

## 分时体制多目标干扰系统干扰资源综合管控

王鑫<sup>1,2</sup>, 吴华<sup>1</sup>, 程嗣怡<sup>1</sup>, 陈游<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 中国人民解放军94354部队, 山东 济宁 272400)

**摘要:** 针对先进战机分时体制干扰系统多目标干扰时的资源管理问题, 采用多属性决策方法建立了目标威胁等级评估模型, 并运用折中排序法(VIKOR)对目标威胁等级进行偏序处理, 重新整合了干扰任务请求队列; 从空间域、频率域、能量域和时间域4个方面综合分析了干扰资源的限制条件并对干扰效果进行了定量描述; 最后提出了分时体制干扰系统多目标干扰资源管理算法。偏序处理后干扰任务请求队列的整合与干扰时机、参数的控制可以有效提高干扰系统的效率, 提升干扰系统的智能化水平。

**关键词:** 多目标干扰; 分时; 偏序; 干扰任务队列整合; 干扰资源管理

**中图分类号:** V271.4; TN97

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-637X(2014)04-0020-06

## Integrated Management of Jamming Resources in Time-Sharing and Multi-Target Interference Systems

WANG Xin<sup>1,2</sup>, WU Hua<sup>1</sup>, CHENG Si-yi<sup>1</sup>, CHEN You<sup>1</sup>

(1. College of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;  
2. No. 94354 Unit of PLA, Jining 272400, China)

**Abstract:** To study the integrated management of jamming resources in time-sharing and multi-target interference systems onboard advanced fighters, the target threat evaluation model was built up by the multi-attribute decision-making method. Compromise sorting method was used to process partial order of target threat and reintegrate interference task request queue. The limitations of interference resource were analyzed comprehensively from the four aspects as space, frequency, energy and time, and quantitative descriptions were given on the effect of interference. An algorithm for jamming resource management in time-sharing and multi-target interference systems was proposed in the end. After processing partial order, the efficiency of interference systems and the degree of intelligence in interference systems are improved by the reintegrated interference task request queue and the control of interfere time and parameters.

**Key words:** multi-target interference; time-sharing; partial order; task request queue integration; jamming resources distribution

### 0 引言

随着空战环境日益复杂, 战机可能同时遭遇敌方多种不同类型威胁源的照射威胁, 对敌方多目标实施有效的干扰, 保全自身安全, 已经成为电子对抗系统的主要任务之一。基于分时体制的多目标有源干扰系统, 对多个威胁目标信号进行实时分析, 利用多个干扰

通道依次形成单个脉冲干扰序列, 周期性实现对多个威胁雷达信号的逐个脉冲干扰。对干扰资源的管理和控制, 特别是对干扰通道和干扰时域窗的管控, 是在干扰资源有限的条件下, 实现分时多目标干扰, 提高干扰效率的关键问题之一。

关于干扰资源管理和控制的研究已有很多, 文献[1-3]以概率准则为效能评估准则, 采用遗传算法、动态规划和模拟退火等算法实现了一对一干扰条件下的资源优化分配, 为的一对多干扰资源分配问题的解决提供了方法和思路; 文献[4-6]分别通过多波束干扰机分解、多波束指向固化、目标分类和任务整合的方法思路实现了多波束多目标干扰资源的优化分配。这些

收稿日期: 2013-06-06

修回日期: 2013-06-21

基金项目: 陕西省自然科学基金(2012JQ8019); 电子信息控制国防重点实验室基金(9140C1005051103)

作者简介: 王鑫(1989-), 男, 山东潍坊人, 硕士生, 研究方向为电子对抗理论与技术。

研究以单机单目标干扰系统或单机多波束多目标干扰系统为研究对象,以威胁评估结果为依据着重对于干扰功率进行了优化分配,而对单机单波束分时体制多目标干扰系统鲜有研究,分时体制多目标干扰系统在同一时间仅能干扰一个目标,而利用多个干扰通道分时工作则能实现多目标干扰,所以与上述研究相比,干扰通道资源和干扰时间资源的优化分配是分时体制干扰系统资源管控的研究重点。在复杂战场环境下,获取目标信息的不确定性导致目标威胁等级不可比较,本文利用折中排序法对目标威胁评估结果进行了偏序处理,并对干扰任务请求队列进行了整合,建立分时体制干扰资源综合管控算法,结合目标威胁度和干扰系统各域干扰限制条件对于干扰资源进行管控,特别是对各目标干扰时域窗进行了管理和控制。

