer, several pulse interleaving ways are analyzed from the aspect of beam and pulse, and an expression of time constraint is given for three pulse overlapping ways. Finally, the algorithm selects the highest priority radar dwell task under time and energy constraints. The simulation results demonstrate that the fast pulse algorithm can control the task drop rate in a low zone and obtain high system utility in dense tracking condition.

**Key words:** pulse interleaving; dwell scheduling; time pointer; energy constraint; time constraint

## 1 引言

相控阵雷达天线系统在计算机的控制下, 可以在微秒量级进行波束捷变, 能够在搜索的同时, 进行多目标跟踪、制导、识别等多种工作方式, 因而具备多功能的特点<sup>[1-2]</sup>。雷达资源调度算法的目的就在于依据某种准则来安排给出的各种任务请求, 以获得最优的雷达性能。相控阵雷达驻留调度算法主要分为两类: 模版法<sup>[3-6]</sup>和自适应算法<sup>[7-11]</sup>。其中模版调度算法中的模版全部是离线设计的, 缺乏对系统环境的灵活性和适应性, 因此

常用于单用途雷达。对于多功能二维相控阵雷达, 自适应调度算法是最有效的调度算法。

脉冲交错技术将脉冲之间的资源充分利用, 提高资源利用率, 但同时也使得交错调度模型和调度过程变得更加复杂。近来, 文献[12]提出一种以动态规划的脉冲交错调度算法, 它的算法是建立在 0-1 整数规划基础之上。文献[13]提出基于在线脉冲交错的波束驻留调度算法来充分利用驻留任务的等待期和接收期。文献[14]提出一种基于调度收益的驻留调度算法, 该算法建立在一个最大化收益为目标函数的最优化数学模型之上, 采用启发式规则实现脉冲交错以获得模型的

次优解,有效地降低了搜索跟踪任务的任务丢失率。这些方法的实现一定程度上提高了雷达资源利用率,然而由于脉冲交错模型相对理想化和简单化,通常考虑一种波形参数和简单的雷达资源约束,从而导致脉冲驻留调度算法并没有充分挖掘脉冲间的雷达资源。为了充分扩展相控阵雷达系统容量,本文首先建立了合理的用于脉冲交错驻留的资源调度模型,基于时间指针控制下,详细设计了能量与时间资源约束下在线脉冲交错的实现方法,仿真表明本算法与传统算法相比,能够获得更好的资源利用率,而且算法过程相对简单,降低了实现的难易程度。

## 2 驻留任务模型

雷达波束驻留任务可以由以下模型描述:

$$T = \{T_r, T_n, tp, w, ld, rt, st, pri\} \quad (1)$$

式中,  $T_r$  为脉冲重复周期;  $T_n$  为脉冲累积个数;  $tp$  为脉冲宽度;  $w$  为时间窗长度;  $ld$  为驻留长度;  $rt$  和  $st$  分别为任务的期望执行时间和实际执行时间;  $pri$  为工作方式优先级。

在线调度时,根据对雷达回波的信号处理,可将驻留任务细化为发射期、等待期和接收期,如  $ld = \{tx, tw, tr\}$ ,其中  $tx, tw$  和  $tr$  分别为驻留的发射期长度、等待期长度和接收期长度。跟踪任务的等待期长度  $tw$  可由探测得到的目标距离  $R$  得到,如图 1 所示,其中  $tx = tp$ ,  $tw = 2R/c$ 。对于搜索任务,当没有任何先验信息时,目标可能出现在任意距离单元内,则在发射期结束以后,应立即进入接收期,即不能进行脉冲交错。

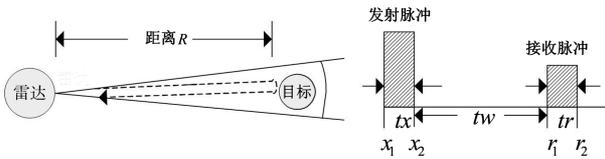


图 1 雷达跟踪驻留模型

为了实现脉冲交错,雷达波束驻留调度需同时满足时间约束和能量约束。时间约束要求驻留任务在截止期之前执行,并且驻留任务间的发射期和接收期在时间上互不抢占,因此为了便于分析待调度的任务是否满足时间约束,引入标识变量  $PT$ ,用来分析当前待调度的任务与已调度成功的任务的脉冲发射期或接收期是否有重叠,记为

