

文章编号: 1671-0576(2020)02-0011-06

# 无线电引信的抗干扰性能评估方法研究

金 文<sup>1,2</sup>, 武海东<sup>1,2</sup>, 沙作金<sup>1,2</sup>, 袁春辉<sup>1,2</sup>, 江 露<sup>3</sup>

(1. 上海无线电设备研究所, 上海 201109; 2. 上海目标识别与环境感知工程技术研究中心, 上海 201109; 3. 陆军驻南京地区军代局驻上海地区第二军代室, 上海 201109)

**摘 要:** 针对无线电引信抗干扰性能评估困难的问题, 在对典型干扰样式以及抗干扰性能评估指标研究的基础上, 提出了一种无线电引信抗干扰性能评估指标体系构建及优化方法。利用该方法构建的抗干扰性能评估指标体系, 能够满足对无线电引信多样化抗干扰性能的评估需求, 且有助于快速确定新型无线电引信系统的抗干扰能力和实际作战性能。

**关键词:** 无线电引信; 抗干扰性能评估方法; 指标体系构建方法

**中图分类号:** TN974

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1671-0576.2020.02.003

## Research on Evaluation Method of Anti-jamming Performance of Radio Fuze

JIN Wen<sup>1,2</sup>, WU Hai-dong<sup>1,2</sup>, SHA Zuo-jin<sup>1,2</sup>, YUAN Chun-hui<sup>1,2</sup>, JIANG Lu<sup>3</sup>

(1. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China;  
2. Shanghai Engineering Research Center of Target Identification and Environment Perception, Shanghai 201109, China; 3. Second Military Representative Office in Shanghai of PLA Military Representative Bureau in Nanjing Area, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** In view of the difficulty in evaluating the anti-jamming performance of radio fuze, a method for constructing and optimizing the anti-jamming performance evaluation index system for the radio fuze is proposed based on the study of typical interference patterns and anti-jamming performance evaluation index. The anti-jamming evaluation index system constructed by making use of the method can satisfy the requirements for evaluating the diversified anti-jamming performance of radio fuze, and is helpful to determine the anti-jamming capability and actual combat performance of the new radio fuze quickly.

**Key words:** radio fuze; anti-jamming performance evaluation method; index system construction method

## 0 引言

无线电引信是利用电磁波环境信息感知目标并在距目标最佳炸点处引爆战斗部的一种近炸引信。作为导弹高效毁伤与起爆控制的关键设备,无线电引信是敌方电子对抗装备的主要干扰目标<sup>[1]</sup>。

无线电引信工作时向外发射电磁波,电磁波经目标反射后进入引信接收机,引信接收机将其转化为电信号(其中包括目标信号、噪声和干扰),并传递至信号处理模块进行处理、分析和识别。若处理结果满足引信预定起爆条件,则输出起爆指令来触发战斗部引爆。

本文通过研究针对无线电引信的典型干扰,构建无线电引信抗干扰性能指标体系,研究无线电引信抗干扰性能评估方法。

## 1 典型干扰样式分析

除了自然环境带来的有源或无源干扰之外,无线电引信最主要的威胁来自于人为干扰。人为干扰也可以分为有源干扰和无源干扰。无源干扰主要通过箔条云、角反射器、假目标等方式实现,有源干扰主要通过干扰机发射一定的干扰信号来完成。人为干扰的分类如图 1 所示。

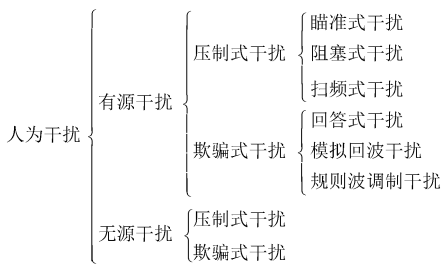


图 1 人为干扰分类

有源压制式干扰通过干扰机发射某种大功率的噪声信号,使得引信接收到的回波信号的信噪比大大下降、难以检测出有用的信号或产生误差,从而达到干扰的目的。这种干扰方式一般要求较大的发射功率,对一些能够在较低信噪比情况下工作的引信干扰效果并不明显。有源欺骗式干扰通常采用模拟目标回波信号或模拟回波的某一些特征的方法,使引信误将干扰信号认作是目标回

