

# 面向认知通信防护的穿透式干扰效能评估方法

孙志国<sup>1</sup>, 肖硕<sup>1</sup>, 吴毅杰<sup>2</sup>, 李诗铭<sup>2</sup>, 王震铎<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学通信与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

**摘要:** 在认知通信对抗场景下, 为了支撑“通信模块/参数与干扰的多维正交配置式通信防护”的实施, 干扰效能需要具备模块级响应能力, 提出一种穿透式干扰效能评估方法。首先, 选取各信号处理模块的核心参数作为评估参量; 然后, 采用层次分析法和熵权法确定指标权重, 通过专家权重分配解决了层次分析法中的协同问题, 通过非均匀映射解决了熵权法中的权重分配问题; 最后, 通过博弈论权衡主客观权重, 利用优劣解距离法判断干扰效能; 并对 Link16 数据链的干扰效能进行评估实验, 综合考虑了干扰类型、干扰频点个数、干扰时间和系统类型等多个方面。实验结果表明, 穿透式干扰效能评估方法不仅可以直观展示评估结果与指标参数之间的关系, 而且具有良好的干扰区分能力。

**关键词:** 穿透式效能评估; 组合赋权; 博弈论; 优劣解距离法; 干扰效能评估

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2023195

## Evaluation method of penetrating jamming effectiveness for cognitive communication protection

SUN Zhiguo<sup>1</sup>, XIAO Shuo<sup>1</sup>, WU Yijie<sup>2</sup>, LI Shiming<sup>2</sup>, WANG Zhenduo<sup>1</sup>

1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

2. Shanghai Institute of Aerospace Electronics Technology, Shanghai 201109, China

**Abstract:** In order to support the implementation of “multidimensional orthogonal configured communication protection between communication modules as well as parameters and interference” in cognitive communication countermeasures scenarios, jamming effectiveness requires module level responsiveness. A penetrating jamming effectiveness evaluation method was proposed. Firstly, the core parameters of each signal processing module were selected as evaluation parameters. Secondly, analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method (EWM) were used to determine the weight of indicators. The coordination problem in AHP was solved through expert weight allocation, and the weight allocation problem in EWM was solved through non-uniform mapping. Finally, the subjective and objective weights were weighed through game theory, and the jamming effectiveness was judged by the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS). By conducting evaluation experiments on the jamming performance of the Link16 data link, taking into account multiple aspects such as jamming types, number of jamming frequencies, jamming duration, and system types. Experiment results demonstrate that the penetration-based jamming performance evaluation method not only provides a more intuitive representation of the relationship between evaluation results and metric parameters, but also possesses excellent jamming discrimination capability.

**Keywords:** penetrating effectiveness evaluation, combination weighting, game theory, TOPSIS, jamming effectiveness evaluation

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-10-09

通信作者: 王震铎, zhenduowang@hrbeu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62001138)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.62001138)

### 0 引言

认知通信防护是一种新型电磁作战理念，是指通信设备在频谱干扰、协议攻击、资源冲突等通信对抗场景下，通过特定算法具备感知、评估、决策的能力，以提高整体通信效率。感知方面，王桂胜等<sup>[1]</sup>基于稀疏理论对认知引擎的驱动模块进行改进，提高干扰识别率。决策方面，吕斌等<sup>[2]</sup>通过块坐标下降算法对 IRS 相移等参数的选择进行优化，提高系统和速率。干扰效能评估用于整理感知结果和提供决策依据，是认知通信防护的关键环节，其准确性决定了认知通信的安全。

综合评价作为多角度、多指标衡量系统整体性能的方法，常用于解决通信系统的评估问题，但不同问题所涉及的评估模型不同。例如，杨宏宇等<sup>[3]</sup>利用专家先验和相关性定权建立了主机安全评估方法，该方法能提高安全等级区分能力和风险处置优先级，但安全值标准差无法作为通信系统的评估标准；林云等<sup>[4]</sup>利用机器学习对通信语音进行质量等级评估，融合特征具有更优的质量评估性能，但模拟通信和数字通信评估指标集不同；Shao 等<sup>[5]</sup>建立了基于灰度、层次分析、最大熵的权重分配模型，利用可用度、可信度、固有能力构建了比模糊评估方法更好的卫星系统评估方法，但需要掌握系统的全部转移状态。

综合评价所采用的技术与评估对象相关，对认知通信防护进行干扰效能评估应经过 3 个阶段：指标选取、权重计算以及评价方法<sup>[6]</sup>。在指标选取方面，穿透式指标选取拟合通信信号解调过程，对给定的系统进行分层，并为不同的层级分配效能指标。因为该选取方法模拟模块的内部结构和模块之间的关系，对复杂通信系统的评估结果会更准确。层次分析法 (AHP, analytic hierarchy process)、熵权法 (EWM, entropy weight method) 是主客观赋权方法，常用在认知通信评估中以比较不同通信指标的重要程度<sup>[7]</sup>。以 AHP 为例的主观赋权是依靠专家对通信指标的先验知识，通过建立判断矩阵，得到各指标参数的重要程度的方法<sup>[8-9]</sup>。但是，层次分析法存在多专家判断矩阵间的协同问题<sup>[10]</sup>。以 EWM 为例的客观赋权是根据通信指标的参数分布，判断重要程度的方法<sup>[11-12]</sup>。但是，通信指标的熵值接近 1 时存在权重分布不合理的现象<sup>[13]</sup>。针对上述主客观权重存在的问题，研究人员提出了基于多专家参与

的 AHP 和基于熵值非均匀映射的 EWM。以博弈论为例的组合赋权是解决权重过于主观和客观的平衡方法<sup>[14]</sup>。优劣解距离法 (TOPSIS, technique for order preference by similarity to ideal solution) 为评级方法，常用于复杂电磁环境中，根据通信系统性能的上下限获得效能排序<sup>[15]</sup>。

目前，Link16 链路的干扰效能评估仍以误码率的测量为主<sup>[16]</sup>。但随着通信体制不断进步，涌现出不同的干扰信号，如音频干扰、转发式干扰、跟踪式干扰等。单纯依靠误码率对 Link16 干扰效能进行评估具有评价维度单一的局限性。因此，利用通信指标体系和综合评估方法对 Link16 数据链进行干扰效能评估成为新的研究方向。

本文主要的研究工作如下。首先，针对数字通信接收端通过穿透式评估的基本原理对系统模块进行划分，提出了模块中的指标，并分析了指标之间的关系。其次，选择了 AHP 和 EWM 作为主客观赋权方法，并得到各模块指标的权重。本文提出了判断矩阵距离分权法和非均匀映射法，以解决多专家协同和熵权分配问题。同时，在指标权重变化方面对这 2 种方法进行了详细分析。最后，基于博弈论对主客观权重结果进行融合，探讨了得到的权重结果。将系统指标和组合赋权结果代入 TOPSIS 算法，得到评估结果排序。

