

基于多层级关联模型的干扰源威胁评估方法

牛 奔, 马 勇

(中国电子科技集团二十八研究所, 江苏南京 121000)

摘 要: 电子战已经成为现代战争重要的组成部分, 如何对电子战中干扰源的威胁进行合理评估是电子战指控的关键环节。本文分析归纳影响干扰源威胁的因素, 分别对各因素制定度量准则; 建立多层级关联模型融合各因素, 结合序关系分析法得到权值向量, 采用直接加权求和法得到干扰源的威胁评估值; 通过对电子战想定下干扰源威胁能力的评估仿真, 仿真结果验证了方法的合理性与可行性。

关键词: 电子战; 干扰源; 威胁评估; 多层级关联; 序关系分析; 多属性决策

Threat Evaluation of Interference Source Based on Multi-level Correlation Model

NIU Ben, MA Yong

(The 28th Research Institute, China Electronic Technology Group Corporation, Nanjing Jiangsu 121000)

Abstract: Electronic warfare becomes vital component of modern war. How to evaluate interference source's threat in electronic warfare is a critical part of command and control operation. Analysis and conclude factors which influence interference source's threat. Make measure criterion for each factors. Design multi-level correlation model to process factors. Get weight vector with serial relation, and calculate threat evaluation value with Weighted Sum Method. At last, a simulation for threat evaluation is carried out, and the result shows the rationality and validity of method.

Keywords: Electronic Warfare; Interference Source; Threat Evaluation; Multi-level Correlation; Serial Relation Analysis; Multi-property Decision

0 引言

随着科技发展与军事装备的更新, 电子战作为一种新兴作战方式出现在现代战争之中。有别于传统作战模式, 电子战在作战流程、作战方式等方面具有其特殊性。威胁评估作为指挥控制的重要环节, 对把控战场态势具有重要意义。如何对电子战中干扰源威胁进行合理评估, 具有重要的现实意义, 对提升作战单元的抗干扰能力, 合理规划打击顺序, 遂行作战任务具有直接影响。

目前研究威胁评估方法的文献主要基于专家系统或多属性决策技术, 研究对象则多集中于飞机、导弹等传统威胁目标, 对电子战中新出现的干扰源的威胁评估涉猎较少。本文针对电子战中干扰源威胁估计问题, 分析了其主要影响因素并给出量化方法, 建立用于关联相关影响因素的多层级关联模型, 并基于此模型与序关系分析方法提出了一种干扰源威胁评估算法。最后进行了某想定下干扰源威胁的验证仿真, 验证结果证明了本文方法的有效性与简洁性。

1 干扰源威胁评估因素

电子战干扰源的威胁评估即在战场环境中, 对探测到的所有可对我方设备进行干扰压制的敌方干扰源的威胁能力进行评估, 间接获取敌方的电子战干扰作战能力^[1]。进行干扰源威胁评估的目的是通过获取当前战场上的电子干扰态势, 优化配置己方电子干扰设备的部署, 对敌方干扰源进行反干扰压制, 或提前指派攻击火力对干扰源进行打击任务, 确保己方电子设备的正常运行^[2]。

干扰源的威胁等级受多种因素的影响, 既需要考虑干扰源的对抗性能、空间位置、运动意向、作战企图等敌方相关因素, 同时也要考虑卫戍目标重要度、卫戍目标抗干扰能力等我方守御因素^[3]。此外, 气象、地形等战场环境因素也应纳入干扰源威胁等级评定之中。通过对相关文献分析比对^[4], 并结合有关专家、技术人员的领域经验, 本文选取干扰源位置、干扰源速度、干扰源强度、干扰源频率、卫戍目标重要程度、卫戍目标抗干扰能力、天气、地形八个属性作为电子战干扰源威胁评估的直接影响因素。

作者简介: 牛奔 (1991—), 男, 助理工程师, 主要研究领域为防务指控系统, 邮箱: nb10031012@163.com。

2 多层级关联模型

2.1 多层级关联模型建立

作为多属性决策问题，干扰源威胁评估需要综合考虑各因素对威胁等级的影响，一般来说，引入的评价因素越多，覆盖范围越广，最后的评价结果越客观，也越接近真实情况。但是，在引入较多因素来提高威胁评估准确性的同时，加大了评估过程所需的计算量，削弱了评估算法的实时特性。此外，在引入新因素、删除或修改已有因素时，为保证权重总和不变，需要对所有评价因素的权重重新进行调整赋值，增加了工作量。

