

基于改进优先级的相控阵雷达任务调度方法

孙铭才, 张 秦, 王世强

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 针对相控阵雷达多目标跟踪中的资源调度的问题, 提出基于改进优先级的任务调度方法。该方法将目标对雷达的威胁引入到目标任务优先级设计当中, 首先, 定义目标威胁度, 根据目标和雷达的各项参数指标, 将信息熵综合决策与主观权重法相结合, 计算出目标的威胁度值; 然后, 将目标的威胁度值、任务工作方式优先级以及任务截止期进行综合规划, 得到目标任务的综合优先级, 最后对目标威胁度的计算和任务的调度分别进行仿真。仿真结果表明, 方法对目标威胁程度的计算结果符合不同威胁度等级目标跟踪资源分配的需求, 对高威胁任务的执行优于传统方法, 具有一定的优越性。

关键词 相控阵雷达; 任务调度; 任务优先级; 目标威胁度

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.02.007

中图分类号 TN958.92 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)02-0037-06

A Task Scheduling Algorithm Based on Modified Priority for Phased Array Radars

SUN Mingcai, ZHANG Qin, WANG Shiqiang

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Aimed at the resource scheduling problem of phased array radar in multiple target tracking, this paper proposes a task scheduling algorithm based on modified priority. The algorithm introduces the threat of the target to radar into the design of the target task priority. Firstly, the target threat degree is defined. A method that combines comprehensive decision-making of information entropy with subjective weighting is used to calculate the target threat degree in accordance with various parameters of the target and radar. And then, the algorithm synthesizes planning of the target threat degree, the priority of function mode of the task and the deadline of the task to obtain the comprehensive priority. Finally, the calculation process of target threat degree and task scheduling are simulated. The simulation results indicate that the calculation results of target threat degree conform to the demand for tracking resource distribution in different target threat degrees of targets, and the algorithm has a certain superiority for executing high threat tasks, compared with the traditional algorithm.

Key words: phased array radar; task scheduling; task priority; target threat degree

收稿日期: 2016-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(61601499)

作者简介: 孙铭才(1993—), 男, 湖南岳阳人, 硕士生, 主要从事相控阵雷达资源管理研究。E-mail: 398327155@qq.com

引用格式: 孙铭才, 张秦, 王世强. 基于改进优先级的相控阵雷达任务调度方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(2): 37-42. SUN Mingcai, ZHANG Qin, WANG Shiqiang. A Task Scheduling Algorithm Based on Modified Priority for Phased Array Radars[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2017, 18(2): 37-42.

相控阵雷达具有灵活、快速的波束捷变和波束自适应能力,因而可以同时跟踪多个目标^[1-2]。但随着现代战场环境的日益复杂,相控阵雷达需跟踪处理的目标数量不断增加,目标类型与雷达任务多样化特征更为显著,因此雷达执行的任务量和复杂程度也大大增加,此时其有限的时间资源使得相控阵雷达必须对多种任务要有一个合理有效的调度方法,其中最为关键的一点就在于对雷达任务优先级的合理设计^[3]。所以,研究如何制定有效合理的任务优先级设计方法对提升相控阵雷达的整体性能有着重要意义。

在以往对任务优先级的设计研究中,对雷达任务的优先级采用了不同的设计原则。文献[4~5]采用了任务固定工作方式优先级的方式进行调度,即任务的优先级由专家经验对不同工作方式的直接赋值而得,并在调度过程中保持不变。文献[6]采用截止期最早最优先方法,即截止期越早的任务,其优先级越高。文献[7~11]提出将工作方式优先级和任务截止期综合考虑,得到任务的综合优先级,然后进行调度。这些自适应调度方法对目标任务优先级的设计中都没有考虑目标对雷达的威胁,在威胁等级上对所有目标“一视同仁”,从而影响了资源分配的实际效果,降低了资源利用效率。