### 1 模块级评测参量及获取方法

穿透式干扰效能评估指标如图 1 所示<sup>[17]</sup>，可将系统分为解调模块、解跳模块、解扩模块、解码模块。

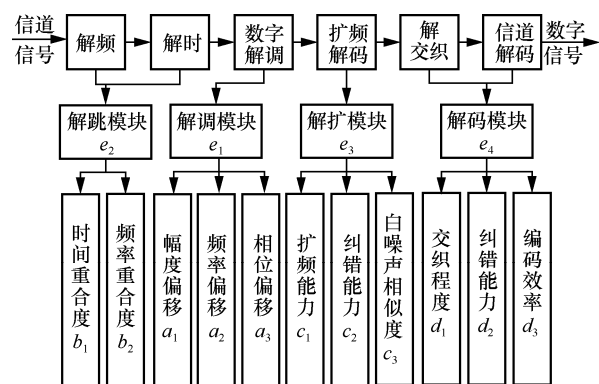


图 1 穿透式干扰效能评估指标

#### 1.1 解调模块

在解调模块，本文提出了幅度偏移、频率偏移、相位偏移作为干扰效能的评估指标<sup>[18]</sup>。

1) 幅度偏移  $a_1$ 

幅度偏移  $a_1$  是指信号受干扰前后幅度特征值的偏移程度。以信号零中心归一化瞬时幅度功率谱密度的最大值  $\gamma$  为例，探讨干扰对信号影响的程度，即

$$\gamma = \frac{\max |DFT[s_{cn}(t)]|^2}{N_c} \quad (1)$$

其中， $s_{cn}(t) = \frac{s(t)}{m_a - 1}$  为零中心归一化瞬时幅度， $s(t)$  为瞬时幅度， $m_a$  为  $s(t)$  的均值， $N_c$  为采样点数。

$$\gamma_d = |\gamma_{i+s} - \gamma_s| \quad (2)$$

其中， $\gamma_s$ 、 $\gamma_{i+s}$  分别为受到干扰前后的通信信号的  $\gamma$ ， $\gamma_d$  为特征参数  $\gamma$  的偏离程度。

$$a_1 = \frac{\gamma_d}{\gamma_d + 1} \quad (3)$$

其中， $a_1$  在  $\gamma_d$  的基础上进行了归一化，且  $a_1$  的增大表明系统受到的干扰影响程度增加。

2) 频率偏移  $a_2$ 

频率偏移  $a_2$  是指信号受干扰前后频率特征值的偏移程度。从频谱上看，信号与干扰的谱线分布不同，导致零中心归一化非弱信号段瞬时频率的标准偏差不同。标准偏差的求取过程为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{V} \left[ \sum_{s_n(t) > s_t} f_n^2(t) \right] - \left[ \frac{1}{V} \sum_{s_n(t) > s_t} f_n(t) \right]^2} \quad (4)$$

其中， $f_n(t) = \frac{f_m(t)}{R_s}$ ， $f_m(t) = f(t) - m_f$ ，

$m_f = \frac{1}{N_c \sum_{t=1}^{N_c} f(t)}$ ， $f(t)$  为信号的瞬时频率， $N_c$  为

统计的瞬时频率个数， $R_s$  为信号的码元速率， $s_t$  为幅度判决门限电平， $s_n(t) > s_t$  表示该采样点处于非弱信号段， $V$  为所有采样点中属于非弱信号值的个数。

$$\sigma_d = |\sigma_s - \sigma_{s+i}| \quad (5)$$

其中， $\sigma_s$ 、 $\sigma_{i+s}$  分别为受到干扰前后的通信信号的  $\sigma$ ， $\sigma_d$  为特征参数  $\sigma$  的偏离程度。

$$a_2 = \frac{\sigma_d}{\sigma_d + 1} \quad (6)$$

其中， $a_2$  在  $\sigma_d$  的基础上进行了归一化，且  $a_2$  的增

大表明系统受到的干扰影响程度增加。

3) 相位偏移  $a_3$ 

相位偏移  $a_3$  是指信号受干扰前后相位特征值的偏移程度。当加入干扰时，干扰的随机性使相位偏离也产生了随机性。本文根据实际相位偏离标准相位的距离作为信号受干扰影响程度的依据，计算式为

$$\psi(t) = |\psi_s(t) - \psi_{i+s}(t)| \quad (7)$$

其中， $\psi_s(t)$ 、 $\psi_{i+s}(t)$  分别为干扰前后信号  $t$  时刻的相位， $\psi(t)$  为实际相位偏移的绝对值。

$$\psi_d = \frac{\left( \sum_{t=1}^{n_s} (\psi(t) - \overline{\psi(t)})^2 \right)}{n_s} \quad (8)$$

其中， $n_s$  为码元个数， $\psi_d$  为经过数据统计后的相位特征参数，用来表达受干扰影响的大小。

$$a_3 = \frac{\psi_d}{\psi_d + 1} \quad (9)$$

其中， $a_3$  在  $\psi_d$  的基础上进行了归一化，且  $a_3$  增大表明系统受到的干扰影响程度增加。

## 1.2 解跳模块

在解跳模块，提出了时间重合度、频率重合度作为干扰效能评估指标<sup>[19]</sup>。

1) 时间重合度  $b_1$ 

时间重合度  $b_1$  是指干扰信号和通信信号在时间域重合的程度。 $b_1$  由两部分组成，一是基于保护间隔的跳时系统，二是单双脉冲的信息发送系统。从以上角度出发，描述干扰信号对通信信号的时域重合程度，计算式为

$$b_1 = \sum_{\tau=1}^{N_\tau} \frac{p_{i,\tau} \left( \frac{t_{s,\tau} \cap t_{i,\tau}}{t_{s,\tau}} + \frac{t_{s,\tau} \cap t_{i,\tau}}{t_{i,\tau}} \right)}{p_{i,\tau} + p_{s,\tau} + 2N_\tau} \quad (10)$$

其中， $\tau$  为当前通信时隙， $N_\tau$  为总通信时隙个数， $p_{i,\tau}$  和  $p_{s,\tau}$  分别为通信时隙内的干扰功率和信号功率， $t_{s,\tau}$  和  $t_{i,\tau}$  分别为通信时隙内的信号时间和干扰时间， $t_{s,\tau} \cap t_{i,\tau}$  是在一个时隙内信号时间和干扰时间的交集，体现干扰的有效性。

2) 频率重合度  $b_2$ 

频率重合度  $b_2$  是指干扰信号和通信信号在频率域重合的程度。 $b_2$  由两部分组成，一是通信频率点的数量，二是通信频率点内的通信带宽。从

以上角度出发,描述干扰对通信的频率重合程度,计算式为

$$b_2 = \sum_{\nu=1}^{N_\nu} \frac{p_{i,\nu} \left( \frac{f_{i,\nu} \cap f_{s,\nu}}{f_{i,\nu}} + \frac{f_{i,\nu} \cap f_{s,\nu}}{f_{s,\nu}} \right)}{p_{i,\nu} + p_{s,\nu}} \frac{1}{2N_\nu} \quad (11)$$

其中,  $\nu$  为当前通信频点,  $N_\nu$  为通信频点个数,  $p_{i,\nu}$  为通信频点内的干扰功率,  $p_{s,\nu}$  为通信频点内的信号功率,  $f_{i,\nu}$  为通信频点内的干扰带宽,  $f_{s,\nu}$  为通信频点内的信号带宽,  $f_{i,\nu} \cap f_{s,\nu}$  为在一个频点内信号频率和干扰频率的交集,体现干扰的有效性。

### 1.3 解扩模块

在解扩模块,提出了扩频能力、纠错能力、白噪声相似度作为干扰效能评估指标<sup>[20]</sup>。

#### 1) 扩频能力 $c_1$

扩频能力  $c_1$  是指数字信号在经过系统处理后,通信码元速率得到提升的能力,在扩频中取决于原始码的长度和扩频码的长度。描述扩频能力的计算式为

$$c_1 = \frac{k_a}{n_a} \quad (12)$$

其中,  $k_a$  为信息码元数目,  $n_a$  为取代后码元总位数,即通过长为  $n_a$  的伪随机序列码取代长度为  $k_a$  信息码元以达到扩频的目的。