波信号。

无源干扰一般包含箔条云干扰和角反射器干扰等。箔条云通常由涂覆金属的纤维或铝箔条组成,箔条云干扰主要通过箔条云对电磁波进行反射和散射来实施干扰,故其能够干扰多种体制的引信。角反射器的干扰原理是模拟地面和空中的目标,使引信难以探测到真正的目标信息,从而降低导弹对被掩护目标的毁伤程度,达到干扰的目的。

无线电引信主要工作在导弹飞行末段,该阶段无线电引信面临的主要有效干扰为有源欺骗式干扰(如空中无人机自卫式干扰)、有源压制式干扰(如地面干扰站自卫式干扰)、无源欺骗式干扰(如角反射器干扰)和无源压制式干扰(如箔条干扰)等。无线电引信在其它飞行阶段均处于未开机状态,未开机状态下可能有效的干扰为有源压制式干扰(如电磁脉冲干扰)。根据已有经验,无线电引信通常能承受千兆瓦级的电磁脉冲干扰。

## 2 无线电引信抗干扰性能评估指标

无线电引信系统抗干扰性能评估是一个比较复杂的问题,无法笼统地用一两个指标进行描述。尤其是针对不同干扰样式,无线电引信均有对应的不同的抗干扰性能指标。

### 2.1 抗有源压制式干扰性能评估指标

#### (1) 最大作用距离

最大作用距离  $R_{\max}$ , 即引信能够探测到的最远距离,在有源压制干扰下,可以表示为

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G_t G_r \sigma R_J^2 \Delta f_J}{4\pi \Delta f L P_{J'} G_J G_r' \min(P_r/P_{J'})} \quad (1)$$

其中

$$G_r' = 4\pi A_r' / \lambda^2 \quad (2)$$

式中:  $P_t$  为引信发射功率;  $G_t$  为引信发射天线的增益;  $G_r$  为引信天线对着目标方向的接收增益;  $\sigma$  为目标的截面积;  $R_J$  为干扰机到引信接收天线的距离;  $\Delta f_J$  为干扰频带;  $\Delta f$  为引信接收机的带宽;  $L$  为引信系统的损耗;  $P_{J'}$  为干扰机的发射功率;  $G_J$  为干扰机正对引信方向的增益;  $G_r'$  为引信天线对着干扰机方向的接收增益;  $\min(P_r/P_{J'})$  为目标检测所需最小信干比,  $P_r$  为接收到的目标

信号功率,  $P_{\text{rj}}$  为接收到的干扰信号功率;  $A_r'$  为引信天线对着干扰机方向的有效面积;  $\lambda$  为引信发射信号波长。

### (2) 反压制系数

压制系数是衡量压制式干扰的一个重要指标。通常情况取检测概率  $P_d$  为 0.1 时,接收机中频放大器的输入端通带内的最小干信比为压制系数,用  $K_a$  表示,表达式为

$$K_a = \min(P_J/P_S) \quad \text{s.t. } P_d = 0.1 \quad (3)$$

式中:  $P_J$  和  $P_S$  分别为压制式干扰下,进入引信接收机中频放大器的干扰信号功率和目标回波信号功率。

干扰与抗干扰是相互对立的,可以考虑用接收机输入端的最小可检测信干比来描述抗压制式干扰性能的优劣,将其定义为反压制系数,用  $K_b = 1/K_a$  表示。对于采取不同抗干扰措施的引信,在相同的干扰环境下,反压制系数越小,表明引信的抗干扰性能越好。