1 优先级设计

一般情况下,相控阵雷达的搜索过程为雷达按照波位编排依次进行波束照射,在搜索检测到目标后,需发射一验证波束,以确定回波来自有效目标或虚警^[12]。所以相控阵雷达的搜索任务和验证任务一般都是在无先验信息下执行的。本文对任务优先级的改进设计,主要是针对跟踪任务和失跟处理任务,下文将跟踪任务和失跟处理任务合称为目标任务。

1.1 目标威胁度的定义与计算方法

目标威胁度即为目标对雷达的威胁程度,一般与目标的飞行状态参数和飞行轨迹参数有关,主要参数有:目标的距离、高度、速度、加速度、跟踪质量、目标类型、敌我属性以及飞行航向有关。若雷达为制导雷达,则目标的威胁程度还与以雷达为主要传感器的武器系统的有效杀伤区域有关。基于以上考虑,本文利用目标先验跟踪滤波信息以及雷达自身指标参数计算出目标的相对威胁度值。由于以上参数具有多样化特征,利用信息熵综合决策方法^[13-15]和主观权重法相结合的方法,来对目标威胁度值进行具体计算。其具体计算步骤如下:

第1步:对目标进行建模。

$$T_i = \{R_i, H_i, V_i, a_{ci}, E_i, K_i, S_i, \alpha_i, r_i\} \quad (1)$$

式中: T_i 表示第*i*个目标; R_i, H_i, V_i 和 a_{ci} 分别表示第*i*个目标的距离、高度、速度和加速度; E_i 为相控阵雷达跟踪第*i*个目标时在距离上的跟踪误差,表示为跟踪质量; K_i 表示为第*i*个目标的类型,目标的类型主要包括:战术导弹、战斗机、轰炸机、直升机和干扰机,将其威胁等级依次量化为{5, 4, 3, 2, 1}; S_i 表示第*i*个目标的敌我属性,主要有“敌”“不明”“我”3个属性,将其威胁等级依次量化为{1, 0, -1}; α_i 为第*i*个目标指向雷达方向矢量与目标速度矢量之间的夹角,表示为飞行航向,当 $\alpha_i=0$ 时,表明第*i*个目标径直飞向雷达,此时威胁最大;若雷达为制导雷达, r_i 表示第*i*个目标是否进入制导武器的有效杀伤区,当 $r_i=1$ 时,表示目标进入了制导武器的有效杀伤区,当 $r_i=0$ 时,表示没有进入。

第2步:假设有*m*个目标,对*m*个目标的*n*($n=9$)个参数指标构造判断矩阵 $A=(x_{ij})_{m \times n}$, x_{ij} 表示第*i*个目标的第*j*个参数指标值。对于第*j*个参数指标值,*j*由1到9分别表示距离、高度、速度、加速度、跟踪距离误差、目标类型、敌我属性、飞行航向以及是否进入制导武器的有效杀伤区。

第3步:将判断矩阵进行规范化处理,得到规范化判断矩阵。参数指标可分为成本型、效益型以及固定型等属性,成本型指标是指其指标值越小,对系统越有益;效益型指标是指其指标值越大,对系统越有益;固定型指标是指其指标值越趋近于某一值,对系统越有益^[13]。为消除指标间由于量纲不同以及属性不同而影响决策结果,需要对判断矩阵进行规范化处理。

目标的距离和高度为成本型指标,即目标的距离越小,威胁程度越高;目标的高度越低,威胁程度越高。其规范化公式为:

$$y_{ij} = (\max_i x_{ij} - x_{ij}) / (\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}) \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2$

目标的速度、加速度、跟踪距离误差、目标类型为效益型指标,即目标的速度越大,威胁程度越高;目标的加速度越大,威胁程度越高;雷达对目标的跟踪距离误差越大,威胁程度越高;目标类型的量化值越大,威胁程度越高。其规范化公式为:

$$y_{ij} = (x_{ij} - \min_i x_{ij}) / (\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}), \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, m; j = 3, 4, 5, 6$