#### 2) 纠错能力 $c_2$

纠错能力  $c_2$  是指数字信号经过系统后,即使传输产生了差错也会在解扩时进行纠正的能力,体现在扩频中对扩频码距的选取。描述纠错能力的计算式为

$$c_2 = \frac{1}{\left( \frac{\bar{d}_s}{2+1} \right)} \quad (13)$$

其中,  $\bar{d}_s$  表示不同扩频码间的平均码距。

#### 3) 白噪声相似度 $c_3$

白噪声相似度  $c_3$  是指数字信号经过系统扩频后在传输时与随机码的相似程度,体现在对扩频码序列的选取。描述白噪声相似度的计算式为

$$c_3 = \max(\text{AC}(l), \text{AC}(l) \neq \text{AC}(KN_l)) \quad (14)$$

其中, AC 为扩频序列的自相关函数,  $N_l$  为扩频序列长度,  $K$  为正整数。

### 1.4 解码模块

在解码模块,提出了交织程度、纠错能力、编码效率作为干扰效能评估指标。

#### 1) 交织程度 $d_1$

交织程度  $d_1$  是指数字信号抵抗突发干扰的能令,体现在单位时隙内交织矩阵的大小。描述交织程度的计算式为

$$d_1 = \frac{1}{l_w l_n} \quad (15)$$

其中,参数  $l_w$  和  $l_n$  表示交织矩阵的长和宽。

#### 2) 纠错能力 $d_2$

纠错能力  $d_2$  是指数字信号经过系统后即使传输产生了差错也会在解码时进行纠正的能力,体现在信道编码的平均码距。描述纠错能力的计算式为

$$d_2 = \frac{1}{\frac{\bar{d}_c}{2+1}} \quad (16)$$

其中,  $\bar{d}_c$  代表了编码后的码字之间的平均距离。

#### 3) 编码效率 $d_3$

编码效率  $d_3$  是指数字信号经过信道编码后,数据流中有效信息所占比例,体现在编码前后码长的比。描述编码效率的计算式为

$$d_3 = \frac{k_a}{n_a} \quad (17)$$

## 2 评测赋权及等级评定的整体方案

为解决评估中的指标权重问题和等级评定问题,本节通过博弈论结合了 AHP 和 EWM 的权重结果,对 AHP 存在的协同问题和 EWM 存在的权重分配问题进行了改进,选取评价方法中的 TOPSIS 对系统进行了评估,具体流程如图 2 所示。

### 2.1 基于多专家参与的 AHP

主观赋权是根据决策者所掌握的先验信息进行赋权的一类方法,具有强烈的主观倾向。AHP 是主观赋权中的一种,因为该算法通过指标两两对比得到最终的权重结果并且需要通过一致性检验,所以在满足专家主观倾向的同时也具有合理性,被广泛使用在评估类问题中。

但 AHP 仍存在如下问题:不同专家的先验知识不同会导致评估结果也不同,并且盲目相信某一权威专家也会导致指标权重缺乏准确性、科学性。在此基础上,引入多专家评估的方法,并构建负反馈,调整判断矩阵和专家权重,对 AHP 的

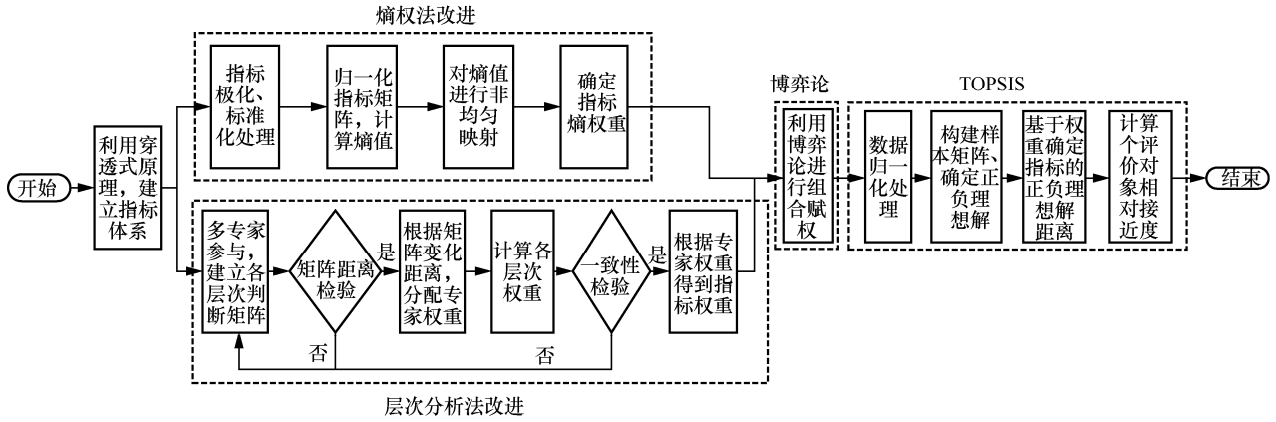


图 2 穿透式干扰效能评估方案流程

改进具有积极作用。基本流程如下。

1) 建立层次结构模型。本文采用系统的干扰效能为决策层，各部分模块为准则层，模块内指标为方案层。

2) 根据不同模块、不同指标和专家建议构建判断矩阵。根据 1~9 标度赋值法，将模块内指标两两对比。将比较结果添入矩阵  $A$ 。

$$A = [a_{ij}]_{n_i \times n_i}, a_{ij} > 0, a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, a_{ii} = 1 \quad (18)$$

其中， $n_i$  为指标个数， $a_{ij}$  为矩阵中不同指标的重要程度。

3) 若无矩阵记录，则记录判断矩阵；若有矩阵记录，根据式(19)判断矩阵前后距离  $D_m$ 。

$$D_m = \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} |A_{m,1}(i, j) - A_{m,2}(i, j)| \quad (19)$$

其中， $m$  表示专家个数，1,2 表示矩阵修改前后。

4) 依据式(20)，判断矩阵距离是否满足要求，若不满足，则回到步骤 2)的同时返还专家意见，重新协商矩阵。

$$D_m < 2l_k \quad (20)$$

其中， $l_k$  为矩阵长度。

5) 根据式(22)~式(24)，计算专家权重结果，专家默认初始权重相同为  $w_m$ ，专家数为  $N_s$ 。

$$D_s = \sum_{m=1}^{N_s} D_m \quad (21)$$

其中， $D_s$  是所有距离的总和。

$$w_m^* = w_m - c \frac{D_m}{D_s} \quad (22)$$

其中， $w_m^*$  为改进后结果， $c$  为影响因子，用来控制单次矩阵变化对专家权重的影响。

$$w_m^* = \frac{w_m^*}{\sum_{m=1}^N w_m^*} \quad (23)$$

式(23)保证了专家权重和为 1。

6) 根据几何平均法或算术平均法计算干扰效能指标判断矩阵的特征值和特征向量。

7)  $\frac{\lambda_{\max} - n_i}{(n_i - 1)RI} < 1$ ，RI 为平均一致性指标，判断矩阵是否合格； $\lambda_{\max}$  为最大特征值。若矩阵满足要求，则停止循环；否则，回到步骤 2)重新询问专家、整理矩阵。