### 1 分时体制多目标干扰工作原理

单机电子对抗系统由电子支援(ESM)子系统、有源干扰(AECM)子系统、控制管理(PMS)子系统和箔条/红外干扰(CFDS)子系统组成。在ESM引导下,AECM子系统可对干扰资源进行分配、调整 and 状态监控,包括干扰通道、干扰方位、干扰频域和干扰时域的控制和管理,干扰参数的选择和控制;AECM子系统采用分时干扰方式,接收ESM传输来的需要干扰的威胁雷达信号特性,实时处理,按照威胁雷达信号威胁等级和干扰能力等条件,确定干扰通道,产生时间干扰窗口序列,确定干扰的起始点和终点,各干扰通道按周期分时工作,实现对多部威胁雷达信号的逐个波束干扰。

## 2 综合管控模型

### 2.1 威胁等级评估模型

威胁等级评估由ESM子系统完成,是进行干扰综合管控的重要依据。本文采用多属性决策方法建立威胁等级评估模型,运用线性加权确定目标威胁度并以VIKOR方法对威胁度进行了偏序处理,以分析目标威胁度差距较小、不可比较情况下的干扰决策问题。

#### 1) 多属性决策模型。

设作战区域共有  $m$  部雷达,每部雷达有  $n^*$  个属性,分时干扰系统共有  $c$  个干扰通道,目标集为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ ,属性集为  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{n^*}\}$ ,属性权重为  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{n^*}\}$ ,目标威胁度为  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_{n^*}\}$ ,选择雷达类型、工作状态、目标距离、目标速度等指标建立指标体系(对应  $n^* = 4$ )。其中,雷达类型和雷达工作状态为定性指标,目标距离位置和为目标速度为定量指标,第  $i$  部雷达的威胁度为

$$w_i = u_1 \cdot w_p^i + u_2 \cdot w_Q^i + u_3 \cdot w_{\text{position}}^i + u_4 \cdot w_v^i \quad (1)$$

雷达类型和雷达工作状态可以根据雷达信号载频、重频、脉宽等脉冲描述字和信号时域、信号形式等判断,其属性值确定如表1所示。

表1 定性指标属性值

Table 1 Attribute value of oauitative index

雷达属性 $w_p^i$		工作状态 $w_Q^i$	
弹载末制导	0.9	制导	0.9
机载火控雷达	0.7	跟踪	0.7
机载预警雷达	0.3	搜索	0.3

空战中威胁目标距离我机越近,我机被探测、跟踪和落入敌攻击区的可能性越大,目标威胁越大,即距离威胁度函数  $w_{\text{position}}(r)$  随距离的减小而变大,且变大的趋势逐渐变快(导数小于零且逐渐增大),因此采用以下曲线作为目标距离威胁属性数学表达式,其中,  $r_1, r_2$  为最小和最大威胁距离。

$$w_{\text{position}}^i(r) = \begin{cases} 1, & r_i \leq r_1 \\ 1 - \cos\left(\frac{r_i - r_1}{r_2 - r_1} \cdot \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2}\right), & r_1 < r_i \leq r_2 \\ 0, & r_2 < r_i \end{cases} \quad (2)$$

威胁目标的速度越大,我机的准备时间相应减小,威胁程度就越大,速度威胁度函数如式(3)所示,其中  $v_i, v_0$  分别为目标  $i$  的速度和我机速度。

$$w_v^i = \begin{cases} 0.1, & v_i < 0.6v_0 \\ -0.5 + v_i/v_0, & 0.6v_0 \leq v_i \leq 1.5v_0 \\ 1.0, & v_i > 1.5v_0 \end{cases} \quad (3)$$