目标的敌我属性,飞行航向以及是否进入制导武器的有效杀伤区为固定型指标,即目标敌我属性表示为“1”时,威胁程度最高;目标的飞行航向表示为“0”时,威胁程度最高;目标进入制导武器的有效杀伤区,此时 r_i 表示为“1”,威胁程度最高。其规范

化公式为:

$$y_{ij} = 1 - \frac{x_{ij} - x_{j0}}{\max_i |x_{ij} - x_{j0}|},$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 7, 8, 9 \quad (4)$$

式中: x_{j0} 为固定型指标 x_{ij} 的最优固定值。

经过以上公式计算,可得到规范化判断矩阵 $\mathbf{Y} = (y_{ij})_{m \times n}$ 。

第 4 步:确定第 j 个参数指标的信息熵值。

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m b_{ij} \ln b_{ij}, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\text{式中: } b_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij}.$$

第 5 步:计算第 j 个参数指标的熵权。

$$e_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^n (1 - H_j)}, j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

第 6 步:计算综合权重。利用信息熵综合决策法得到的各指标的权值为客观性权值,有时可能会因为指标权值客观性太强而出现权值不合理的缺陷,针对这一缺陷,将其与主观权重法相结合,从而得到更为合理的指标权值^[14-15]。主观权重通过专家经验给出,表示为:

$$\{z_j\} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

将熵权与主观权重相结合,得到综合权重:

$$\lambda_j = e_j z_j / \sum_{j=1}^n e_j z_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

第七步:根据综合权重,计算威胁度值。

$$t_i = \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

式中: t_i 表示为第 i 个目标的威胁度值。

1.2 任务综合优先级的规划

任务的综合优先级由其目标威胁度、任务工作方式优先级以及任务截止期共同决定,任务截止期表示为任务的最晚可执行时间。综合优先级的设计过程可分为 2 步,先由工作方式优先级 p_{rk} 和目标威胁度 t_k 得到一级综合优先级 p'_k ,再由 p'_k 和 d_k 得到最终综合优先级 P_k 。

第 1 步:

$$p'_k = t_k + p_{rk} \quad (10)$$

一级综合优先级用来表示同一类型任务中不同威胁程度的目标任务的优先级。根据 1.1 节中的目标威胁度计算方法得到的目标威胁度为 0 到 1 之间的值,对目标威胁度和工作方式优先级直接相加得到的一级综合优先级,可以实现在数值上对同一类型任务中不同威胁程度的目标任务的优先级的区分。

由于搜索任务和验证任务的优先级不涉及目标

威胁度,所以在对二者的优先级综合规划中,一级综合优先级即为工作方式优先级。

第 2 步:

$$P_k = f[g(p'_k), h(d_k)] \quad (11)$$

由于 p'_k 与 d_k 量纲不同,需分别进行归一化处理。本文中采用 $g(\cdot) = p'_k / p'_{\max}$ 对一级综合优先级进行归一化,其中 p'_{\max} 表示任务集合最大 p' ;采用 $h(\cdot) = d_{\min} / d_k$ 对截止期进行归一化,其中 d_{\min} 表示任务集合中最早的任务截止期。 $f(\cdot)$ 是对一级综合优先级和截止期的加权函数,函数表达式如下。

$$f(\cdot) = \eta g(\cdot) + (1 - \eta)h(\cdot) \quad (12)$$

式中: η 为加权值,其取值范围是 $[0, 1]$ 。

这里对一级综合任务优先级和任务截止期通过线性加权得到最终综合优先级,可以通过选取不同的权值 η 来增加或减小任务目标威胁度和工作方式优先级对最终综合优先级的影响。如果任务为搜索或验证任务,则主要是调节工作方式优先级对最终综合优先级的影响。