### (3) 抗干扰改善因子

引信抗干扰改善因子(EIF)的定义:引信在采用电子抗干扰技术后,引信接收机输出的信号、干扰功率比与未应用抗干扰技术时接收机输出的信号、干扰功率比的比值。当目标相同、引信其它主要参数都相同时,引信在采取抗干扰技术前后的接收机输出端的信号功率是一定的,所以 EIF 也可理解为采取抗干扰技术前后引信接收机的输出的信号干扰功率比,记为  $K_{\text{EIF}}$ ,表达式为

$$K_{\text{EIF}} = \frac{(P_S/P_J)_k}{(P_S/P_J)_0} \quad (4)$$

式中:  $(P_S/P_J)_0$  和  $(P_S/P_J)_k$  分别表示引信采取抗干扰措施前后,引信接收机输出的信号干扰功率比。但是该指标没有考虑采用抗干扰技术给引信系统整体性能带来的影响。因此,研究人员对 EIF 指标进行了改进,定义了系统损失系数  $L$ ,提出了有效抗干扰改善因子(Effective EIF, EEIF),记为  $K_{\text{EEIF}}$ ,表达式为

$$K_{\text{EEIF}} = L \frac{(P_S/P_J)_k}{(P_S/P_J)_0} \quad (5)$$

### (4) 压制式干扰下测距精度

对于具有理想的矩形脉冲信号和匹配接收系统的引信,在忽略距离单元采样引起误差的条件下,测距精度  $\sigma_R$  主要由接收机输出端的信号噪声

能量比来决定,其表达式为

$$\sigma_R = \frac{\tau}{\sqrt{2E/(E_J + E_N)}} c \quad (6)$$

式中:  $\tau$  为信号脉冲宽度;  $E$  为信号能量;  $E_J$  为干扰信号能量;  $E_N$  为噪声信号能量;  $c$  为光速。

匹配损失、波束形状损失和检波损失都会在检波后的视频积累接收系统中存在,此时有

$$\sigma_R = \frac{\tau \sqrt{[E/(E_J + E_N)]_m + L_p}}{[E/(E_J + E_N)]_m} \times \sqrt{\frac{L_p}{2nL_m}} \times c \quad (7)$$

式中:  $[E/(E_J + E_N)]_m$  为天线波束对准目标时雷达接收机的输出信噪比(包含噪声和干扰);  $L_p$  是波束形状损失,其经验值约为 1.6 dB;  $L_m$  为不匹配损失,其经验值约为 1 dB;  $n$  是波束内脉冲数。

由式(7)可知,当引信受到干扰时,接收机输出的信噪比会变化,引信的测量误差也会增加。当使用抗干扰技术时,若引信的测量精度变化较小,则表明引信抗干扰性能较好。

## 2.2 抗无源压制式干扰性能评估指标

无源压制式干扰主要是箔条和悬浮气体干扰,它们相当于无源偶极子对无线电信号形成强反射,将增加引信探测目标的难度。

若无源干扰区的有效反射面积为  $\sigma_j$ ,则引信接收的干扰信号功率

$$P_j = \frac{P_i G_i^2 \lambda^2 \sigma_j}{(4\pi)^3 R^4 L} \quad (8)$$

式中:  $R$  为无源干扰区到引信的距离。

假设干扰区(体积为  $V_j$ )有  $N$  个偶极子,其平均有效截面积为  $\sigma_d$ ,  $V_0$  为引信的分辨空间体积,则

$$\sigma_j = \frac{\sigma_d N}{V_j} V_0 \quad (9)$$

当目标处于无源干扰区内时,若目标的有效截面积为  $\sigma$ ,可近似求得接收机输出端信干比

$$\frac{P_S}{P_J} = \frac{\sigma V_J}{\sigma_d N V_0} \quad (10)$$

根据分辨体积公式  $V_0 = R_{\text{max}}^2 \theta_\alpha \theta_\varphi \tau c / 2$ ,可以求得

$$R_{\text{max}}^2 = \frac{2\sigma V_J}{\sigma_d N \theta_\alpha \theta_\varphi \tau c (P_S/P_J)} \quad (11)$$