#### 2) 威胁度偏序处理。

引用公理集合论中偏序<sup>[7]</sup>和全序的概念,多属性决策分为全序决策和偏序决策,全序决策要求目标之间均可比较,而偏序决策允许目标威胁度之间存在不可比较性<sup>[8]</sup>。在复杂战场环境下,由于目标信息的模糊性,目标威胁度之间会存在不可比较的情况,若仍根据全序评估结果分配干扰资源,会导致干扰效率降低,利用折中排序法(VIKOR)<sup>[9]</sup>对威胁度进行偏序处理的步骤如下所述。

##### ① 确定正理想解和负理想解。

$$p^* = \{p_1^*, p_2^*, \dots, p_n^*\} = \{\max_i p_{ij}\} \quad (4)$$

$$p^- = \{p_1^-, p_2^-, \dots, p_n^-\} = \{\min_i p_{ij}\} \quad (5)$$

式中:  $p_{ij}$  表示第  $i$  个目标的第  $j$  个属性值 ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n^*$ ),目标属性指标均为效益型指标;  $p^*$  为正理想解,表示各指标威胁度最大值集合;  $p^-$  为负理想解,表示各指标威胁度最小值集合,目标属性值越接近正理想解威胁度越高,越接近负理想解威胁度越低。

② 计算威胁指标整体效益值  $S_i$  和威胁指标个体遗憾度  $R_i$ 。

$$S_i = \sum_j w_j \left( \frac{P_j^* - P_{ij}}{P_j^* - P_j^-} \right) \quad (6)$$

$$R_i = \max_j \left\{ w_j \left( \frac{P_j^* - P_{ij}}{P_j^* - P_j^-} \right) \right\} \quad (7)$$

式中:  $S_i$  为威胁目标整体指标与理想解的加权距离;  $R_i$  为威胁目标单个属性指标与理想解的最大加权距离。  $S_i$  和  $R_i$  越小, 相应目标威胁度越高。

③ 计算威胁程度比率  $Q_i$ 。

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (8)$$

式中:  $S^* = \min S_i$ ;  $S^- = \max S_i$ ;  $R^* = \min R_i$ ;  $R^- = \max R_i$ ;  $v$  为“大多数准则”策略的权重或最大群体效用权重;  $Q_i$  值越小目标威胁度越高,  $Q_i$  综合考虑了威胁度评估中指标整体和个体的影响, 使评估更加全面、合理。

## 2.2 干扰任务请求队列模型

干扰任务队列  $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_l\}$ ,  $l = 1, 2, \dots, m$ , 其中每一个干扰任务队列包括至少一个干扰目标。威胁度偏序处理结果根据以下两个条件确定两目标间威胁度是否具有可比性, 可比较的目标根据威胁度依次排入干扰任务请求队列, 不可比较的目标视为威胁等同排入同一个干扰请求任务队列。

条件1 威胁可比较性判定,  $Q_{(2)} - Q_{(1)} \geq 1/(m-1)$ 。其中,  $m$  为威胁目标个数,  $1/(m-1)$  为可比较性判定门限,  $Q_{(1)}$ 、 $Q_{(2)}$  为根据  $Q_i$  排序第一和二的目标  $x^{(1)}$ 、 $x^{(2)}$  对应的值, 若满足条件则两目标威胁度具有可比较性, 反之不具有可比较性。

条件2 决策过程中可接受的稳定性, 根据  $Q_i$  排序第一的目标  $x^{(1)}$  必须是  $S_i$  或  $R_i$  排序最优的目标。

当以上两个条件成立时, 可根据  $Q_i$  的大小对目标威胁排序,  $Q_i$  值越小, 意味着目标威胁越大。如果以上条件中有一个不满足, 则做以下处理:

1) 如果不满足条件2, 则认为  $x^{(1)}$  和  $x^{(2)}$  威胁度等同, 即  $x^{(1)}$  和  $x^{(2)}$  两目标排入同一干扰请求任务中;