$$PT = \{x_1, x_2, r_1, r_2, s\} \quad (2)$$

式中,  $x_1, x_2, r_1$  和  $r_2$  分别表示驻留任务的任意一个发射脉冲和其对应的接收脉冲的起始时刻及结束时刻;  $s$  表示该发射/接收脉冲的编号,  $s \in \{0, 1, 2, \dots, T_n - 1\}$ ,如图 1 所示。能量约束又分为瞬态能量约束和稳态能量约束。发射脉冲会消耗能量,导致系统温度上升,当温度超过系统能承受的极限时就会损坏,所以为了保证系统能正常运行,需要限制系统的瞬态能量。系统在  $t$  时刻的瞬态能量可表示为

$$E(t) = \int_0^t p(x) e^{-(x-t)/\tau} dx \quad (3)$$

式中,  $p(x)$  为系统功率函数;  $\tau$  为回退参数,反映了系统自身的散热性能。由式(3)可知,距离当前时刻越近的时刻点对瞬态能量的影响就越大。将系统时间作离散化处理,按照  $\Delta t_E$  的间隔等分为多个离散时间点,此时瞬态能量的约束转化为每个离散时间点能量消耗小于能量阈值,记为能量状态变量  $E_i(k)$ ,其中  $k$  为离散时间点编号。设系统能承受的最大的瞬态能量为  $E_{\max}$ ,则瞬态能量约束为

$$E_i(k) \leq E_{\max}, \quad k = \{1, 2, \dots\} \quad (4)$$

## 3 基于时间指针的脉冲交错技术

脉冲交错技术的基本思想就是将驻留等待期的时间资源加以利用,即在不影响之前脉冲的收发的前提下,在一个脉冲等待期发射或接收其他脉冲。由于搜索驻留之间不能进行脉冲交错,因此引入标识变量  $ID$ ,用来表示当前时刻是否能进行脉冲交错,记为  $ID = \{flag, p, d_{\max}\}$ ,其中  $flag \in \{0, 1\}$ ,  $p$  为指向当前调度分析时刻的时间指针。当实际执行的前一个驻留任务能进行脉冲交错时,即前一个驻留任务为跟踪任务,  $flag = 1$ ,否则  $flag = 0$ ;  $d_{\max}$  表示时间轴上由已调度成功驻留占用的最大的时刻值,记为

$$d_{\max} = \max_{k \in [1, N]} (st_k + ld_k) \quad (5)$$

式中,  $N$  表示已调度成功任务数;  $st_k$  和  $ld_k$  分别表示某一调度成功驻留的实际执行时间和驻留长度。若当前时刻调度的是搜索任务且  $p < d_{\max}$ ,则搜索任务不能在当前时刻执行。

运用时间指针进行驻留任务调度,实际是为每个时间指针指向的时刻点选择最适合在此处执

行的任务。为了在调度算法中引入时间指针,将系统时间作长度为  $\Delta t$  的离散化处理,时间指针以  $\Delta t$  为滑动步长依次指向这些离散时刻点。

为了判断各个离散时刻点是否存在已调度成功的脉冲,引入时间状态向量函数  $\phi_{\Delta t}(k)$ 。初始化  $\phi_{\Delta t}(k) = 0$ ,每调度成功一个任务  $T_i$  则按如下方式更新  $\phi_{\Delta t}(k)$ :

$$\phi_{\Delta t}(k) = 1, \left\lfloor \frac{st_i + n \cdot T_{r_i}}{\Delta t} \right\rfloor \leq k \leq \left\lfloor \frac{st_i + sp_i + n \cdot T_{r_i}}{\Delta t} \right\rfloor \quad (6)$$

式中,  $k = \{1, 2, 3, \dots\}$  为离散时间间隔编号;  $n = \{0, 1, 2, \dots, T_{n_i} - 1\}$ ;  $\Delta t$  为调度时间离散间隔长度;  $st_i, tp_i, T_{n_i}$  和  $T_{r_i}$  分别为任务  $T_i$  的实际执行时间、脉冲宽度、脉冲积累数和脉冲重复频率。式(6)表示当  $\phi_{\Delta t}(k) = 1$  时,第  $k$  个离散时刻即时间  $k\Delta t$  处已存在脉冲,该时刻不能执行任何任务请求,此时时间指针需滑动步长  $\Delta t$  指向下一个时刻点继续是否存在任务能在当前指向的时刻点执行。