2 雷达任务建模及任务调度

2.1 任务模型建立

相控阵雷达须执行的任务主要有搜索、验证、跟踪以及失跟处理等任务,在此对这些任务进行建模。任务通过以下模型进行描述:

$$q_k = \{t_{ek}, \Delta t_k, \omega_k, P_k\} \quad k = 1, 2, \dots \quad (13)$$

式中: q_k 为第 k 个任务; t_{ek} 和 Δt_k 为每个任务的期望执行时刻和所需执行时间长度; ω_k 和 P_k 为每个任务的时间窗和综合优先级,其中时间窗的意思是任务实际执行时刻可以在其期望执行时刻前后移动的时间范围^[16-17]。

2.2 任务调度过程

假设雷达在一个调度间隔 ($S_I = [t_0, t_n]$) 内有 N 个任务请求 $\{q_1, q_2, \dots, q_N\}$ 。

第 1 步:计算出这 N 个任务的综合优先级,并将这些任务按照综合优先级进行排序,形成任务申请链表 $Q^* = \{q_1^*, q_2^*, \dots, q_N^*\}$ 。

第 2 步:从申请链表中取出任务 q_k^* ,确定其是否满足本间隔时间调度的要求。若满足,则根据其期望执行时刻安排实际执行时间,如果其期望执行时刻被优先级更高的任务所占用,则根据其时间窗对实际执行时间进行适当偏移。送入执行链表,转第 4 步;若不满足,转第 3 步。

第 3 步:观察任务 q_k^* 的截止期 $d_k = t_{ek} + \omega_k$ 是否满足 $d_k + \Delta t_k \geq t_n$,若满足,则将其送入延时链表,参与下一个调度间隔的任务调度;若不满足,则将其

送入删除链表。

第4步:检查任务申请链表是否为空。若申请链表不为空,则转第1步;否则说明所有任务申请都已处理完毕。

第5步:该间隔调度结束。

3 仿真实验及性能评估

3.1 性能评估指标

为了验证本论文方法的优越性,定义了以下指标,用于性能评估。

1) 调度成功率(S):

$$S = N_{\text{suc}} / N \quad (14)$$

式中: N_{suc} 为成功调度任务总数; N 为所有请求的任务总数。

2) 执行威胁率(E):

$$E = \left(\sum_{k=0}^{N_{\text{suc}}} t_k \right) / \left(\sum_{k=0}^N t_k \right) \quad (15)$$

执行威胁率用以反映调度方法对重要任务的调度性能。由于任务会出现实际执行时间不等于其期望执行时间的情况,而此时的任务虽被成功调度,但对其预期任务的执行在价值意义上会有所降低,所以在此提出修正执行威胁率(M)指标。

$$M = \frac{\sum_{k=0}^{N_{\text{suc}}} \left(1 - \frac{|t_{ek} - t_{sk}|}{\tau \omega_k} \right) t_k}{\sum_{k=0}^N t_k} \quad (16)$$

式中: t_{sk} 为任务 k 的实际执行时刻。修正执行威胁率不仅反映所采用的调度方法对重要任务的调度性能,还能够表征调度重要任务时,对其期望执行时间遵循程度的符合情况。

3.2 仿真验证

文献[7]提出了基于工作方式优先级加截止期准则(HPEDF)的调度方法,即根据任务的工作方式优先级和截止期对综合优先级进行规划,但着重考虑工作方式优先级。为证明本论文调度方法的优越性,下面对2种方法分别进行仿真。由于本文所提改进方法调度中涉及到对目标威胁度的计算,所以仿真分为2个方面:首先对改进方法中的目标威胁度计算进行仿真验证,再对2种方法的任务调度进行对比仿真。

假设有空域中A、B和C 3个目标,3个目标沿各自轨迹飞行,整个飞行时间为200 s,3个目标的起始速度都为400 m/s。A为我方战斗机目标;B为不明的干扰机目标;C为敌方战斗机目标。A首先匀速爬升(0~30 s),然后过渡到平飞(30~40 s),平飞一段