式中： $\theta_a$  和  $\theta_\varphi$  为引信半功率波瓣宽度； $\tau$  为脉冲宽度。由式(11)可知， $R_{\max}$  越大，表明引信系统的抗干扰性能就越优异。

由于无源压制式干扰在本质上也是降低引信接收机的输出端信干比，所以其他的抗有源压制式干扰所使用的评估指标同样适用于评估抗无源压制式干扰性能。

### 2.3 抗有/无源欺骗式干扰性能评估指标

#### (1) 测距精度

测距精度是测距引信的主要性能指标，用其直接描述测距引信抗欺骗式干扰性能是最为有效的。测距引信抗干扰性能越好，实际测距精度肯定就越高。

#### (2) 抗干扰成功率

若引信在干扰条件下进行多次引爆测试，其正常引爆(不早炸、不哑火)的次数越多，证明其抗干扰性能越好。将引信在规定干扰条件下能够有效引爆的次数与总试验次数之比定义为抗干扰成功率。

#### (3) 干扰机截获时间

有源欺骗干扰中干扰机对引信进行干扰时，需要获取引信信号。引信抗干扰能力越强，干扰机获取信号的时间越长。从开启干扰机至干扰机获得引信信号的时间定义为干扰机截获时间。

#### (4) 引导干扰时间

引信受到干扰机干扰的结果之一是引信早炸。在同等干扰条件下，无目标时引信启动得越晚，则该引信的抗干扰能力越强。定义干扰机开始干扰至引信启动的时间为引导干扰时间。

#### (5) 无源欺骗信号识别率

若引信识别无源欺骗式信号较多，则表明其抗无源欺骗式干扰性能较强。定义无源欺骗信号识别率为发现假信号次数占无源欺骗干扰总次数的百分比。

## 3 无线电引信抗干扰性能评估方法

### 3.1 国内相关标准

GJB 3257—1998《无线电引信干扰效果评定准则》<sup>[2]</sup>中规定了无线电引信干扰设备对无线电引信干扰效果评定的一般准则。该标准适用于无

线电引信干扰设备在设计定型和生产定型试验时对无线电引信干扰效果的评定。

GJB 4964—2003《无线电引信对抗设备战术技术要求项目格式》<sup>[3]</sup>规定了拟制无线电引信对抗设备战术要求的项目格式。该标准适用于地面、舰船及机载等无线电引信对抗设备，是拟制和论证其战术技术指标要求应遵循的基本依据。

### 3.2 指标体系构建方法

引信抗干扰性能评估是一个多指标综合评估问题，需要从多个角度和层次反映无线电引信抗干扰性能的水平。构造一个抗干扰评估指标体系就相当于构造一个信息处理系统，该系统可根据经过统一处理的输入得到特定的输出结果。而构造系统最重要的就是系统元素和系统组织结构。在抗干扰评估指标体系中，系统元素就是基本的单个评估指标，而系统结构就是评估指标之间的依赖和隶属关系<sup>[4]</sup>。建立评估指标体系流程如图2所示。

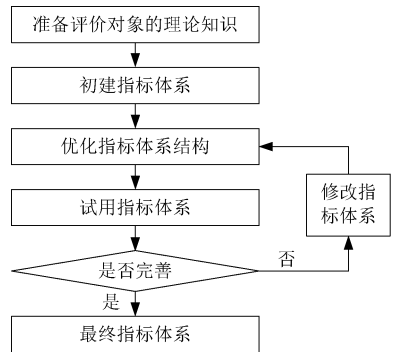


图2 构建指标体系流程图

由前面的分析可知，无线电引信在工作过程中可能会受到多种不同形式的干扰，因此需要通过多种不同的抗干扰样式去建立抗干扰评估指标体系。

### 3.3 指标体系的优化方法

分析第2章建立的初始抗干扰性能指标评估体系，可发现虽然指标体系比较完备，但没有考虑指标对评估结果的作用和各个指标之间的相关性。由于各个指标之间的相关性很强，导致初始指标体系较繁杂，所以需要对其初始指标体系进行优化，以精简指标个数，尽可能地降低冗余。常用的优化方法有极大不相关法和模糊粗糙集法。