2) 如果不满足条件1, 通过  $Q_{(M)} - Q_{(1)} < \frac{1}{m-1}$  得到最大的  $M$ , 目标  $x^{(1)}$ 、 $x^{(2)}$ 、 $\dots$ 、 $x^{(M)}$  两两差值均未超过判定门限, 即相互之间不具可比性, 则该  $M$  个目标在同一干扰任务请求队列中。

## 2.3 干扰条件约束模型

有源干扰成功必须在时、频、空、能4个域上满足一定的干扰条件, 任何一项不满足, 都将导致干扰无效, 本文针对各域干扰限制条件建立模型并进行分析, 从而对干扰资源进行管理。

1) 空间域干扰约束模型。

$$e_{js}^i = \begin{cases} \frac{(\theta_{j0.5}^i - |\theta_j^i - \theta_r^i|) \cdot (\psi_{j0.5}^i - |\psi_j^i - \psi_r^i|)}{\theta_{j0.5}^i \cdot \psi_{j0.5}^i}, & |\theta_j^i - \theta_r^i| \leq \theta_{j0.5}^i/2 \\ & \text{且 } |\psi_j^i - \psi_r^i| \leq \psi_{j0.5}^i/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\theta_j^i$ 、 $\theta_{j0.5}^i$ 、 $\psi_j$ 、 $\psi_{j0.5}$  分别是干扰机的方位角、俯仰角天线轴方向及半功率波束宽度;  $\theta_r^i$ 、 $\psi_r^i$  为雷达的方位角和俯仰角; 空间对准因子  $e_{js}^i$  反映了干扰波束与雷达接收波束在空间上的对准程度, 数值越大, 表明波束空间对准程度越高, 干扰效果越好。

2) 频率域干扰约束模型。

$$e_{jf}^i = \begin{cases} \frac{\Delta f_j^i - |f_j^i - f_r^i|}{\Delta f_r^i}, & f_{j1} \leq f_{r2} \text{ 且 } f_{j2} \geq f_{r1} \\ 0, & f_{j1} > f_{r2} \text{ 或 } f_{j2} < f_{r1} \end{cases} \quad (10)$$

$$f_{r2} = f_r^i + \frac{1}{2} \Delta f_r^i \quad (11)$$

$$f_{r1} = f_r^i - \frac{1}{2} \Delta f_r^i \quad (12)$$

$$f_j^i = \frac{1}{2} [\min(f_{r2}^i, f_{j2}^i) + \max(f_{r1}^i, f_{j1}^i)] \quad (13)$$

$$\Delta f_j^i = \min[\min(f_{r2}^i, f_{j2}^i) - \max(f_{r1}^i, f_{j1}^i), \Delta f_{j\max}^i] \quad (14)$$

式中:  $f_{j1} \sim f_{j2}$  是干扰频率范围;  $f_{r1} \sim f_{r2}$  是雷达接收机频率范围;  $f_j^i$ 、 $\Delta f_j^i$  分别为干扰目标  $x_i$  时干扰中心频率和干扰带宽;  $f_r^i$ 、 $\Delta f_r^i$  为目标  $x_i$  的雷达中心频率和接收机带宽;  $\Delta f_{j\max}^i$  为干扰能够实现的最大干扰带宽; 干扰频率因子  $e_{jf}^i$  反映了干扰频率域上的对准程度, 在雷达接收机通带范围之内, 中心频率越接近, 频带重合越多, 则  $e_{jf}^i$  数值越大, 表明干扰信号进入雷达接收机越多, 干扰效果越好。

3) 能量域干扰约束模型。

空间域和频率域约束条件对干扰效果的影响都反映在干扰信号进入雷达接收机的情况<sup>[10]</sup>, 结合干扰能量域参数和雷达威胁目标抗干扰措施建立能量域干扰约束模型。

$$e_{jp}^i = 1.0 - P_d^i(P_f, R_{\text{SNR}}) \quad (15)$$

式中: 能量干扰效果因子  $e_{jp}^i$  为干扰条件下目标雷达的漏警概率;  $P_d^i$ 、 $R_{\text{SNR}}^i$  分别为单个脉冲线性检波时的检测概率和雷达检波时的信噪比。