为解决评估准确性与计算复杂度之间的平衡问题，同时考虑到影响因素间的关联性，设计多层级关联模型，通过将若干有关联的初级因素进行组合优化，得到一个高级因素，对所有初级因素重复此步骤，即可得到一组高级因素。高级因素的引入，降低了威胁评估影响因素空间的维度，减少了威胁评估过程中所需的计算量，同时由于高级因素是由多个初级因素组合得到，保障了威胁评估结果的全面性与准确性。除此之外，在添加、删除、修改某一初级变量时，只需对其所在的高级因素内的初级因素权重进行调整，将变化与其他高级变量隔离，提高了算法的健壮性。

在本文中，参考相关领域专家及技术人员经验，并分析典型干扰源攻防模型，建立如图1所示干扰源威胁因素的多层级关联模型。

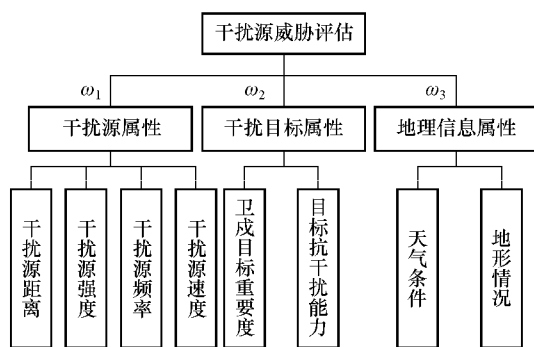


图1 干扰源威胁因素的多层级关联模型

由图1可知，通过将干扰源距离、速度、强度、频率等初级属性进行关联融合，得到干扰源属性；卫星目标重要度与目标抗干扰能力相结合，组成干扰目标属性；天气条件与地形情况归属至地理信息属性。在建立多层级关联模型后，需要推导高级因素与初级因素间的关联关系^[5]。同时，由于各因素含义不同，其所使用的量纲及数据范围也有所差别，为保证各因素间具有公度性，在综合评价前需要通过数学变换将各因素转换至某一无量纲区间。

2.2 影响因素量化准则

根据是否可以直接用数值表示，可将图1中涉及

的影响因素分为两类，其中，推导出干扰源属性的初级属性均可定量测量，而干扰目标属性与地理信息属性所属初级目标则采用定性方式确定^[6]。

1. 干扰源属性

对干扰源自身属性的评估可从威胁能力与威胁意图两个方面开展，威胁能力关注在距干扰源某一距离处的干扰强度；威胁意图则度量干扰源的作战企图，是干扰源的速度及速度方向的映射。

(1) 威胁能力量化准则。

威胁能力的量化推导如下，射频信号在空间内的传播衰减公式为：

$$L_{os} = 20 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (1)$$

式中， d 为空间中所选点距射频信号发射点（干扰源）的距离； λ 为射频信号波长，是频率 f 的倒数。定义 P_{settle} 为干扰源发射强度， $P_{current}$ 为所选点处的信号强度，则有：

$$L_{os} = 20 \lg P_{settle} - 20 \lg P_{current} = 20 \lg \frac{P_{settle}}{P_{current}} \quad (2)$$

综合式(1)和式(2)，可推得：

$$P_{current} = \frac{P_{settle} \lambda}{4\pi d} \quad (3)$$

式(3)表示距干扰源中心越远，干扰强度越弱；干扰源频率越高（波长越短），干扰强度衰减越快。根据干扰频率所属频段定义频段参考值，

$$C_f = \begin{cases} 1 & \text{高频 (HF) 及以下} \\ 1.2 & \text{甚高频 (VHF)} \\ 1.4 & \text{特高频 (UHF)} \\ 1.6 & \text{超高频 (SHF)} \\ 1.8 & \text{极高频 (EHF) 及以上} \end{cases}$$

在引入频段参考定义值后，定义 η_P 作为威胁能力的度量值，计算式为：

$$\eta_P = \begin{cases} 1 & (d \leq d_{Avail}) \\ d_{Avail} / (C_f \times d) & (d > d_{Avail}) \end{cases}$$

式中， d_{Avail} 代表干扰源的有效干扰范围。在有效干扰范围内的干扰源，其干扰能力为1；不在其干扰范围内的干扰源，随距离增加干扰能力降低，且所处频段越高的干扰源，干扰强度衰减越快。

(2) 威胁意图量化准则。

威胁意图的度量主要与速度有关，速度作为矢量，包含了速度值与速度方向两方面的信息。其中速度方向反映了干扰源的作战意向，速度值则反映了作战意向的强烈程度。在实际情况下，干扰源高度值要远小于距离值，因此可将问题简化到水平投影平面上进行推导，结合图2，给出威胁意图的量化推导过程。