假设在当前时间指针  $p$  指向时刻调度任务  $T_i, T_k$  为已调度成功任意一个任务,为了判断  $T_i$  能否在当前时刻执行,需要对驻留  $T_i$  和  $T_k$  进行交错分析。从波束角度分析,图2给出了两种可能的交错方式,  $[o_1, o_2]$  表示它们的驻留重叠区域,其中  $o_1$  和  $o_2$  分别满足如下时间约束:

$$(a) \quad o_1 = p, o_2 = st_k + ld_k \quad (7)$$

$$(b) \quad o_1 = p, o_2 = p + ld_i \quad (8)$$

式中,  $st_k$  和  $ld_k$  分别表示任务  $T_k$  的实际执行时间和驻留时间长度;  $ld_i$  表示任务  $T_i$  的驻留时间长度。

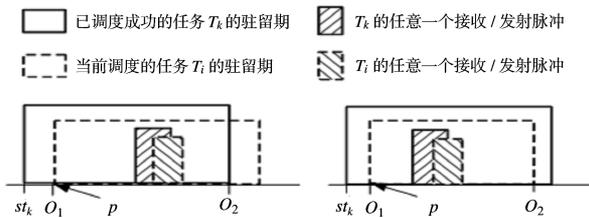


图2 跟踪驻留脉冲的两种交错方式

从脉冲角度分析,当驻留任务  $T_i$  与  $T_k$  的任意发射脉冲或接收脉冲间相互重叠时,即  $T_i$  不满足时间约束,交错不成功。为了便于判断任务  $T_i$  与  $T_k$  在时间上是否冲突,可将驻留  $T_i$  和  $T_k$  的任一发射脉冲和相应的接收脉冲表示为  $PT_i = \{x_1^i, x_2^i, r_1^i, r_2^i, s^i\}$  和  $PT_k = \{x_1^k, x_2^k, r_1^k, r_2^k, s^k\}$ ,可知

$$\begin{cases} x_1^i = p + s^i \cdot T_{r_i} \\ x_2^i = x_1^i + tp_i \\ r_1^i = x_2^i + tw_i \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} r_2^i = r_1^i + tr_i \\ x_1^k = st_k + s^k \cdot T_{r_k} \\ x_2^k = x_1^k + tp_k \\ r_1^k = x_2^k + tw_k \\ r_2^k = r_1^k + tr_k \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $x_1^i, x_2^i$  和  $x_1^k, x_2^k$  分别为任务  $T_i$  和  $T_k$  的任意一个发射脉冲的起始时刻和结束时刻;  $r_1^i, r_2^i$  和  $r_1^k, r_2^k$  分别为任务  $T_i$  和  $T_k$  的任意一个接收脉冲的起始时刻和结束时刻;  $s^i$  和  $s^k$  分别为驻留任务  $T_i$  与  $T_k$  在驻留重叠区域  $[o_1, o_2]$  内的发射/接收脉冲编号;  $T_{r_i}$  和  $T_{r_k}$  分别为任务  $T_i$  和  $T_k$  的脉冲重复周期;  $tp_i$  和  $tp_k$  分别为任务  $T_i$  和  $T_k$  的脉冲宽度;  $tw_i, tr_i$  和  $tw_k, tr_k$  分别为任务  $T_i$  和  $T_k$  的等待期长度和接收期长度。由于驻留任务  $T_i$  与  $T_k$  有两种交错方式,则  $s^i$  和  $s^k$  的取值范围需分为两种情况讨论。在式(7)和式(8)条件下,  $s^i$  和  $s^k$  的取值范围分别如下:

$$(a) \quad \begin{cases} s^i \in \left[ 1, \left\lfloor \frac{o_2 - o_1}{T_{r_i}} \right\rfloor \right] \\ s^k \in \left[ \left\lfloor \frac{o_1 - st_k}{T_{r_k}} \right\rfloor, T_{n_k} \right] \end{cases} \quad (11)$$

$$(b) \quad \begin{cases} s^i \in [1, T_{n_i}] \\ s^k \in \left[ \left\lfloor \frac{o_1 - st_k}{T_{r_k}} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{st_k + ld_k - o_2}{T_{r_k}} \right\rfloor \right] \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $T_{n_i}$  和  $T_{n_k}$  分别为任务  $T_i$  和  $T_k$  的脉冲积累数。