8) 根据式(24)得到各专家干扰效能指标权重结果。 $W_{e_{1,2,3,4}}$  为各模块权重， $W_{a_{1,2,3}}$ 、 $W_{b_{1,2}}$ 、 $W_{c_{1,2,3}}$ 、 $W_{d_{1,2,3}}$  分别为解调模块、解跳模块、解扩模块、解码模块内指标权重。权重顺序与上文介绍顺序一致。

$$W_m = W_{e_{1,2,3,4}} \begin{bmatrix} W_{a_{1,2,3}} & \cdots & 0 \\ \vdots & W_{b_{1,2}} & \vdots \\ 0 & \cdots & W_{d_{1,2,3}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

9) 根据专家权重，计算所有专家指标权重结果。

$$W_h = \sum_{m=1}^{N_s} w_m^* W_m \quad (25)$$

## 2.2 基于非均匀映射的 EWM

客观赋权是根据数据分布所带来的特征参数进行赋权的一类方法，具有较强的数学理论依据。

EWM 是客观赋权中的一种。因为该算法通过数据分布计算信息熵，得到最终的权重结果，所以在满足统计规律的同时也具有科学性，被广泛使用在评估类问题中。

但当指标熵值趋近 1 时，EWM 仍存在微小的信息熵差距会带来权重结果巨大变化的问题。据此，当熵值差距为 0.000 1、0.001、0.01、0.1 时，权重结果可能一致。在权重计算式不变的基础上，引入信息熵非均匀映射的方法，可以提高权重分配的合理性。基本流程如下。

1) 根据式(26)，对干扰效能指标参数归一化。

$$Y_{og} = \frac{X_{og} - \min(X_g)}{\max(X_g) - \min(X_g)} \quad (26)$$

其中， $X_{og}$  表示指标参数域中对象为  $o$ 、指标为  $g$  的参数值， $Y_{og}$  表示归一化指标参数结果。

2) 根据式(27)~式(30)，求干扰效能指标的信息熵。首先求出指标内数据概率，计算式为

$$P_{og} = \frac{Y_{og}}{\sum_{o=1}^{n_o} Y_{og}} \quad (27)$$

其中， $P_{og}$  表示对象为  $o$ 、指标为  $g$  的数据概率，用来统计干扰效能的数据分布情况； $n_o$  表示对象个数根据数据概率得到干扰效能指标信息熵，计算式为

$$E_g = -\frac{1}{\ln n_o} \sum_{o=1}^{n_o} P_{og} \ln P_{og} \quad (28)$$

其中， $E_g$  为干扰效能指标  $g$  的信息熵。当  $P_{og} = 0$  时， $\lim_{P_{og} \rightarrow 0} P_{og} \ln P_{og} = 0$ 。

3) 根据式(30)和式(31)对信息熵进行非均匀映射。

$$E_r = \frac{\sum_{g=1}^{n_i} E_g}{n_i} \quad (29)$$

其中， $E_r$  为干扰效能指标信息熵  $E_g$  的均值。

$$E_g^* = E_g + (E_r - E_g)E_r^\alpha \quad (30)$$

其中， $\alpha$  表示控制非均匀映射的程度。

4) 利用映射后信息熵确定权重，计算式为

$$W_{e,g} = \frac{1 - E_g^*}{n_i - \sum_{g=1}^{n_i} E_g^*}, \quad g = 1, 2, \dots, k \quad (31)$$

其中，干扰效能指标权重按顺序排列，构成 EWM 权重矩阵，即  $W_e = [W_{e,g}]_{1 \times n_i}$ 。

### 2.3 基于博弈论的组合赋权

AHP 得到的指标权重是专家对干扰效能指标的直观认知，尽管一致性检验保证了判断矩阵的合理性，但是单一使用 AHP 得到的权重结果过于主观。EWM 得到的指标权重来源于参数分布，依赖于实际问题的数据域，可参与性差，为了避免数据不完备导致客观权重不准确，采用了基于博弈论的组合赋权法，以平衡主观和客观权重的影响。基本流程如下。

1) 根据 AHP 得到的干扰效能指标权重矩阵  $W_h$  与 EWM 得到的干扰效能指标权重矩阵  $W_e$ ，基于式(32)构建组合权重  $W$ 。

$$W = \beta_h W_h^T + \beta_e W_e^T \quad (32)$$

其中， $\beta_h$  和  $\beta_e$  分别表示主观权重和客观权重的线性系数。

2) 利用纳什平衡思想，生成式(33)所示的最佳线性系数判断条件，该条件意味着干扰效能的指标权重最符合主客观要求。

$$\min \| \beta_h W_h^T + \beta_e W_e^T - W_q^T \|^2, q = h, e \quad (33)$$

3) 根据曲线极值定理，列出式(34)并求出系数。

$$\beta_h W_q W_h^T + \beta_e W_q W_e^T = W_q W_q^T \quad (34)$$

4) 根据式(35)对  $\beta_h$  和  $\beta_e$  进行标准化。

$$\beta_q^* = \frac{\beta_q}{\beta_h + \beta_e} \quad (35)$$

5) 将系数代入式(32)确定最终组合权重  $W$ 。根据主客观权重结果配合博弈论权重合成方法，得到组合权重结果。

### 2.4 基于穿透式指标的 TOPSIS

穿透式评估的研究属于多属性决策问题。可应用 TOPSIS 将多维属性权衡转化为单个结果排序。其评价对象的原理是依据指标数据到理想优劣解的欧氏距离。本文结合 TOPSIS，建立接收端系统的评级方法。

评估对象是不同干扰类型、不同干扰频点个

数、不同干扰时间、不同系统类型和不同信干比下随机结合的参数结果。评估指标为穿透式评估的指标选取结果。权重是通过博弈论从主观和客观赋权中得到的组合权重。基本流程如下。

1) 将系统在确定条件下的参数结果,基于穿透式指标进行归一化处理,处理方式与熵权法归一化相同,如式(26)所示。

2) 将基于干扰效能指标归一化后的参数结果与其组合权重相乘,构建加权样本矩阵  $Z = (z_{og})$ 。

$$z_{og} = w_g y_{og} \quad (36)$$

其中,组合权重矩阵元素是干扰效能指标权重,即  $W = [w_g]_{1 \times n_i}$ ,  $y_{og}$  为指标归一化结果。

3) 在已知参数结果中确定干扰效能指标参量的极值。根据正负相关性得出理想解  $Z_g^+$ 、 $Z_g^-$ 。

4) 根据式(37)和式(38),计算评估对象到干扰效能指标理想解的距离。

$$D_o^+ = \sqrt{\sum_{g=1}^{n_i} (Z_{og} - Z_g^+)^2}, o = 1, 2, \dots, n_o \quad (37)$$

$$D_o^- = \sqrt{\sum_{g=1}^{n_i} (Z_{og} - Z_g^-)^2}, o = 1, 2, \dots, n_o \quad (38)$$

其中,  $D_o^+$  为正理想解距离,  $D_o^-$  为负理想解距离。

5) 在确定系统条件的情况下,评估对象的正理想解贴合度,根据式(39)进行计算。

$$C_o = \frac{D_o^-}{D_o^- + D_o^+}, o = 1, 2, \dots, n_o \quad (39)$$

$C_o$  的排序,即评价对象的优劣次序,为本次评估的结果。干扰效能评估结果越大,表明系统受到的干扰越严重。

### 3 面向 Link16 的数值仿真与性能分析

对 Link16 进行仿真时,采用标准双脉冲封装格式传输,RS 编码格式为(31,15),CCSK 扩频采用(5,32)的伪随机序列(m 序列),交织矩阵格式为  $23 \times 4$ ,加入循环冗余校验码(CRC)编码校验。在  $-19 \sim -10$  dB 信干比下,对于干扰种类、频点个数、时间、系统类型进行了干扰效能评估,评估结果分布在  $0 \sim 1$ 。评估结果越接近 1,表明系统受到的干扰越严重。