在图2中， θ 表示干扰源与目标连线与干扰源速度方向之间的夹角， d_{Avail} 代表干扰源的有效干扰范围，结合图，给出威胁意图推导式如下：

$$\eta_v = \begin{cases} 1 & (d \leq d_{\text{Avail}}) \\ \frac{v t_{\text{ready}} \cos \theta}{d - d_{\text{Avail}} + v t_{\text{ready}} \cos \theta} & (d > d_{\text{Avail}} \text{ 且 } \cos \theta > 0) \\ 0 & (d > d_{\text{Avail}} \text{ 且 } \cos \theta \leq 0) \end{cases}$$

其中, t_{ready} 表示目标侦测干扰源到对抗其干扰的动作时间, $\cos \theta$ 大于 0 表明干扰源在朝目标运动, $\cos \theta$ 小于 0 说明干扰源在远离目标。表达含义如下, 在 $(d \leq d_{\text{Avail}})$ 条件下, 目标在干扰源作用范围内, 忽略干扰源的运动方向, 威胁意图定为 1; 在 $(d > d_{\text{Avail}} \text{ 且 } \cos \theta \leq 0)$ 条件下, 目标不在干扰源作用范围内, 且干扰源未向目标运动, 定义此条件下的威胁意图为 0; 当条件为 $(d > d_{\text{Avail}} \text{ 且 } \cos \theta > 0)$ 时, 说明此时干扰源与目标间有一定距离, 且干扰源存在向目标进行干扰的意图, 威胁意图计算式表明, 与目标距离近、速度快、且难于对抗的干扰源具有更高的威胁意图。

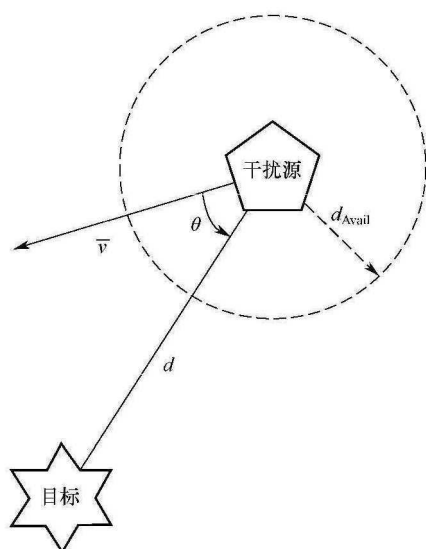


图 2 干扰源威胁意图示意图

2. 干扰目标属性

(1) 卫成目标重要程度量化准则。

卫成目标的类型、作用有所不同, 对应的重要度也有所差别^[7,8], 在这里给出卫成目标类型及其重要度评分的参考值:

$$\eta_{\text{vital}} = \begin{cases} 1 & \text{指挥所} \\ 0.8 & \text{导弹阵地} \\ 0.5 & \text{机场、港口} \\ 0.3 & \text{其他要地} \end{cases}$$

(2) 卫成目标抗干扰能力量化准则。

抗干扰能力主要考虑电子防护能力, 例如, 电台的频率捷变、雷达的脉冲频率捷变等均为电子防护能力, 在一般情况下, 卫成目标抗干扰能力与其重要度成正相关, 但在威胁评估时, 还需要考虑抗干扰能力对不同干扰方式的差异性, 给出目标抗干扰能力的定量参考值:

$$\eta_{\text{anti}} = \begin{cases} 1 & \text{几乎无能力} \\ 0.8 & \text{具备部分能力} \\ 0.5 & \text{具备必要能力} \\ 0.2 & \text{具备完全能力} \end{cases}$$

3. 地理信息属性

(1) 天气因素量化准则。

射频信号传播受到天气的影响, 例如, 在干扰源常用的较高频段上, 雨量大小会明显影响信号的衰减系数。在此处给出天气对干扰源能力影响参考值如下:

$$\eta_{\text{weather}} = \begin{cases} 1 & \text{无影响} \\ 0.7 & \text{一般影响} \\ 0.3 & \text{显著影响} \end{cases}$$

(2) 地形因素量化准则。

地形对射频信号传播有影响, 例如, 山区地形会对降低信号的通过性, 水面比陆地更适合信号的传播, 干扰源对部署在地势较高的目标比部署在山谷中的目标干扰效果更好等, 地形对干扰源能力影响的参考值如下:

$$\eta_{\text{terrain}} = \begin{cases} 1 & \text{无影响} \\ 0.7 & \text{一般影响} \\ 0.3 & \text{显著影响} \end{cases}$$