如图2所示,两个驻留任务的脉冲重叠可以分为三种方式分析:(A)发射脉冲间重叠;(B)接收脉冲间重叠;(C)发射脉冲与接收脉冲重叠。为了得到这三种脉冲重叠方式的时间约束条件,假设

$$\begin{cases} s^i T_{r_i} - s^k T_{r_k} = t \\ st_k - p = \Delta st \\ tp_k - tp_i = \Delta tp \\ tw_k - tw_i = \Delta tw \end{cases} \quad (13)$$

$$\Delta st + \Delta tp + \Delta tw = \Delta \xi$$

$$[tp_x + tw_x + tr_x = lp_x, x \in \{k, i\}]$$

由式(9)~(13)可得驻留任务  $T_i$  与  $T_k$  脉冲三种重叠方式的时间约束条件为

$$(A) \quad \begin{cases} \Delta st - tp_i < t < \Delta st, x_1^i < x_1^k < x_2^i \\ \Delta st < t < \Delta st + tp_k, x_1^k < x_1^i < x_2^k \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 \text{(B)} \quad & \begin{cases} \Delta\xi - tr_i < t < \Delta\xi, r_1^i < r_1^k < r_2^i \\ \Delta\xi < t < \Delta\xi + tr_k, r_1^k < r_1^i < r_2^k \end{cases} \quad (15) \\
 & \left\{ \Delta st + \Delta tp + tw_k < t < \Delta st + tp_k + tw_k, x_1^i < r_1^k < x_2^i \right. \\
 \text{(C)} \quad & \begin{cases} \Delta st + tp_k + tw_k < t < \Delta st + lp_k, r_1^k < x_1^i < r_2^k \\ \Delta st - tp_i - tw_i < t < \Delta st + \Delta tp - tw_i, x_1^k < r_1^i < x_2^k \\ \Delta st - lp_i < t < \Delta st - tp_k - tw_k, r_1^i < x_1^k < r_2^i \end{cases} \quad (16)
 \end{aligned}$$

若当前时刻调度的驻留任务发射或接收的任一脉冲满足式(11)~(16),则表示驻留任务  $T_i$  不满足时间约束,不能在当前时刻调度,继续判断能否在此时刻调度的其他任务是否满足时间约束。

除了时间约束外,在分析相控阵雷达脉冲交错时还需要考虑系统的能量约束。系统消耗能量由最大值  $E_{\max}$  回退到正常值  $E_{\text{normal}}$  所需要的时间反映了雷达系统的冷却速度,设当前时间指针所指向的  $t$  时刻的能量为  $E(t)$ ,则根据式(3)可得在  $t+t_0$  时刻消耗的能量为

$$E(t+t_0) = E(t)e^{-t_0/\tau} \quad (17)$$

设  $E(t) = E_{\max}$ ,  $E(t+t_0) = E_{\text{normal}}$ ,可得

$$t_0 = -\frac{1}{\tau} \ln \frac{E_{\text{normal}}}{E_{\max}} \quad (18)$$

上式中的  $t_0$  即为系统消耗能量恢复到正常值的冷却时间,由此可求得系统冷却速度  $v_E$  为

$$v_E = -\tau(E_{\max} - E_{\text{normal}}) \ln \frac{E_{\max}}{E_{\text{normal}}} \quad (19)$$

记  $E_{i-1}$  为调度成功任务  $i$  前系统消耗的能量状态向量,若任务  $i$  调度成功,则系统能量状态向量参数按如下方式更新:

$$\begin{aligned}
 \{ E_i(k) = E_{i-1}(k) + n_{k_i} P_i t p_i + v_E n_{k_i} t p_i, \\
 k \in \left[ \left\lfloor \frac{st_i - t_0}{\Delta t_E} \right\rfloor, \left\lceil \frac{\Gamma st_i + l_i - t_0}{\Delta t_E} \right\rceil \right) \\
 \{ E_i(k) = E_{i-1}(k) + (E_i(k-1) - E_i(k-1)), \\
 k \in \left[ \left\lceil \frac{\Gamma st_{j+1} + l_{j+1} - t_0}{\Delta t_E} \right\rceil, M \right) \quad (20)
 \end{aligned}$$