#### 3.1 指标参量分析

本节以 Link16 系统受多音干扰为例,给出干扰

效能评估的部分参数,并说明不同干扰方式、通信系统给指标参数带来的变化。

多音干扰参数偏移情况如图 3 所示。当信号受到多音干扰后,信号本身的参数发生了偏移。进行归一化后,幅度、频率、相位偏移量去除量纲。不同指标受干扰后的偏移程度不同,但都随着信干比的增大而减小。

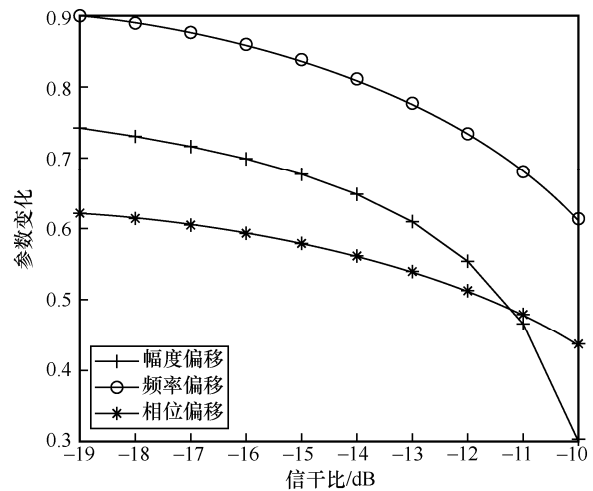


图 3 多音干扰参数偏移情况

时间重合度如图 4 所示。当干扰信号不能覆盖通信周期并且处于随机干扰的情况下,指标参数将随干扰时间减少、信干比增大而下降。因为参数  $t_{s,\tau}$  在同一系统下是固定的,干扰时间决定参数  $t_{i,\tau}$ , 信干比决定参数  $p_{i,\tau}$  和  $p_{s,\tau}$ 。

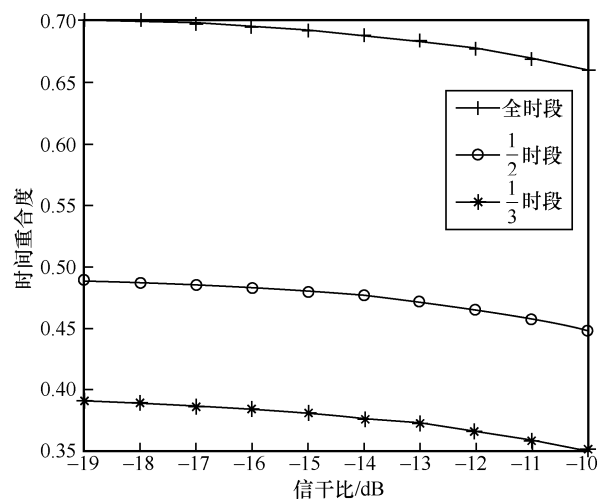


图 4 时间重合度

频率重合度如图 5 所示。当干扰不能覆盖全部通信频点并且已知所有通信频点的情况下,指标参

数随干扰频点个数增多而下降、随信干比增大而下降。因为同种类型的系统和干扰下参数  $f_{i,v}$ 、 $f_{s,v}$  和  $p_{s,v}$  是确定的，而参数  $p_{i,v}$  由干扰频点个数和信干比同时决定。

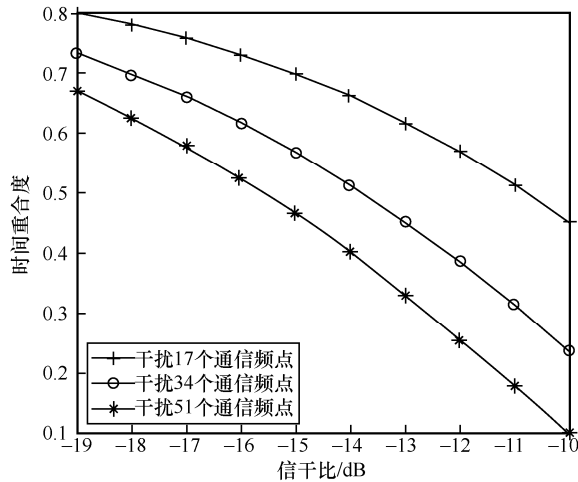


图 5 频率重合度

除 Link16 数据链外，为丰富系统类型、解扩模块和解码模块数据，引入 Link11 指标参数；引入  $m$  序列和  $gold$  序列扩频，如  $m(1,31)$ 、 $gold(1,31)$ 、 $m(1,63)$ 、 $m(1,15)$ ；引入汉明码(30,24)和卷积码(2,1,7)信道编码。因为系统数据不受信干比影响，Link16 的指标参数如表 1 所示。

表 1 Link16 指标参数

指标参数	值
$c_1$	0.156 3
$c_2$	0.115
$c_3$	0.125
$d_1$	0.010 7
$d_2$	0.111 1
$d_3$	0.483 9

根据参数定义，Link16 每个参数都接近 0，这意味着数据链抗干扰能力强。对此类具有较强抗干扰能力的通信系统进行干扰效能评估的意义如下。首先，干扰效能评估用于衡量通信系统存在干扰情况下的性能表现。其次，干扰效能评估采取的综合评估方法更加直观地反映了通信中指标参数对通信结果的影响。最后，干扰效能的评估结果、指标参数可以作为后续系统性能提升的依据<sup>[21]</sup>。

### 3.2 指标权重分析

以解调模块为例，通过 5 名专家、1 名志愿

者对幅度偏移、频率偏移、相位偏移指标的重要程度进行层次分析并基于式(18)~式(23)分配专家权重。其中，成员组 1 为 4 名专家、1 名志愿者，成员组 2 为 5 名专家，影响因子为 0.3，专家权重结果如图 6 所示。

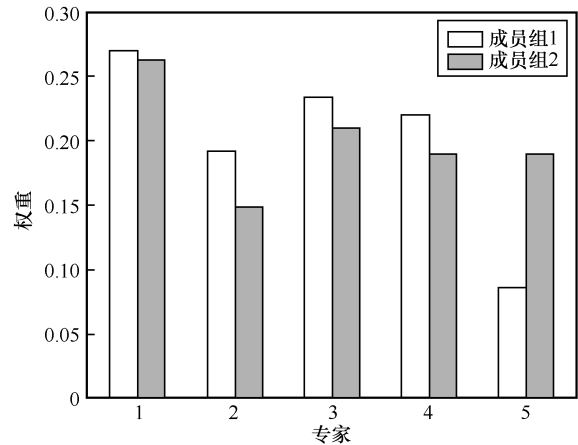


图 6 不同组专家权重

由图 6 可知，当成员组中存在先验知识不充分的成员时，例如，在成员组 1 中，专家 5 为志愿者，这些成员对主观赋权的比重会降低。先验知识不足导致志愿者的判断矩阵与协商结果距离较大，从而降低了权重。然而，当成员组全部由专家组成时，各专家的权重大致在 0.2 左右，保证每个专家的建议均可在主观赋权的权重结果中体现。