3 干扰源威胁评估算法

根据获得各层所属的目标威胁评估因素的量化信息, 将信息向量与权重向量相乘, 即可得到所属干扰源的威胁水平值。本文采用序关系分析法计算权重向量。

3.1 序关系分析法

序关系分析法是对已选取属性进行重要度排列, 再比较判断相邻属性重要度之比, 最后计算得到权重的一种主观权重选取法, 该方法无属性个数限制, 且无须构造判断矩阵, 具有直观、计算量小的优势, 因此本文选用序关系分析法确定各属性的权值。

序关系分析法的一般计算步骤如下:

(1) 在评估人员在属性集 $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 中, 挑选出针对问题对应评价规则中最重要属性, 并标记为 x_1^* ; 接下来在剩余 $m-1$ 属性中, 继续挑选出下一个最重要的属性, 并标记为 x_2^* ; 迭代上述过程, 直至剩余唯一属性, 将其标记为 x_m^* 。此时, 可以确定一组唯一的序关系 $\{x_1^* > x_2^* > \dots > x_m^*\}$

给出相邻两属性间相对重要度的比较判断, 此处有 $r_k = \frac{\omega_{k-1}}{\omega_k}$, 式中, r_k 代表重要度的比值, ω_{k-1} 与 ω_k 分别代表 x_{k-1}^* 与 x_k^* 的重要度, 其通常由本领域内的专家或技术人员依据经验值确定。经过长期实践积累, 已有较为成熟的 r_k 取值参考, 如表 1 所示。

表 1 r_k 取值参考表

r_k 取值	代表含义
1.0	x_{k-1}^* 与 x_k^* 同样重要
1.2	x_{k-1}^* 比 x_k^* 稍微重要
1.4	x_{k-1}^* 比 x_k^* 明显重要
1.6	x_{k-1}^* 比 x_k^* 强烈重要
1.8	x_{k-1}^* 比 x_k^* 极端重要

(2) 确定各属性值对应的权重系数, 序关系 分析法有一重要条件, 即若属性值满足序关系 $\{x_1^* \succ x_2^* \succ \cdots \succ x_m^*\}$, 则必有 $r_k r_{k-1} > 1 (k = m, m-1, \cdots, 2)$ 。在满足该条件时, 有 $\omega_m = \left(1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_i\right)^{-1}$, 且 $\omega_{k-1} = r_k \omega_k (k = m, m-1, \cdots, 2)$ 。根据以上条件, 可以依次获得 ω_m 、 ω_{m-1} 直至 ω_1 的值, 也即其对应的各属性的权重系数。

3.2 序关系分析法确定属性权重

以高级属性为例, 采用序关系分析法确定各属性对总目标(威胁评估)的权重。假设相关领域专家与工程技术人员认为各属性间具有如下序关系: $\{\eta_{\text{Int}}^* \succ \eta_{\text{Tar}}^* \succ \eta_{\text{Geo}}^*\}$, 且给出 $r_2 = \omega_{\eta_{\text{Int}}}^* / \omega_{\eta_{\text{Tar}}}^* = 1.4$, $r_3 = \omega_{\eta_{\text{Tar}}}^* / \omega_{\eta_{\text{Geo}}}^* = 1.8$, 则有 $r_2 r_3 = 2.52$, $r_2 = 1.4$, 因此 $r_2 r_3 + r_2 = 3.92$, 可得 $\omega_{\eta_{\text{Geo}}} = (1 + 3.92)^{-1} = 0.20$, 可得 $\omega_{\eta_{\text{Tar}}} = 0.35$, $\omega_{\eta_{\text{Int}}} = 0.45$, 由此, 得到高级属性评价权重向量 $W_s = (0.45, 0.35, 0.20)$ 。初级属性对相应高级属性的权重值可根据序关系分析法或专家评分法直接得到, 由于各高级属性对应的初级属性值较少, 因此使用专家评分法直接得到。各级评价指标权重(面向其上一层), 如表 2 所示。

表 2 各级评价指标权重表

目标层	属性	权重值
威胁评估	干扰源属性	$\omega_{\text{Inf}} = 0.45$
	干扰目标属性	$\omega_{\text{Tar}} = 0.35$
	地理信息属性	$\omega_{\text{Geo}} = 0.20$
干扰源属性评估	η_P	0.8
	η_v	0.2
干扰目标属性评估	η_{vital}	0.6
	η_{anti}	0.4
地理信息属性评估	η_{weather}	0.3
	η_{terrain}	0.7