时间(40~70 s)后半圆轨迹飞行(70~117 s),最后背离雷达方向匀速飞行(117~200 s);对于B目标,首先匀速平飞(0~70 s),然后沿半圆轨迹飞行(70~110 s),最后背离雷达方向匀速平飞(110~200 s);对于C目标,首先匀速下降(0~30 s),然后过渡到平飞(30~40 s),平飞一段时间(40~70 s)后沿“S”轨迹飞行(70~150 s),最后继续匀速飞行(150~200 s),整个飞行过程中除沿“S”轨迹飞行外,始终保持向雷达靠近飞行。3个目标的航迹见图1。

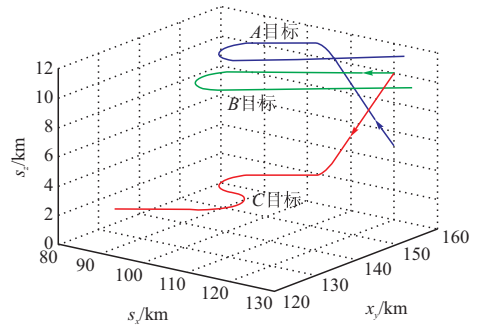


图1 目标航迹图

Fig. 1 Flight path of targets

利用3个目标各自的飞行状态参数和飞行轨迹参数以及雷达自身性能参数来计算出目标的威胁度值,其中目标的距离跟踪误差采用卡尔曼滤波的方法对其进行跟踪滤波得到,设雷达为制导雷达,其制导导弹的最大有效射程为180 km,相控阵雷达位于坐标原点处。这里,利用专家经验得到的各参数指标的主观权重设定为:

$$Z = \{0.15, 0.075, 0.075, 0.075, 0.1, 0.075, 0.25, 0.1, 0.1\} \quad (17)$$

式中按前后顺序依次对应为距离、高度、速度、加速度、跟踪距离误差、目标类型、敌我属性、武器射程和飞行航向。得到3个目标在各个时刻的威胁度值,见图2。

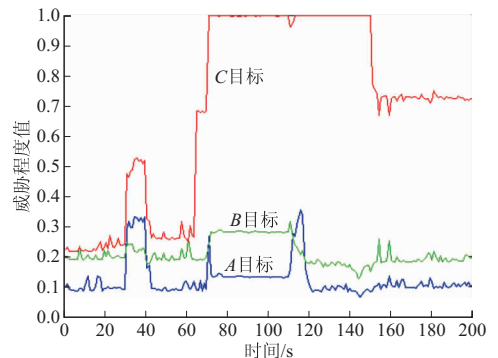


图2 目标威胁度值实时变化图

Fig. 2 Real-time threat degree of targets

C和B都为敌机,类型为战斗机和干扰机;A为我机,类性为战斗机。根据上述信息,再结合比较

图 1 中 3 个目标各自的航迹,基本可以得出:一般情况下, C 威胁度值 $> B$ 威胁度值 $> A$ 威胁度值。从图 3 中可以看出,采用本文提出的对目标威胁度计算方法得到目标威胁度结果,基本符合现实常规逻辑。图 2 中出现了 A 的威胁度值在某些时刻大于 B 的威胁度,这是因为 A 在这些时刻作出了机动, A 拥有了加速度的同时也导致了跟踪误差的增大,为避免雷达对其失跟,所以此时 A 的威胁度值大幅度增大,出现大于 B 的结果。 C 的威胁度值在某些时刻达到 1,是因为此时 3 个目标中, C 的各项参数指标都最具威胁性。通过上述分析,可以说明本文提出的对目标威胁程度计算方法与雷达系统在实际运用中对目标的判断规律相符合。