基于穿透式指标选取结果，AHP 改进前后权重如下

$$W_{a_{1,2,3}} = (0.297\ 3, 0.539\ 0, 0.163\ 8)$$

$$W_{b_{1,2}} = (0.333\ 3, 0.666\ 7)$$

$$W_{c_{1,2,3}} = (0.285\ 7, 0.571\ 4, 0.142\ 9)$$

$$W_{d_{1,2,3}} = (0.166\ 7, 0.666\ 7, 0.166\ 7)$$

$$W_{e_{1,2,3,4}} = (0.512\ 5, 0.275\ 5, 0.074\ 3, 0.137\ 7)$$

$$W_{a_{1,2,3}}^* = (0.270\ 1, 0.608\ 6, 0.121\ 3)$$

$$W_{b_{1,2}}^* = (0.291\ 6, 0.708\ 4)$$

$$W_{c_{1,2,3}}^* = (0.285\ 7, 0.571\ 4, 0.142\ 9)$$

$$W_{d_{1,2,3}}^* = (0.226\ 7, 0.701\ 5, 0.071\ 8)$$

$$W_{e_{1,2,3,4}}^* = (0.522\ 9, 0.271\ 1, 0.070\ 5, 0.135\ 5) \quad (40)$$

通过式(40)可以看出，改进后 AHP 对指标体系内权重越大的部分参数变化更加敏感。突出强调了此类参数、模块在抗干扰分析中的作用。

根据改进后 EWM 流程，回到 EWM 问题上，重新计算熵权分配。改进前后 EWM 权重分配结果如表 2 所示。

改进	熵值	熵权分配
否	0.999 6;0.999 7;0.999 8;0.999 9	0.4;0.3;0.2;0.1
	0.996;0.997;0.998;0.999	0.4;0.3;0.2;0.1
	0.96;0.97;0.98;0.99	0.4;0.3;0.2;0.1
	0.6;0.7;0.8;0.9	0.4;0.3;0.2;0.1
是	0.999 6;0.999 7;0.999 8;0.999 9	0.250 1;0.250 0;0.250 0;0.250 1
	0.996;0.997;0.998;0.999	0.251 1;0.250 4;0.249 6;0.248 9
	0.96;0.97;0.98;0.99	0.261 0;0.253 7;0.246 3;0.239 0
	0.6;0.7;0.8;0.9	0.336 7;0.278 9;0.221 1;0.163 3

在加入信息熵非均匀映射后权重结果更加合理。基于穿透式指标选取结果，EWM 改进前后权重如下

$$\begin{aligned}
 W_{a_{1,2,3}} &= (0.389\ 4, 0.466\ 2, 0.144\ 4) \\
 W_{b_{1,2}} &= (0.588\ 7, 0.411\ 3) \\
 W_{c_{1,2,3}} &= (0.407\ 9, 0.234\ 4, 0.357\ 8) \\
 W_{d_{1,2,3}} &= (0.282\ 8, 0.287\ 0, 0.430\ 2) \\
 W_{e_{1,2,3,4}} &= (0.090\ 4, 0.192\ 5, 0.319\ 0, 0.398\ 1) \\
 W_{a_{1,2,3}}^* &= (0.343\ 9, 0.358\ 6, 0.297\ 7) \\
 W_{b_{1,2}}^* &= (0.531\ 2, 0.468\ 8) \\
 W_{c_{1,2,3}}^* &= (0.382\ 7, 0.267\ 8, 0.349\ 5) \\
 W_{d_{1,2,3}}^* &= (0.291\ 3, 0.294\ 8, 0.413\ 9) \\
 W_{e_{1,2,3,4}}^* &= (0.192\ 0, 0.229\ 1, 0.275\ 1, 0.275\ 1) \quad (41)
 \end{aligned}$$

根据式(41)可以看出，由于非均匀映射的引入，在解决熵值接近 1 时权重不合理的同时弱化了权重之间的差异，但指标间的权重次序仍保持一致。将主观权重和客观权重组合后的结果如下

$$\begin{aligned}
 W_{a_{1,2,3}} &= (0.291\ 3, 0.543\ 8, 0.165\ 1) \\
 W_{b_{1,2}} &= (0.426\ 4, 0.573\ 6) \\
 W_{c_{1,2,3}} &= (0.324\ 2, 0.465\ 1, 0.210\ 7) \\
 W_{d_{1,2,3}} &= (0.192\ 3, 0.583\ 1, 0.224\ 7)
 \end{aligned}$$

$$W_{e_{1,2,3,4}} = (0.322\ 5, 0.238\ 1, 0.184\ 5, 0.255\ 0)$$

$$W_{a_{1,2,3}}^* = (0.257\ 6, 0.651\ 0, 0.091\ 4)$$

$$W_{b_{1,2}}^* = (0.327\ 3, 0.672\ 7)$$

$$W_{c_{1,2,3}}^* = (0.308\ 3, 0.500\ 7, 0.191\ 0)$$

$$W_{d_{1,2,3}}^* = (0.240\ 2, 0.616\ 7, 0.143\ 1)$$

$$W_{e_{1,2,3,4}}^* = (0.463\ 4, 0.263\ 5, 0.107\ 3, 0.160\ 6) \quad (42)$$

根据式(42)可以看出，经过博弈论处理后的组合权重，其权重范围基于主客观权重之间。这避免了权重结果过于主观或客观的问题，并且在博弈论的影响下保证新生成的权重离主客观权重距离更近，清晰地传递了主客观权重的意图。

### 3.3 评估结果分析

图 7 展示了不同干扰 TOPSIS 评估结果。在相同信干比下，多音干扰的干扰效能最高，意味着同功率下多音干扰对 Link16 数据链系统通信影响最严重。相比之下，锯齿波调频干扰评估结果最小，噪声调频干扰评估曲线接近于多音干扰评估曲线。因为锯齿波调频干扰在解调模块对信号幅度、频率、相位的偏移影响最小。赋权方法的改进使评估结果对信干比更敏感，表现为同信干比区间内评估结果变化更大。不同干扰的评估结果受赋权方法改进的影响不同。其中，受到解调模块权重增加的影响，锯齿波调频干扰评估结果下降。从改进后权重角度来看，锯齿波调频干扰对系统影响进一步降低。

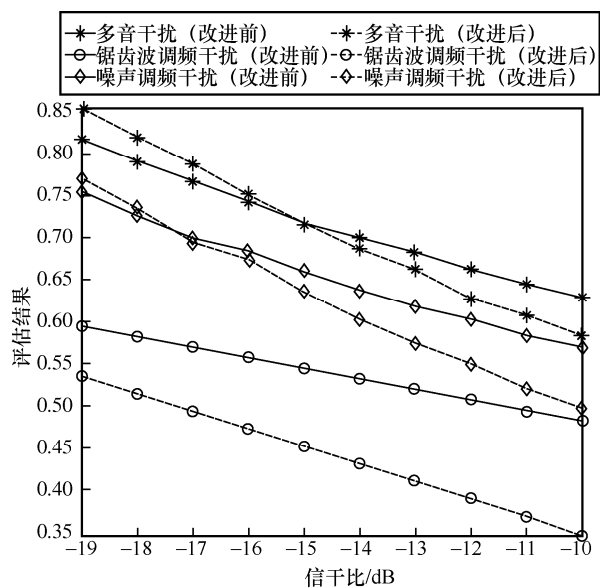


图 7 不同干扰 TOPSIS 评估结果

针对 3 种干扰比较了本文的评估方法和传统模糊评估方法的性能，模糊评估与 TOPSIS 评估结果如图 8 所示。首先，模糊评估相较于 TOPSIS 评估对干扰不敏感，图 8 中体现为对同一种干扰模糊评估的评价结果显著低于 TOPSIS 评估，因为 TOPSIS 的结果基于优劣解的对比，突出了干扰对系统参数的影响。其次，模糊评估对 2 种相似干扰即窄带的噪声调频干扰和多音干扰很难区分，图 8 中体现为模糊评估结果下多音干扰和噪声调频干扰曲线基本吻合，隶属度函数的引入使分布相似的参数更难辨别。最后，模糊评估结果曲线受评语集元素个数的影响，评语集元素越多曲线越平滑，本文采用 10 等级划分。