$$P_d^i(P_f, R_{\text{SNR}}) = e^{-R_{\text{SNR}}^i} \int_{\sqrt{-2 \ln(P_f)}}^{+\infty} x e^{-\frac{x^2}{2}} I_0(x \sqrt{2 R_{\text{SNR}}^i}) dx \quad (16)$$

$$R_{\text{SNR}}^i = 10^{0.1(-10 \lg(e_{js}^i/K_s) + R_{\Delta i})} \quad (17)$$

$$e_{je}^i = (R_{N,S} \cdot e_{jf}^i \cdot e_{js}^i) / e_{je}^i \quad (18)$$

$$e_{je}^i = R_{N,S} / R_{N,S,K} \quad (19)$$

式中:  $R_{N,S}$ 、 $R_{N,S,K}^i$  为采取某种抗干扰措施前、后的干信比; 雷达抗干扰改善因子  $e_{je}^i$  表示采取抗干扰措施后雷

达性能的提升; $e_p^i$ 为有效干信比因子; $K_j$ 为雷达压制系数; $R_{a,1}$ 为虚警概率一定、发现概率为0.1时的雷达检测因子; $I_0(z)$ 是宗量为 $z$ 的零阶修正贝塞尔函数,定义为 $I_0(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^{2n}}{2^{2n} \cdot n! \cdot n!}$ 。上述模型中, $R_{N,S}$ 为干扰系统可控参数, $e_p^i, K_j, R_{a,1}$ 可通过ESM子系统对目标信号分选识别后,对比相应数据库获取。

4) 时间域干扰约束模型。

$$e_p^i = \begin{cases} \frac{t_{r2}^i - t_j^i}{t_{r2}^i - t_{r1}^i} \cdot h^{ki}, & t_{r2}^i \geq t_j^i \geq t_{r1}^i \\ 0, & t_j^i > t_{r2}^i \end{cases} \quad (20)$$

式中: $h^{ki} = 1$ 表示第 $k$ 个干扰通道对第 $i$ 个目标实施干扰, $h^{ki} = 0$ 表示不实施干扰; $t_{r1}^i$ 是干扰机接收到威胁雷达 $x_i$ 信号的时刻; $t_{r2}^i$ 是对 $x_i$ 干扰结束的时刻,取决于干扰存储时间和干扰实施时间; $t_j^i$ 是干扰机开始发射干扰信号的时刻,取决于系统反应时间和具体战场态势; $e_p^i$ 反映出干扰在时间域对雷达的影响程度, $e_p^i$ 越大,表明干扰信号在时间域上干扰时间节点越好,干扰效果越好。

时域窗管控模型为

$$[e_{fj}^i, e_{\mu}^i, e_{pb}^i, e_{\mu}^i, h^{ki}, w_i] = \operatorname{argmin} \sum_i t_{r2}^i \quad (21)$$

约束条件为:① $e_{fj}^i, e_{\mu}^i, e_{pb}^i, e_{\mu}^i \in [0, 1]$ ;② $(1 - e_j^i) \cdot w_i < w_{th}$ ;③ $0 \leq \sum_k \sum_{i=1}^m h^{ki} \leq c$ ,且 $\sum_k h^{ki} = 1$ ;④ $h^{ki} = 0$ 或 $h^{ki} = 1$ 。

约束条件②为干扰结束判定条件,其中: $e_j$ 为综合条件①4个域的干扰约束模型,确定的有效干扰因子 $e_j = e_{pb} \cdot e_{\mu}$ , $e_j$ 越大表明干扰在时、频、空、能4个域上整体干扰效果越好; $w_{th}$ 为威胁度检测门限,由作战环境和任务综合确定,满足条件②表明目标雷达在干扰之后已不构成足够威胁,则该目标将不再占用原有干扰通道,干扰通道将对干扰任务队列中的下一目标进行干扰。