下面对 2 种方法的任务调度过程分别进行仿真,并对仿真结果进行分析对比。仿真中,除调度方法不同外,仿真参数和实验场景设置完全相同。

仿真参数:①调度间隔为 25 ms,仿真时间为 10 s;②搜索任务在仿真开始就均按其更新率周期产生,目标被随机搜索到;③搜索检测到的目标经验证确定为有效目标后,对其进行跟踪,跟踪任务按其更新率产生;④验证任务由两部分产生:目标验证与虚警;⑤失跟处理任务在跟踪起始后随机产生;⑥各个任务执行时间在实际中应根据系统的具体设计及实时情况来确定,在这里为便于仿真只做了简单设定。对于综合优先级设计中的权值 η ,设 $\eta=0.8$,表示为目标综合优先级的规划重点考虑目标威胁度和工作方式优先级的影响。

任务参数设置见表 1。

表 1 任务参数设置

Tab. 1 Parameter setting of tasks

任务事件	工作方式 优先级	驻留 时间/ms	时间 窗/ms	更新 率/Hz
验证	4	6	30	
跟踪	3	4	30	10
失跟处理	2	5	50	1
搜索	1	5	100	100

仿真实验场景设置为:相控阵雷达搜索到 A 、 B 、 C ,整个仿真过程对这 3 个目标进行跟踪,仿真参数中的 10 s 对应于图 2 中的 80~90 s 期间。

下面对 2 种方法进行仿真,分别得到图 3 的任务调度结果和表 2 的各评估指标结果,表 2 中数据为 1 000 次蒙特卡洛仿真得到的结果。

图 3 中, A 和 C 的跟踪任务的任务请求在期望执行时间上发生交叠,由于两者工作方式优先级相同,但 A 的截止期早于 C 的截止期,所以基于 HPEDF 方法的综合优先级规划结果为 A 任务优先级高于 C 任务。调度结果为安排 A 任务的实际执

行时间为其期望执行时间, C 任务的实际执行时间根据其时间窗进行适当的偏移。然而,从图 2 可知,实际上 C 的威胁程度应远远高于 A ,此时应该为 C 的跟踪安排更多的资源,所以当改进方法考虑目标威胁度的影响时,其综合优先级规划结果为 C 任务等级高于 A 的任务等级。调度结果显示安排 C 任务的实际执行时间为其期望执行时间, A 任务的实际执行时间根据其时间窗进行了适当的偏移。

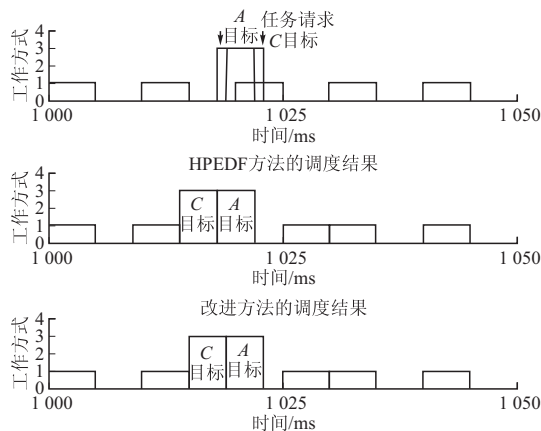


图 3 调度结果图

Fig. 3 Scheduling results

表 2 评估指标数据

Tab. 2 Data of evaluation index

调度方法	SSR	ETR	METR
HPEDF 方法	0.983	1	0.908
改进方法	0.981	1	0.956

从表 2 可知,2 种方法能够成功调度大部分任务,但 HPEDF 方法的调度成功率略高于改进方法。两种方法的执行威胁率都为 1,但从修正执行威胁率可以看出,改进方法在调度高威胁度任务时,对其期望执行时间遵循的情况要好于 HPEDF 方法。因此,改进方法虽然任务调度成功率略低于改进方法,但其优先保证了对高威胁度任务的执行,符合相控阵雷达任务调度的实际需求。