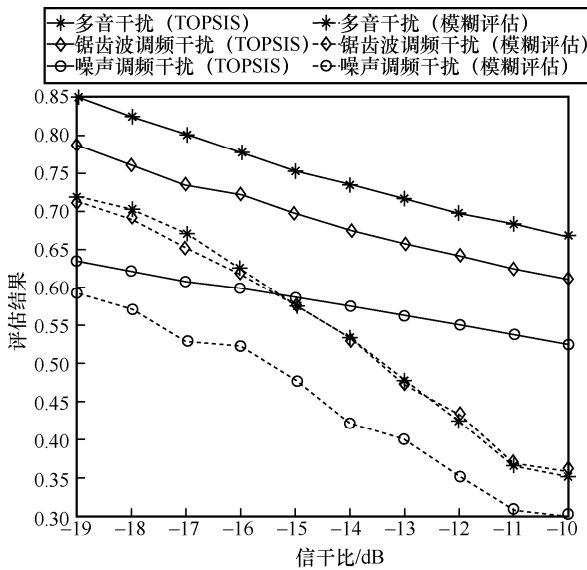


图 8 模糊评估与 TOPSIS 评估结果

图 9 展示了不同干扰频点个数 TOPSIS 评估结果。从图 9 可知，在多音干扰下，干扰 17 个通信频点的干扰效能最高，意味着 17 个通信频点受到干扰时，Link16 系统通信影响最严重。相比之下，干扰 51 个通信频点的干扰效能最小，干扰 34 个通信频点的干扰效能基于两者之间。因为从频率覆盖的角度看，干扰频点个数的增多会导致单频点干扰功率下降。从权重结果的角度看，解调模块权重比频率重合度的权重更高。不同干扰频点个数受赋权方法改进影响不同。其中，对干扰 51 个通信频点的干扰效能评估结果波动最大，因为解跳模块中的频率重合度权重减少。

图 10 展示了不同干扰时间 TOPSIS 评估结果。从图 10 可知，在相同信干比下，全时段干扰的干扰效能最高，意味着同功率下干扰全时段对 Link16

数据链系统通信影响最严重。相比之下， $\frac{1}{3}$  时段干扰效能相同信干比下最小， $\frac{1}{2}$  时段干扰评估曲线接近  $\frac{1}{3}$  时段干扰评估曲线，因为  $\frac{1}{2}$  时段和  $\frac{1}{3}$  时段干扰的时间重合度参数更接近。不同时段干扰受赋权方法改进影响基本相同，因为时间重合度权重变化不大。该评估方法对干扰时间不敏感，因为时间重合度参数接近并且时间重合度权重较小。

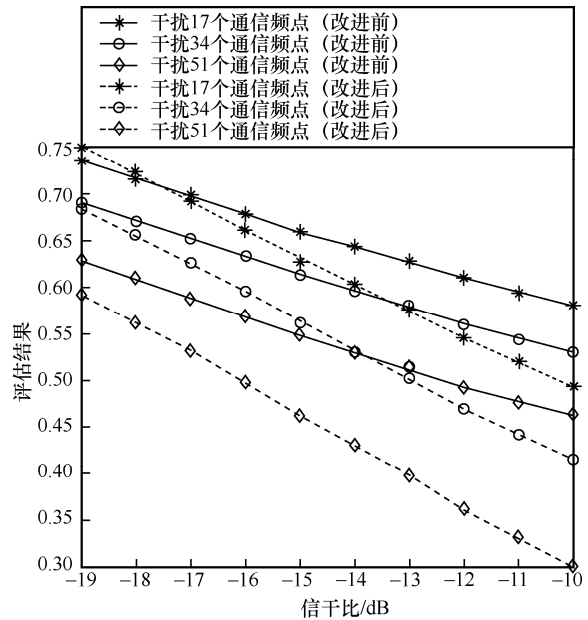


图 9 不同干扰频点个数 TOPSIS 评估结果

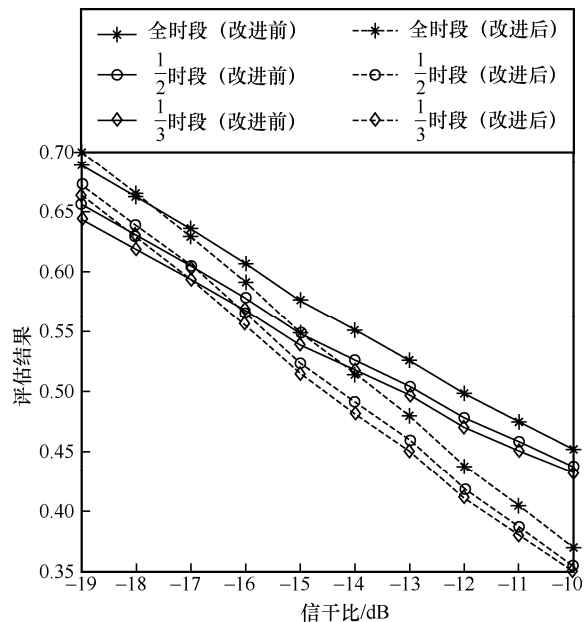


图 10 不同干扰时间 TOPSIS 评估结果

图 11 展示了不同干扰系统 TOPSIS 评估结果。从图 11 可知，在相同信干比下，Link11 数据链受多音干扰评估结果最高，意味着同功率下多音干扰对 Link11 数据链系统通信影响最严重，因为 Link11 数据链解扩模块和解码模块的指标参数更大，且 Link11 采用的调制解调方式为 QDPSK，更容易受到干扰。改进前后，Link11 数据链和 Link16 数据链的评估结果相差更大。这是因为权重改进后，解扩模块和解码模块权重降低，导致扩频能力和信道编码能力对系统评估影响减小；解调模块权重变大，导致幅度偏移、相位偏移，频率偏移对系统评估影响增大。

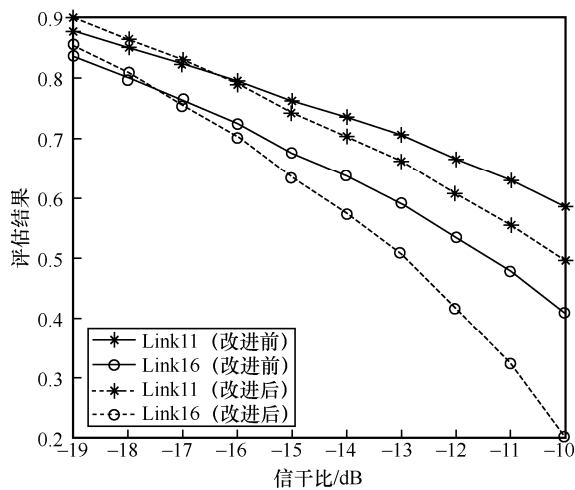


图 11 不同干扰系统 TOPSIS 评估结果

## 4 结束语

为解决误码率评估角度局限的问题，本文针对数字通信系统提出了一种穿透式干扰效能评估的方法。首先，基于穿透式对数字通信接收端分成解调模块、解跳模块、解扩模块、解码模块。选择特定指标以反映干扰对模块的影响，如频率重合度。其次，采用主客观赋权的方法比较指标的重要程度。对于 AHP 中存在的协同问题，提出了基于判断矩阵距离调整专家权重的解决方法，通过多次调整结果，证明了改进后 AHP 更符合专家预期。对于 EWM 出现的权重分配问题，提出了非均匀映射的解决办法，通过特定权重结果前后变化，证明了改进后 EWM 区域熵权的合理性。最后，用博弈论将主客观权重进行结合，引入 TOPSIS 对干扰效能进行评估。通过对 Link16 数据链的干扰效能评估，考虑了干扰种类、干扰时间、干扰频点个数、干扰