表2 目标参数设置

Table 2 Target parameter setting

目标	雷达类型	工作状态	目标距离 $R/\text{km}$	目标速度 $V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	方位角 $\theta/(\text{°})$	俯仰角 $\psi/(\text{°})$	频率 $f/\text{GHz}$	接收带宽 $\Delta f/\text{MHz}$	改善因子 $e_p/\text{dB}$
$x_1$	弹载末制导	跟踪	30	326	0.6	3.6	12.725	5	1.5
$x_2$	机载火控	跟踪	100	285	25.0	-18.7	9.004	9	2.5
$x_3$	弹载末制导	搜索	50	320	16.2	19.3	12.562	5.4	1.5
$x_4$	机载预警	搜索	200	260	-45.0	-20.7	10.326	6.8	2
$x_5$	机载火控	搜索	120	290	-58.5	0.5	9.246	7	2.5
$x_6$	机载火控	制导	90	300	-10.8	14.5	9.142	4	2.5

根据表1和式(2)、式(3)得决策矩阵,如表3所示。通过对判断矩阵进行层次分析法处理<sup>[11]</sup>,得到指标权重为 $U = [u_1, u_2, u_3, u_4] = [0.3, 0.2, 0.4, 0.1]^T$ ;根据式(1)得各目标威胁度为 $W = [0.85879, 0.56412, 0.77697, 0.17879, 0.37528, 0.67783]$ 。

约束条件③、④表示在同一时间,一个干扰通道只能干扰一个目标,一个目标也仅需一个干扰通道资源。

2.4 干扰资源综合管控算法

综合以上模型,干扰资源综合管控算法具体如下:

- 1) 由式(1)确定 $x_i$ 的威胁度 $w_i$ ;
- 2) 由式(4)~式(8)对威胁等级进行偏序处理,并由判定条件1,2整合干扰任务请求队列 $Y$ ;
- 3) 由式(9)~式(19)分别确定干扰空间域、频率域和能量域的限制条件,并确定相应的干扰参数;
- 4) 根据干扰任务请求队列进行 $c$ 个干扰通道资源管理,当干扰任务请求子队列中目标数多于 $c$ 个时,根据式(16)检测概率大小顺序,依次选取干扰目标,当干扰目标数小于 $c$ 时,剩余干扰通道分配给下一干扰请求子队列中的目标;
- 5) 根据式(20)、(21)及约束条件①~④确定干扰时机、持续时间和结束时间,满足约束条件②的目标将不再占用干扰通道资源,由步骤4)重新选取目标进行干扰。

3 仿真实例

仿真场景设置如下:某次战斗行动,我方飞机速度 $v_m$ 为330 m/s,AECM系统有4个干扰通道,方位角 $-60^\circ \sim 60^\circ$ ,俯仰角 $-20^\circ \sim 20^\circ$ ,干扰方位波束主瓣宽度为 $6^\circ$ ,俯仰波束主瓣宽度为 $4^\circ$ ,干扰频率范围为9~13 GHz,最大干扰带宽为200 MHz,假定最小威胁距离和最大威胁距离分别为 $r_1 = 70 \text{ km}$ , $r_2 = 150 \text{ km}$ ,压制系数 $K_j = 32 \text{ dB}$ ,预定虚警概率为 $P_f = 10^{-6}$ , $R_{N,S} = 37 \text{ dB}$ ,系统反应时间为0.5 s,作战区域内有6个威胁目标,假设ESM系统截获各目标时间基本相同,令 $t_{r1} = 0$ ,目标分别记为 $x_i (i=1, 2, \dots, 6)$ ,各个威胁目标的参数设置如表2所示。

按照式(4)和式(5)计算出正理想解和负理想解 $p^* = \{0.9, 0.9, 1, 0.4879\}$ , $p^- = \{0.3, 0.3, 0, 0.2879\}$ 。

利用式(6)~式(8)计算偏序处理结果 $S_i, R_i$ 和 $Q_i$ ,其中 $v$ 取0.5以同时追求群体指标效用最大化和

个体指标遗憾最小化,结果如表4所示。

表3 决策矩阵

Table 3 Decision matrix

目标	雷达类型	工作状态	目标距离	目标速度
$x_1$	0.9	0.7	1	0.4879
$x_2$	0.7	0.7	0.4444	0.3636
$x_3$	0.9	0.3	1	0.4697
$x_4$	0.3	0.3	0	0.2879
$x_5$	0.7	0.3	0.1685	0.3788
$x_6$	0.7	0.9	0.6173	0.4091