式中,  $p_i$  为雷达发射功率;  $t p_i$  为任务  $i$  的发射脉冲宽度;  $\Delta t_E$  为离散时间间隔长度;  $t_0$  为调度起始时刻;  $n_{k_i}$  为在第  $k$  个时间间隔内任务  $i$  的脉冲个数;  $M$  为总的离散时间间隔数。  $n_{k_i}$  可由下式计算得到:

$$\begin{aligned}
 \{ n_{k_i} = 0, k \Delta t_E < st_i \\
 \{ n_{k_i} = \frac{k \Delta t_E - st_i}{T_{r_i}} - n_{k_i-1}, \quad (21) \\
 \{ \max(0, (k-1)\Delta t_E) < st_i < k \Delta t_E
 \end{aligned}$$

当式(20)中得到的  $E_i(k)$  满足式(4)时,即当前调度的任务  $i$  满足能量约束。

## 4 调度算法描述

本文算法中定义了一个时间指针指向当前的分析时刻。引入时间指针以后,各任务在调度间隔内的不同时刻会有不一样的优先级。本文主要考虑驻留的优先级和截止期两个参数作为综合优先级。对于优先级越高的任务越早调度,截止期越早的任务越早调度。驻留  $T_i$  综合优先级  $sp_i$  采用简单的线性函数表示<sup>[10]</sup>:

$$sp_i = \frac{\gamma \cdot p_{n_i} + (M+2-\gamma) \cdot d_{n_i}}{M+1} \quad (22)$$

式中,  $M$  为当前时刻调度器的雷达请求事件个数;  $p_{n_i}$  为驻留  $T_i$  的优先级从高到低排列的序列号;  $d_{n_i}$  为驻留  $T_i$  的截止期由小到大的序列号;  $\gamma$  为一可控参数。假设有  $N$  个任务在  $[t_0, t_{\text{end}}]$  调度执行,其中  $t_0$  和  $t_{\text{end}}$  分别为调度间隔的起始时刻和结束时刻。基于时间指针的脉冲交错算法的步骤描述如下:

步骤 1 初始化该调度间隔的时间指针  $p$ 、能量状态向量  $\mathbf{E}$ 、时间状态向量函数  $\phi_{\Delta t}(k)$  和  $ID$ ,其中  $p \geq t_0$ 。

步骤 2 若  $\phi_{\Delta t}(k) = 0 (k = p/\Delta t)$ ,则删除任务请求中选出截止期早于  $p$  的任务,转步骤 3;否则  $p = p + \Delta t$ ,返回步骤 2。

步骤 3 从任务请求中选出当前时刻可以执行的任务集合  $A_p = \{T_j | rt_j \in (p-w_j, p+w_j)\}$ ,设该集合任务个数为  $N_p$ ,按照式(22)计算驻留任务综合优先级,并从大到小排序,如优先级相同则按照期望执行时刻从小到大排序,令  $i=1$ 。

步骤 4 从集合  $A_p$  中选出第  $i$  个任务记为  $T_i$ ,若  $flag=1$ ,转步骤 5,否则将其放入执行链表,令  $st_i = p$ ,并将其从申请链表中删除。根据被调度任务的类型更新  $ID$  并依据式(6)和式(20)更新  $\phi_{\Delta t}(k)$  及  $E_i(k)$ 。若任务  $T_i$  为搜索任务,则  $p = p + ld_i$ ;若调度跟踪任务,则  $p = p + \Delta t$ ,  $p = p + \Delta t$ ,转步骤 6。

步骤 5 根据式(4)和式(11)~(16)给出的能量约束和时间约束条件,考察任务  $T_i$  是否能在  $p$  执行,若  $T_i$  不能执行则令  $i = i + 1$ ,若  $i > N_p$ ,

令  $p = p + \Delta t$  转步骤6, 否则返回步骤5。如果任务满足约束条件, 根据被调度任务的类型更新  $ID$  并依据式(6)和式(20)更新  $\phi_{\Delta}(k)$  及  $E_i(k)$ 。若满足约束的任务为搜索任务, 当  $p > d_{\max}$  时, 令  $p = p + ld_i$ ,  $flag = 0$ ,  $i = i + 1$  否则调度失败; 若满足约束的任务为跟踪任务, 令  $p = p + \Delta t$ ,  $i = i + 1$ 。