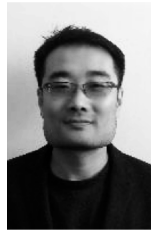
系统类型等多个方面，实验结果验证了穿透式干扰评估方法的有效性。此外，改进 TOPSIS 方法存在的问题将是未来工作的重点。

## 参考文献：

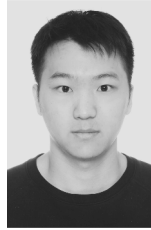
- [1] 王桂胜, 黄国策, 王叶群, 等. 基于认知驱动的变换域通信智能抗干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1): 223-231.  
WANG G S, HUANG G C, WANG Y Q, et al. Anti-interference method with intelligence for transform domain communication based on cognitive-engine[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(1): 223-231.
- [2] 吕斌, 曹怡, 李健, 等. IRS 辅助的认知反向散射通信网络性能增强方案[J]. 通信学报, 2021, 42(12): 172-181.  
LYU B, CAO Y, LI J, et al. Performance enhancement scheme for IRS-assisted cognitive backscatter communication network[J]. Journal on Communications, 2021, 42(12): 172-181.
- [3] 杨宏宇, 袁海航, 张良. 基于攻击图的主机安全评估方法[J]. 通信学报, 2022, 43(2): 89-99.  
YANG H Y, YUAN H H, ZHANG L. Host security assessment method based on attack graph[J]. Journal on Communications, 2022, 43(2): 89-99.
- [4] 林云, 徐怀韬, 王森, 等. 基于特征融合的通信语音干扰效果客观评估[J]. 通信学报, 2023, 44(3): 105-116.  
LIN Y, XU H T, WANG S, et al. Objective assessment of communication speech interference effect based on feature fusion[J]. Journal on Communications, 2023, 44(3): 105-116.
- [5] SHAO R R, FANG Z G, GAO S, et al. G-BDP-ADC model for effectiveness evaluation of low orbit satellite communication system in the context of poor information[J]. IEEE Access, 2019, 7: 157489-157505.
- [6] 施端阳, 林强, 胡冰, 等. 综合评估方法研究综述[J]. 中国科技信息, 2022(22): 124-127.  
SHI D Y, LIN Q, HU B, et al. A summary of research on comprehensive evaluation methods[J]. China Science and Technology Information, 2022(22): 124-127.
- [7] WANG Y, HAO J M, LIU W P, et al. Dynamic evaluation of GNSS spoofing and jamming efficacy based on game theory[J]. IEEE Access, 2020, 8: 13845-13857.
- [8] 王巍, 赵铁军, 辛国栋, 等. 基于层次分析模型的产品多属性综合排序[J]. 通信学报, 2016, 37(5): 88-94.  
WANG W, ZHAO T J, XIN G D, et al. Multiattribute ranking based on analytic hierarchy model[J]. Journal on Communications, 2016, 37(5): 88-94.
- [9] 杨爱民, 高放, 边敏华, 等. 基于层次分析—模糊评价的云计算安全评估与对策[J]. 通信学报, 2016, 37(S1): 104-110.  
YANG A M, GAO F, BIAN M H, et al. Cloud computing security evaluation and countermeasure based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal on Communications, 2016, 37(S1): 104-110.
- [10] WU S H, XIE J, LIU X D, et al. Marginal optimization method to improve the inconsistent comparison matrix in the analytic hierarchy process[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 28(6): 1141-1151.
- [11] FENG J F, ZHANG Q, HU J H, et al. Dynamic assessment method of air target threat based on improved GIFSS[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2019, 30(3): 525-534.

- [12] LIN H F, DU L, LIU Y F. Soft decision cooperative spectrum sensing with entropy weight method for cognitive radio sensor networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 109000-109008.
- [13] 吴占稳, 张文. 改进熵权法及其在起重机安全评价中的应用[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(1): 207-210.  
WU Z W, ZHANG W. Improved entropy method and its application in crane safety evaluation[J]. Machine Design & Research, 2022, 38(1): 207-210.
- [14] ZHANG Z C, CHEN L. Analysis on decision-making model of plan evaluation based on grey relation projection and combination weight algorithm[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(4): 789-796.
- [15] LIU H C, WANG L E, LI Z W, et al. Improving risk evaluation in FMEA with cloud model and hierarchical TOPSIS method[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 27(1): 84-95.
- [16] 宁晓燕, 王影, 孙志国, 等. 多音干扰下 Nakagami-m 信道传输 Link16 数据链的性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(2): 566-571.  
NING X Y, WANG Y, SUN Z G, et al. Performance analysis of Nakagami-m channel transmission Link16 under multi-tone interference[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(2): 566-571.
- [17] CHEN Z, ZHAI R, LI D C, et al. Performance evaluation of a tactical data-link system based on MSK and 16QAM[J]. IEEE Access, 2021, 9: 84316-84326.
- [18] 吴月娴, 葛临东, 许志勇. 常用数字调制信号识别的一种新方法[J]. 电子学报, 2007, 35(4): 782-785.  
WU Y X, GE L D, XU Z Y. A novel identification method for commonly used digital modulations[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(4): 782-785.
- [19] 尹柏强, 王署东, 何怡刚, 等. 基于快速 S 变换时频空间模型的电磁干扰复杂度评估方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(1): 195-201.  
YIN B Q, WANG S D, HE Y G, et al. Electromagnetic environment complex evaluation algorithm based on fast S-transform and time-frequency space model[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(1): 195-201.
- [20] YIN H H, SUN J X, YU H, et al. Research on performance of orthogonal convolutional codes with ultra-low code rate in spread spectrum communication[C]//Proceedings of 2021 IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 457-461.
- [21] 罗海玲, 宁晓燕, 郭凯丰, 等. 基于 OCML 构造序列的 Link16 扩频方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(12): 3837-3842.  
LUO H L, NING X Y, GUO K F, et al. Link16 spread spectrum method based on OCML construction sequence[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(12): 3837-3842.

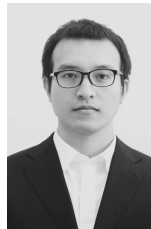
## [作者简介]



孙志国 (1977- ), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 哈尔滨工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为认知数据链、无线通信与防护。



肖硕 (1999- ), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工程大学硕士生, 主要研究方向为数据链干扰效能评估。



吴毅杰 (1984- ), 男, 福建漳州人, 上海航天电子技术研究所高级工程师, 主要研究方向为测控通信相关技术。



李诗铭 (1994- ), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 上海航天电子技术研究所工程师, 主要研究方向为数据链相关通信技术。



王震铎 (1989- ), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 哈尔滨工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为变换域通信理论与技术、数据链关键技术及其干扰效能评估方法。