表4  $S_i, R_i, Q_i$

Table 4 Parameters  $S_i, R_i$  and  $Q_i$

目标	S	R	Q
$x_1$	0.0667	0.067	0
$x_2$	0.4511	0.2222	0.4393
$x_3$	0.2091	0.2	0.2763
$x_4$	1	0.4	1
$x_5$	0.6872	0.3326	0.7313
$x_6$	0.2925	0.1531	0.2506

根据干扰任务请求队列两个判定条件确定干扰请求队列为  $Y_1 = \{x_1\}, Y_2 = \{x_6, x_3, x_2, x_5\}, Y_3 = \{x_4\}$ 。根据式(9)~式(19)确定各域干扰因子,并设置相应干扰参数,其中式(16)积分比较复杂,计算时需要采用数值技术或级数近似,文献[12]将信噪比作为变量,以虚警概率为参变量形成曲线,直观地反映发现概率与各参数之间的关系,本文借助该曲线确定能量干扰因子,以减小计算复杂度。各域干扰限制参数如表5所示。

表5 干扰限制参数

Table 5 The limited interference parameters

目标	$e_{\beta}$	$\theta_j/(\circ)$	$\psi_j/(\circ)$	$e_{\beta}$	$f_j/\text{GHz}$	$\Delta f_j/\text{MHz}$	$e_{\beta}$
$x_1$	1	0.6	3.6	1	12.725	5	0.99
$x_2$	1	25	-18.7	0.917	9.0042	8.5	0.85
$x_3$	1	16.2	19.3	1	12.562	5.4	0.99
$x_4$	0.825	-45	-20	1	10.326	6.8	0.70
$x_5$	1	-58.5	0.5	1	9.246	7	0.90
$x_6$	1	-10.8	14.5	1	9.142	4	0.90

根据算法步骤4),首先对目标  $x_1, x_2, x_5, x_6$  分配干扰通道资源实施干扰,开始干扰时间为0.5s,设定门限  $w_{th} = 0.12$ ,根据算法步骤5)确定各目标干扰时间因子  $e_{\beta} = [0.8691, 0.92625, 0.7561, 0.91453]$ ,干扰结束时间  $t_{e2} = [3.82, 6.78, 2.05, 5.85]$ ,然后再根据步骤4)和5)分别在2.05s和3.82s时给  $x_3, x_4$  分配干扰通道资源,同时相应的目标  $x_5, x_1$  不再占用干扰资源,相应干扰时间参数为  $e_{\beta} = [0.8542, 0.47018]$ ,  $t_{e2} = [14.06, 7.21]$ 。总共占用时间干扰资源  $\sum t_{e2}^i = 39.77$  s。

在开始干扰时间和门限设定不变的情况下,若仅按照威胁度  $W$  大小依次进行资源分配,则干扰通道资

源分配和干扰时域窗管理结果为:首先对  $x_1, x_3, x_6, x_2$  实施干扰,  $e_{\beta} = [0.8691, 0.85423, 0.91453, 0.92625]$ ,  $t_{e2} = [3.82, 3.43, 5.85, 6.78]$ ,分别在3.43s和3.82s时给  $x_5, x_4$  分配干扰通道资源,同时相应的目标  $x_3, x_1$  不再占用干扰资源,相应干扰时间参数为  $e_{\beta} = [0.7559, 0.4702]$ ,  $t_{e2} = [14.05, 7.21]$ 。总共占用时间干扰资源  $\sum t_{e2}^i = 41.14$  s。

对上述两种准则下时间干扰资源的分配情况进行分析,两种情况下干扰时间因子基本相同,即时域干扰效果相同的情况下,按照本文的干扰资源综合管控算法有效节约了干扰时间资源,提高了分时干扰系统的干扰效率和智能化水平。