步骤6 当  $p > t_{\text{end}}$  转步骤7, 否则返回步骤2。

步骤7 本调度间隔调度结束。

## 5 仿真分析

仿真场景包括目标确认、高精度跟踪、中优先级跟踪、普通跟踪、搜索五种类型的任务, 几种类型的雷达任务总数相等。波形参数按照典型的雷达毫米波波段的设置, 如表1所示。仿真时间为600 ms, 调度间隔为30 ms, 平均功率为500 W, 可控参数  $\gamma = 0.5M + 1$ 。所有跟踪任务是随机到达的, 目标的捕获时间在仿真起始时刻与第一个跟踪采样周期之间随机选取。以下给出的是100次仿真的平均结果。

表1 雷达驻留任务产生参数表

任务类型	优先级	脉冲个数	脉宽 /ms	周期 /ms	时间窗 /ms	发射功率 /kW
确认	5	25	0.03	0.3	0.5	5
精密跟踪	4	23	0.02	0.2	0.5	5
中度跟踪	3	21	0.03	0.3	0.6	5
普通跟踪	2	19	0.04	0.3	0.6	4
搜索	1	17	0.04	0.4	—	4

本仿真对比了本文提出的基于时间指针的调度算法(算法A)和基于收益的调度算法<sup>[13]</sup>(算法B), 分别从任务丢失率<sup>[13]</sup>、系统时间利用率<sup>[13]</sup>、能量利用率和平均时间偏移率四个方面对算法进行评估, 定义如下:

$$\text{任务丢失率} = \frac{N'}{N_{\text{total}}} \quad (23)$$

$$\text{时间利用率} = \frac{tx_{\text{total}} + tr_{\text{total}}}{T_{\text{total}}} \quad (24)$$

$$\text{能量利用率} = \frac{P_t \cdot tx_{\text{total}}}{P_{\text{av}} \cdot T_{\text{total}}} \quad (25)$$

$$\text{平均时间偏移率} = \frac{\sum_{i=1}^{N'} |st_i - rt_i|}{N'} \quad (26)$$

式中,  $N'$  为实际执行的任务总数;  $N_{\text{total}}$  为申请调度的任务总数;  $tx_{\text{total}}$ ,  $tr_{\text{total}}$  分别为总的发射时间和接收时间;  $P_{\text{av}}$  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;  $rt_i$  和  $st_i$  分别为任务  $i$

的期望执行时间和实际执行时间。

图3至图5分别给出了两种算法的搜索任务丢失率、跟踪任务丢失率和总的任务丢失率。由图5可以看出, 由于时间指针的引入, 系统空闲时间得到充分的挖掘, 从而使算法A(基于时间指针的调度算法)在调度相同的任务时较算法B(基于收益的调度算法)任务丢失率更小。对于搜索任务(如图3), 算法B在任务数大于10时开始丢失任务, 而算法A在任务数大于25以后才开始丢失任务, 当任务数逐渐增加时, 算法A丢失任务的速度明显小于算法B。这主要是因为算法A是为每个时刻点选择合适的任务, 空闲时间得到充分利用, 提高了搜索任务的调度成功率。而对于跟踪任务(如图4)也有相似的结果。

在图6中, 由于算法B考虑了使任务的实际执行时间尽量接近期望执行时间, 所以当任务数较少时, 其平均时间偏移率较小。随着任务个数逐渐增加, 时间资源的竞争日趋激烈, 其平均时间偏移率逐渐上升。与算法B相比, 算法A的平均时间偏移率较大, 不受任务个数的影响一直维持在0.4左右, 其原因在于该算法只考虑为每个时间指针指向的时刻点选择合适的任务, 未考虑期望时间原则, 所以平均的时间偏移较为稳定。