极大不相关法能够根据指标体系中的指标相关性,选取相关性较弱的指标,组成新的指标体系,降低指标体系的冗余度。粗糙(Rough)集<sup>[4]</sup>方法能够反映系统评价指标之间的依赖关系,区分不同类型的指标,并从初始指标体系中查找出完全确定评价结果的最精简指标组合。

对于评估指标,可以概括为离散型指标和连续型指标。其中,离散型指标值必须用语言或者少量的离散值描述,而连续型指标值是在一个连续区间内。对于连续型指标,Rough 集不能直接进行处理,需要先对其进行离散化,而这一过程很有可能导致重要信息丢失。信息丢失的严重程度对评价结果的准确性具有很大影响。模糊集可以通过隶属函数来处理集合中子类边界的模糊性,所以将模糊集与粗糙集相结合的模糊粗糙集(Fuzzy-rough Set,FRS)能够很好地解决连续型指标离散化问题,并可以优化无线电引信抗干扰指标体系,使其冗余度大大降低。

### 3.4 指标权重的求取方法

在完成系统抗干扰性能评估指标体系的建立和优化后,就可以确定体系中的所有评估指标。由于各个评估指标的重要程度和每个样本对应指标体系中的各个指标值都是不同的,需要正确有效地确定各个评估指标在评估系统中的权重系数,来计算出能定量描述引信抗干扰性能的综合评估值。常用的权重系数选取方法有统计法、直接给出法、最大离差法和层次分析法等。其中,层次分析法<sup>[5]</sup>由美国匹兹堡大学 T. L. SATTY 教授于 20 世纪 70 年代初期提出,是一种定性定量相结合的多准则决策方法。它利用决策者的认知,对复杂问题进行简易处理,并做出决策。无线电引信抗干扰指标体系中,指标因素繁多复杂,且难以全部量化,层次分析法对解决这种复杂问题十分有效,并且可以简化系统分析和计算工作。因此本文选择群决策中层次分析法的排序方法,来确定指标体系中的指标权重系数。层次分析法的建模流程如图 3 所示。

该方法中,决策者根据自己的经验,对指标体系中各个指标进行相对重要性评估,给出两两判断矩阵,最后求出各个指标的权重系数。

由  $m$  个评估者对  $n$  个评估指标  $\{x_1, x_2, \dots,$

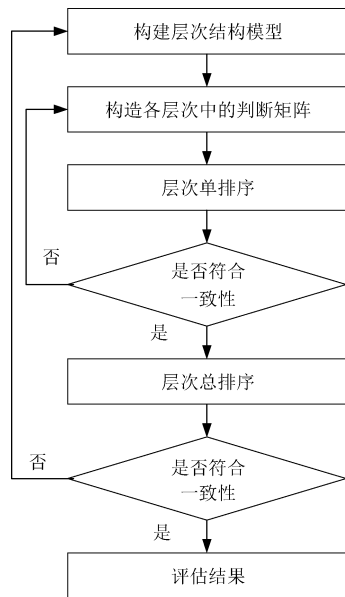


图 3 层次分析法的建模流程

$x_n$  组成的评估指标体系进行评估,每一次每个评估者取两个评估指标  $x_i$  和  $x_j$  进行重要性比较。 $a_{ij}^k (k \in [1, m], i, j \in [1, n])$  表示第  $k$  个评估者所认为的  $x_i$  和  $x_j$  对评价结果的影响大小之比。每个评估者所得到的全部比较结果构成的矩阵  $\mathbf{A}^k = [a_{ij}^k]_{n \times n}$  即为判断矩阵,其中  $a_{ij}^k$  为矩阵元素,一般用数字 1~9 及其倒数作为标度量值。