## 4 结论

分时干扰是电子对抗系统实施多目标干扰的重要手段,资源综合管理和控制算法与硬件设备共同组成电子对抗系统的核心部分。本文对先进战机分时多目标干扰资源综合管控算法进行了研究,通过对威胁等级进行偏序处理,对威胁等级不可比较的情况进行分析并整合干扰任务请求队列,结合干扰任务请求队列和干扰限制条件对干扰资源进行分配,特别是对干扰通道以及干扰时域窗的管理控制进行了分析,提高了分时多目标干扰系统的效率和智能化水平。

## 参考文献

- [1] 何静波,彭复员,胡生亮.基于作战任务的雷达干扰决策模型[J].现代雷达,2007,29(1):20-22.  
HE J B, PENG F Y, HU S L. Radar jamming decision making model based on battle mission[J]. Modern Rada, 2007, 29(1):20-22.
- [2] 任松,司长哲,雷军.雷达干扰机分配的模糊多属性动态规划模型[J].系统工程与电子技术,2008,30(10):1909-1913.  
REN S, SI C Z, LEI J. Fuzzy multi-attribute dynamic programming model for radar's disturbing machine allocation [J]. Systems Engineering and Electronic, 2008, 30(10): 1909-1913.
- [3] 刘以安,倪天权,张秀辉,等.模拟退火算法在雷达干扰资源优化分配中的应用[J].系统工程与电子技术,2009,31(8):1914-1917.  
LIU Y A, NI T Q, ZHANG X H, et al. Application of simulated annealing algorithm in optimizing allocation of radar jamming resources[J]. Systems Engineering and Electronic, 2009, 31(8):1914-1917.
- [4] 沈阳,陈永光,李修和.基于0-1规划的雷达干扰资源

- 优化分配研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(5): 528-532.  
SHEN Y, CHEN Y G, LI X H. Research on optimal distribution of radar jamming resource based on zero-one programming[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(5): 528-532.
- [5] 高晓光, 胡明, 郑景嵩. 突防任务中的单机对多目标干扰决策[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(6): 1239-1243.  
GAO X G, HU M, ZHENG J S. Jamming strategy for single plane to multi-target in task of penetration[J]. Systems Engineering and Electronic, 2010, 32(6): 1239-1243.
- [6] 宋海方, 吴华, 程嗣怡, 等. 多波束干扰系统干扰资源综合管理算法[J]. 兵工学报, 2013, 34(3): 332-338.  
SONG H F, WU H, CHENG S Y, et al. Integrated management algorithm of jamming resources in multi-beam jamming systems[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(3): 332-338.
- [7] 陈小卫, 王文双, 宋贵宝, 等. 基于模糊偏序关系的混合型多属性决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(3): 529-533.  
CHEN X W, WANG W S, SONG G B, et al. Hybrid multi-attribute decision making based on fuzzy preference relation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(3): 529-533.
- [8] 张杰, 唐宏, 苏凯, 等. 效能评估方法研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 23-27.  
ZHANG J, TANG H, SU K, et al. Research on effectiveness evaluation methods[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 23-27.
- [9] 李为相, 李帮义. 基于泛性模糊数的VIKOR方法研究[J]. 模糊系统与数学, 2010, 24(5): 68-74.  
LI W X, LI B Y. The research of VIKOR methodology based on generalized fuzzy numbers[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2010, 24(5): 68-74.
- [10] 黄玉川, 饶妮妮, 刘永红, 等. 博弈论应用于干扰效果动态评估的研究[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(5): 876-879.  
HUANG Y C, RAO N N, LIU Y H, et al. Dynamic evaluation for radar jamming effects using the game theory[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(5): 876-879.
- [11] 董仕宝, 杨利平. 基于线性规划模型的AHP中相对权重值求解法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(11): 1682-1684.  
DONG S B, YANG L P. Linear programming models for estimating the weights in the analytic hierarchy process[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(11): 1682-1684.
- [12] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 4版. 北京: 电子工业出版社, 2009: 222-229.  
DING L F, GENG F L, CHEN J C. Radar theory[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 222-229.

## 声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司等在其网络平台和系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文, 著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我部上述声明。