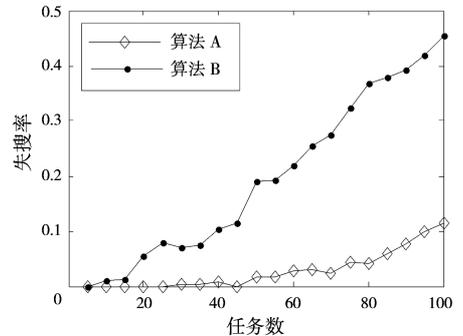


图3 搜索任务丢失率

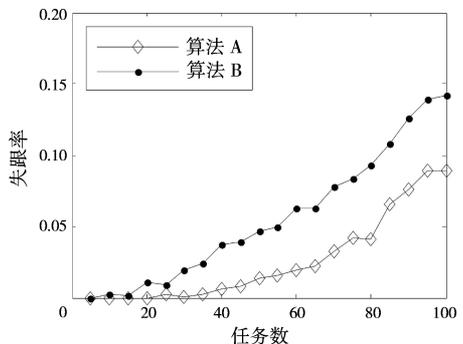


图4 跟踪任务丢失率

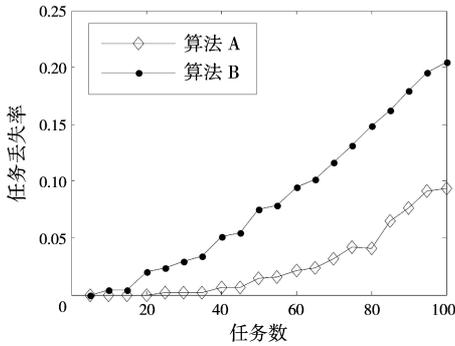


图 5 任务丢失率

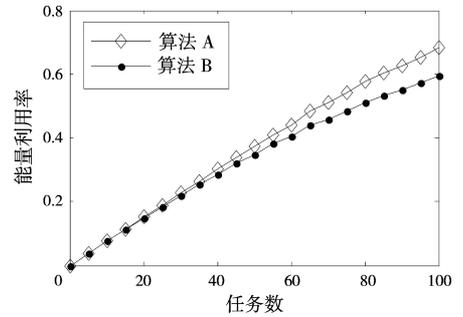


图 8 能量利用率

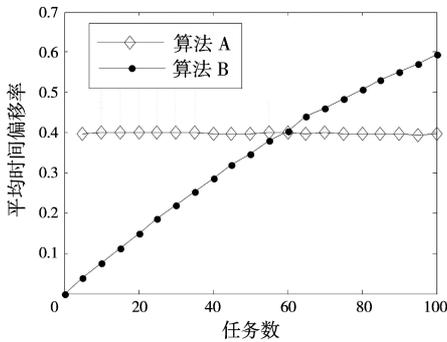


图 6 平均时间偏移率

由图 7 和图 8 可知,两种算法的时间利用率和能量利用率在任务个数较少时区别不明显,随着任务个数进一步增加,算法 A 的时间利用率和能量利用率明显高于算法 B。其原因在于算法 A 依次为每个时刻点选择任务,充分考虑了系统的空闲时间,从而提高了任务调度成功率,进而使能量得到了充分的利用。在相同的时间和能量约束范围内,扩展了相控阵雷达系统的容量。

最后,对于系统时间的离散化处理并没有使算法的复杂度增加,这主要是因为脉冲交错技术和时间能量约束模型分析保证了算法的实时性。

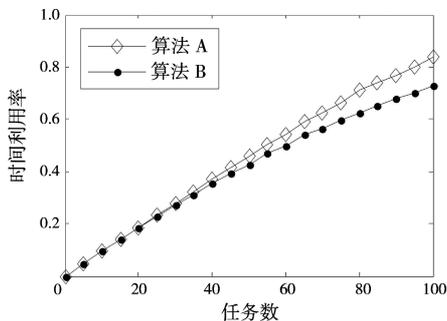


图 7 时间利用率

## 6 结束语

多功能相控阵雷达性能的发挥是以有效的波束驻留调度算法为基础的,为了能够充分地利用雷达系统的资源,本文提出一种基于时间指针的快速脉冲交错调度算法。首先针对脉冲交错技术的特点提出了相应的任务模型,然后分析了不同的波形参数的驻留任务的脉冲交错特点,以及相应的时间约束、稳态能量约束和瞬态能量约束,然后引入时间指针控制实现快速雷达脉冲交错。仿真表明,与基于收益的调度算法相比,能够获得更好的调度性能。