综合上述仿真实验以及分析可以得出,本文所提方法在相控阵雷达资源调度中引入了对目标威胁程度的判断,使资源分配结果更加符合雷达系统的使用需求。提高了资源调度的有效性,与基于 HPEDF 准则的调度方法相比,在实际应用中具有一定的优势。

4 结语

现代战争中,雷达跟踪处理的目标的复杂程度越来越高,这就要求对大量目标任务要有一个合理有效调度方法。本文针对相控阵雷达的任务调度问

题,提出了一种基于威胁度等级评定的方法,并将其与基于 HPEDF 准则的调度方法进行了对比仿真实验,结果表明,该方法对高威胁度的目标任务执行具有一定的优越性,能够保证对雷达资源的有效分配。本文所构造的威胁度模型和提出的优先级设计方法主要针对跟踪任务和失跟处理任务,当多功能一体化相控阵雷达在执行干扰侦查、识别处理等其他任务时,还可以对威胁度模型中的指标参数进一步扩展,从而得到更具实用价值的结果。

参考文献(References):

[1] 胡卫东,郁文贤,卢建斌,等. 相控阵雷达资源管理理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
HU W D, YU W X, LU J B, et al. Phased Array Radar Resources Management Theory and Method[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)

[2] MOO P W, DING Z. Coordinated Radar Resource Management for Networked Phased Array Radar[J]. IET Radar Sonar Navigation, 2015, 9(8): 1009-1020.

[3] 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): 116-123.
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): 116-123. (in Chinese)

[4] 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. (in Chinese)

[5] 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): 15-49.
ZHANG B Y, CAI Q Y. Computer Control Techniques of Phased Array Radars[J]. Systems Engineering and Electronics, 1999, 21(1): 15-49. (in Chinese)

[6] GOPALAKRISHNAN S, CACCAMO M, SHIH C S. Finite-Horizon Scheduling of Radar Dwells with On-line Template Construction[C]//Proc of 25th IEEE International Real-Time Systems Symposium. Lisbon, Portugal: IEEE, 2004: 23-33.

[7] 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)

[8] CHENG T, HE Z S, TANG T. Dwell Scheduling Al-

gorithm for Multifunction Phased Array Radars Based on the Scheduling Gain[J]. Journal of Systems Engineering, 2008, 19(3): 479-485.

[9] 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)

[10] LU J B, XIAO H, XI Z M, et al. Multifunction Phased Array 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] 王晓峰,朱荣新,周杰. 多基地雷达检测性能研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2002, 3(2): 42-46.
WANG X F, ZHU R X, ZHOU J. Study of the Multistatic Radar Detection Performance[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2002, 3(2): 42-46. (in Chinese)

[13] 余胜春. 基于信息熵的多属性参数系统决策方法[J]. 数学杂志, 2012, 32(6): 1111-1114.
YU S C. Decision Method of Multi-attribute System Based on Information Entropy[J]. Journal of Math, 2012, 32(6): 1111-1114. (in Chinese)

[14] 尹德进,王宏力. 基于信息熵与证据推理的不确定多属性决策方法[J]. 计算机应用, 2011, 31(5): 1308-1310.
YIN D J, WANG H L. Uncertain Multiattribute Decision Making Method Based on Entropy and Evidential Reasoning Approach[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(5): 1308-1310. (in Chinese)

[15] ZHOU X, ZHANG F M, HUI X B, et al. Group Decision-making Method Based on Entropy and Experts Cluster Analysis[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(3): 468-472.

[16] 郭坤鹏. 相控阵雷达自适应调度算法研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2015.
GUO K P. Research on Adaptive Scheduling Algorithm for Phased Array Radars[D]. Hangzhou: Hangzhou Electronic Science and Technology University, 2015. (in Chinese)

[17] HUIZING A G, BLOEMEN A F. An Efficient Scheduling Algorithm for a Multifunction Radar[C]//Proc of IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 1996: 359-364.