4 干扰源的威胁评估仿真

干扰源模拟作战想定图如图 3 所示, 基于此对算法进行仿真验证。

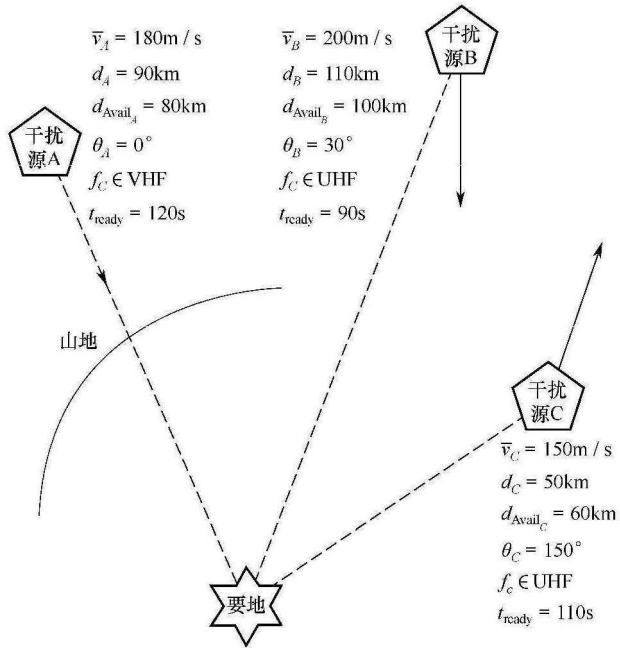


图 3 干扰源模拟作战想定图

想定包含三个干扰源 A、B、C, 各干扰源的可度量属性如图 3 标注所示, 可得各干扰源的属性向量 $N = \{\eta_P, \eta_v, \eta_{\text{vital}}, \eta_{\text{anti}}, \eta_{\text{weather}}, \eta_{\text{terrain}}\}$ 分别为 $N_A = \{0.74, 0.68, 1, 0.8, 0.7, 0.3\}$, $N_B = \{0.65, 0.61, 1, 0.5, 0.7, 0.7\}$, $N_C = \{1, 1, 1, 0.2, 0.7, 1\}$ 。将属性向量与权重向量分别进行计算, 可得权重值分别为 $N_A, N_B, N_C = \{0.73, 0.71, 0.87\}$, 即干扰源 C 的威胁度最大, A、B 依次递减。干扰源 C 虽然在远离目标, 但目标在其作用范围内, 因此 C 的威胁评估值最高; A 与要地之间虽然存在地形阻隔干扰(山地), 但其干扰意图较为强烈, 因此威胁程度排在 B 之前。本文设计的干扰源威胁评估算法综合考虑了敌我属性、地理信息因素的影响, 想定的评估结果验证了本文所设计算法的合理性与有效性。

5 结束语

本文通过建立多层级关联模型, 将电子战干扰源威胁相关的初级属性进行关联优化, 获取得到若干高级属性对干扰源威胁进行评估, 同时采用序关系法对高级属性权重进行规划, 得到了一种新的电子战干扰源威胁评估算法。仿真验证结果表明, 通过引入多层级关联模型, 在保证决策属性完整的前提下, 降低了决策复杂度, 同时将不相关的属性间进行了隔离, 提高了算法的健壮性, 为干扰源的威胁评估提供了一条新的途径。

参考文献

[1] 柯宏发, 陈永光. 电子战干扰目标的多属性多层次威胁评估模型[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(9): 1370-1374.
[2] 朱冠兰, 韩元杰, 蒋方婷. 辐射源威胁等级评估技术研究[J]. 现代电子技术, 2007, 60(23): 10-13.

- [3] 姜宁, 胡维礼, 孙翱. 辐射源威胁等级判定的模糊多属性方法[J]. 兵工学报, 2004, 25(6): 56-59.
- [4] 骆永军, 赵岩泉. 多属性决策的辐射源威胁等级判定方法[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(6): 86-88.
- [5] 徐泽水. 多属性决策的两种方差最大化方法[J]. 管理工程学报, 2001.
- [6] 王君, 姜寿春. 空袭目标流威胁评估与排序模型研究[J]. 现代防御技术, 2001(2).
- [7] 向崇文, 姜青山, 杨辉. 海上电子战目标威胁分析与评估[J]. 现代防御技术, 2016(6).
- [8] 李春芳, 赵虹, 巴宏欣, 等. 基于多属性分类决策的空中目标威胁评估模型[J]. 指挥信息系统与技术, 2011, 2(6).