## 参考文献:

- [1] 曹正林,杨向忠,刘卫华. 机载相控阵雷达 TAS 方式的实现[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5):1136-1139.  
CAO Zheng-lin, YANG Xiang-zhong, LIU Wei-hua. Implementation of TAS Method for Airborne ESA Radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(5):1136-1139. (in Chinese)
- [2] 王顺民,吕韶昱. 相控阵雷达自动距离跟踪器设计与应用[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(4):523-526.  
WANG Shun-min, LV Shao-yu. Design and Application for Phased Array Radar Auto Range Tracking System[J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(4):523-526. (in Chinese)
- [3] 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 Ting, HE Zi-shu, CHENG Ting. A Template-Based Adaptive Radar Dwell Scheduling Algorithm [J]. Signal Processing, 2010, 26(7):998-1002. (in Chinese)

- [4] Kang P S, Lee C G. Search and Track Coordination in Multi-Ship Multi-Radar Systems Using Schedulability Envelope[J]. Real-Time Systems, 2004, 36(3):227-262.
- [5] Shih C S, Ganti P, Gopalakrishnan S, et al. Synthesizing Task Periods for Dwells in Multi-Function Phased Array Radars[C] // Proceeding of the IEEE Radar Conference, [s. l.]:[s. n.], 2004:145-150.
- [6] Winter E, Lupinski L. On Scheduling the Dwells of a Multifunction Radar[C] // IEEE International Conference on Radar, Shanghai, China:[s. n.], 2006:1-4.
- [7] CHEN Jie, TIAN Zhong, WANG Lei, et al. Adaptive Simultaneous Multi-Beam Dwell Scheduling Algorithm for Multifunction Phased Array Radars [J]. Journal of Information and Computational Science 2011, 14(8):3051-3061.
- [8] Moo P W. Scheduling for Multifunction Radar via Two-Slope Benefit Functions[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2011, 5(8):884-894.
- [9] Mir H, Ben Abdelaziz F. Scheduling of Tasks with Fuzzy Dwell Times in Multifunction Radar [C] // Second International Conference on Engineering Systems Management and Its Applications (ICESMA), Sharjah:[s. n.], 2010: 1-6.
- [10] Cheng Ting, He Zishu, Tang Ting. Novel Radar Dwell Scheduling Algorithm Based on Pulse Interleaving Leaving [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 20(2):247-253.
- [11] 蔡文超,杨瑞娟,李晓柏,等. 多功能一体化雷达任务调度算法研究 [J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(2):150-155. QI Wen-chao, YANG Rui-juan, LI Xiao-bai, et al. Research on Task Scheduling Algorithm for Multi-function Integrated Radar [J]. Radar Science and Technology, 2012, 10(2):150-155. (in Chinese)
- [12] Elshafei M, Sherali H D, Smith J C. Radar Pulse Interleaving for Multi-Target Tracking[J]. Naval Research Logistics, 2004, 51(1):72-94.
- [13] 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, LI Hui-yong. An Adaptive Dwell Scheduling Algorithm for Digital Array Radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 2025-2029. (in Chinese)
- [14] Cheng Ting, He Zishu, Tang Ting. Dwell Scheduling Algorithm for Multifunction Phased Array Radars Based on the Scheduling Gain[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008, 19(3):479-485.

#### 作者简介:



谢潇潇 女, 1986年出生于四川省南充市, 在读硕士研究生, 主要研究方向为相控阵雷达资源管理。  
E-mail: tooxiaoxiao@126.com

(上接第184页)

GUO Hai-yan, YU Shi-cai, GUAN Jian, et al. Estimation Method of LFM Based on Fractional Fourier Transform[J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(5):438-441. (in Chinese)

- [10] 赵志坚, 关键. 海杂波中非参量恒虚警检测器性能分析[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(1):65-68. ZHAO Zhi-jian, GUAN Jian. Performance Analysis of Nonparametric CFAR Detectors in Sea Clutter[J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(1):65-68. (in Chinese)

#### 作者简介:



陈小龙 男, 1985年生于山东烟台, 博士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理、海杂波中微弱目标检测。  
E-mail: xlclxl1209@163.com



李秀友 男, 1983年生于浙江台州, 博士研究生, 主要研究方向为海杂波抑制与目标检测、雷达波形优化设计。



包中华 男, 1985年生于安徽庐江, 讲师, 博士, 主要研究方向为雷达信号处理、雷达系统设计。



关键 男, 1968年生于辽宁锦州, 教授、博士生导师, 主要研究方向为雷达目标检测与跟踪、侦察图像处理和信息融合。