利用群集结方法,将多个评估者的判断矩阵进行集结,构成一个判断矩阵。假设第  $k$  个评估者在评估体系中的重要度为  $a_k$ ,且  $0 \leq a_k \leq 1$ ,  $\sum_{k=1}^m a_k = 1$ 。则群集结后的判断矩阵是最接近所有评估者的判断的,则有最小均方差

$$D_{\min} = \min \left( \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m a_k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij}^* - a_{ij}^k)^2 \right) \quad (12)$$

对式(12)等号两边求偏导,则有

$$\frac{\partial D}{\partial a_{ij}} = \sum_{k=1}^m a_k (a_{ij}^* - a_{ij}^k) = a_{ij}^* - \sum_{k=1}^m a_k a_{ij}^k = 0 \quad (13)$$

可得

$$a_{ij}^* = \sum_{k=1}^m a_k a_{ij}^k \quad (14)$$

将所得判断矩阵按列进行归一化,并按行求和,得到权重系数

$$\bar{\omega}_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (15)$$

再归一化后得到各个指标的权重系数

$$\omega_i = \bar{\omega}_i / \sum_{j=1}^n \bar{\omega}_j \quad (16)$$

### 3.5 抗干扰评估性能计算

根据引信工作环境选择合适的评估指标,假定选择的评估指标为最大作用距离、反压制系数、测距精度以及抗干扰成功率。根据引信的体制方案,通过仿真试验的方法得到各个评估指标。假设各评估指标数据为  $x_1, x_2, x_3, x_4$ 。由于各评估指标间一致性相差很大,根据评估指标的特点和基本属性,利用模糊数学对其进行模糊化处理。

在同等干扰条件下,最大作用距离越大,其抗干扰性能越好。将其模糊处理,设定其隶属函数为

$$p_1(x_1) = \frac{1}{1 + \exp(-x_1)} \quad (17)$$

而在相同的干扰环境下,反压制系数越小,则其抗干扰性能就越好。将其模糊处理,设定其隶属函数为

$$p_2(x_2) = \frac{1}{1 + \exp(x_2)} \quad (18)$$

在相同的干扰环境下,测距精度越小,则其抗干扰性能越好。设定其隶属函数为

$$p_3(x_3) = \frac{1}{1 + \exp(100x_3)} \quad (19)$$

在相同的干扰环境下,抗干扰成功率越高,则其抗干扰性能越好,且该评估值为百分数。设定其隶属函数为

$$p_4(x_4) = x_4 \quad (20)$$

再根据 3.4 节中方法求得四个评估指标对应的权

重系数  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 。则其综合评估结果为

$$p = p_1 \times \omega_1 + p_2 \times \omega_2 + p_3 \times \omega_3 + p_4 \times \omega_4 \quad (21)$$

## 4 结 论

无线电引信在工作过程中会面临多种不同的干扰,因此需要根据不同的抗干扰样式去建立评估指标体系。本文提出的无线电引信抗干扰性能评估方法,通过合理有效的指标体系构建流程,可以针对不同的干扰样式和引信体制,高效地构建一个完善的评估体系,来应对引信多样化的抗干扰性能评估需求。根据实际引信设计方案设置相关参数,选择相应的指标和评估矩阵,完成无线电引信在不同干扰条件下的抗干扰性能评估。

### 参 考 文 献

- [1] 栗苹, 郝新红, 闫晓鹏, 等. 无线电引信抗干扰理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2019.
- [2] 国防科学技术工业委员会. 无线电引信干扰效果评定准则: GJB 3257—1998[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1998.
- [3] 中国人民解放军总装备部. 无线电引信对抗设备战术技术要求项目格式: GJB 4964—2003[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2003.
- [4] 戚宗锋, 韩山, 李建勋. 基于粗糙集的雷达抗干扰性能评估指标体系研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 28(2): 335-342.
- [5] 孟宪猛, 蔡翠翠, 张东. 基于多层次模糊算法的雷达抗干扰性能分析[J]. 船舶电子工程, 2017, 37(4): 59-62.