

基于灰色关联分析和模糊综合评判的 GNSS 欺骗干扰效能评估

王 月,郝金明,刘伟平

(战略支援部队信息工程大学地理空间信息学院,河南郑州 450001)

摘 要: GNSS(Global Navigation Satellite System)欺骗干扰装备,是“导航战”重要组成,对其效能的有效评估决定了目标任务的成功.但目前存在影响因素的模糊性和不确定性大、因素间影响关系的传递性弱、评估方法适用性差、评估效率低等难点问题.针对这些问题,本文提出一种基于灰色关联分析和模糊综合评判的评估方法.在指标体系搭建完成的基础上,利用层次分析法确定指标权重,并通过纵向计算灰色关联度,得到最优方案;再通过模糊综合评判,得到最优方案的评估结果;最后通过横向计算灰色关联度,来选取与评估结果关联度高的指标.实验证明,本文提出的方法解决了评估存在的难点问题,达到有效评估的目的.

关键词: 导航战;欺骗干扰装备;评估指标;灰色关联分析;模糊综合评判

中图分类号: P228.4; TN972+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2020)12-2352-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.12.010

GNSS Spoofing Effectiveness Evaluation Based on Grey Relational Analysis and Fuzzy Comprehensive Assessment

WANG Yue,HAO Jin-ming,LIU Wei-ping

(College of Geospatial Information,PLA Information Engineering University,Zhengzhou,Henan 450001,China)

Abstract: GNSS(Global Navigation Satellite System) spoofing equipment is the important components of “Navigation war”. The valid evaluation of its effectiveness determines the success of the target task. However, there are still many difficult issues, such as the great ambiguity and uncertainty of influencing factors, the weak transitivity of influencing relations between factors, the poor applicability of assessment methods and the low evaluation efficiency. To deal with these problems, an evaluation method based on grey relational analysis and fuzzy comprehensive assessment is proposed. Firstly, the optimal scheme is obtained by calculating grey relational degree longitudinally. Secondly, the evaluation results of the optimal scheme are obtained by using fuzzy comprehensive assessment. Finally, the indexes highly correlated with the evaluation results are selected based on calculating gray relational degree horizontally. The test results show that these difficult problems are solved by the method proposed in this paper.

Key words: navigation war; spoofing equipment; evaluation index; grey relational analysis; fuzzy comprehensive assessment

1 引言

近年来,“导航战”日益得到各国的重视,欺骗式干扰相关技术已经迈向了具体实验阶段,相关单位也陆续研制了以欺骗干扰为主的卫星导航欺骗干扰装备等.而作为“导航战”重要工具之一的GNSS欺骗干扰装备,其效能直接关系到被保护目标的生存概率及装备实施欺骗的成功概率,故对其效能的有效评估并选取

效能优的装备不仅能够增强现代化卫星导航信息对抗作战能力,也将很大程度上决定目标任务的成功.但要实现有效评估,存在三个难点:(1)由于电磁环境的复杂性、任务要求的多变性和欺骗干扰可实现度的不确定性,影响干扰效能的因素具有不可回避的模糊性和不确定性,如文献[1]提出的指标及检测方法不完备,评估时就很难得到适用于每一种欺骗场景的合理结果.而为了能在最复杂的条件下寻求最优解,需要构建尽可能全面

的评估指标体系并对应设置多种干扰场景,即不同的方案,得到复杂体系下的合理评估值;(2) 传统多方案评估方法常局限于表达因素间的直接影响关系,如文献[2]忽略了影响关系的传递性,导致在实际运用中,既无法根据突发状况快速选取几组合理指标,也无法提高评估效率快速得到性能优的装备;(3) 国内相关学者对评估方法开展了一些的研究,如文献[3,4]对 SAR 和 ISAR 的欺骗干扰效果进行了评估,文献[5,6]对激光制导武器装备进行干扰效能评估,文献[7]对雷达有源欺骗效果进行评估.而国外学者对效能评估方法的研究主要集中于欺骗攻击下的生物识别技术和网络安全系统、智能电网及用户接收机抗欺骗的防御能力等领域.前人未能提出一个较好适用于“导航战”相关设备的有效评估方法.

为了解决上述三个难点问题和实现对 GNSS 欺骗干扰效能的有效评估,本文从方法的优越性、可行性和实践性等方面入手,由理论分析到实例论证、由浅及深的开展了下列工作.

2 基本原理

为了减小影响因素的模糊性和随机性,这里引入模糊综合评判(Fuzzy Comprehensive Assessment, FCA)的方法;为了考虑因素间影响关系的传递性和提高评估效率,引入灰色关联分析(Grey Relational Analysis, GRA)的方法;为了平衡实测仿真数据的客观性,引入层次分析(Analytic Hierarchy Process, AHP)的方法.各方法的具体原理及优越性如下.

2.1 层次分析方法

装备在评估时显然不能以个别指标来评价其性能的优劣,而应根据其承担的具体任务把反映欺骗效能

的指标汇集在一起,进行综合处理,建立指标体系,如图 1 所示;并确定各个指标在系统效能评估中所起作用的大小,即指标定权.通常指标权重可通过主观和客观赋权法确定.其中,主观赋权法主要是直接给出指标权重系数或根据专家自身的偏好、经验对指标的重要性程度进行两两比较得到,例如由运筹学家 Saaty 提出并得到广泛利用的决策分析工具——层次分析法.

在 27 个指标中有 20 个定量指标(即欺骗-基础性性能指标)和 7 个定性指标(即作战性能指标).为了平衡实测仿真数据的客观性,本文采用 AHP 方法定权.通过求解判断矩阵的最大特征值所对应的特征向量,可得到合理的层次单排序和总排序权重向量,为灰色关联分析方法和模糊综合评判方法的开展提供赋权基础.

2.2 灰色关联分析

作为因素识别和解析工具的灰色关联分析方法是一种先通过计算各点的关联系数,再采用数学手段得到各子因素相对于母因素的关联度的系统分析方法;也是一种主客观数据结合的多方案的评估方法.

由于定性定量指标在方案设定上需要有所区分,故本文在众多方案中选取三种相对合理的方案,其中欺骗-基础性性能指标为方案 1~3,作战性能指标为方案 I~III,如图 1 所示.利用该方法,通过纵向灰色关联度计算,得到各方案的灰色关联度高低排序,确定关联度最高的方案,即为最优方案;同理,通过横向灰色关联度计算,可得到与最优方案评估结果关联度高的指标集,用于应急评估.所以,在 GNSS 欺骗干扰装备的干扰效能评估中 GRA 方法能克服第二个难点问题,即有效考虑多方案因素间影响关系的传递性和提高评估的实际效率.

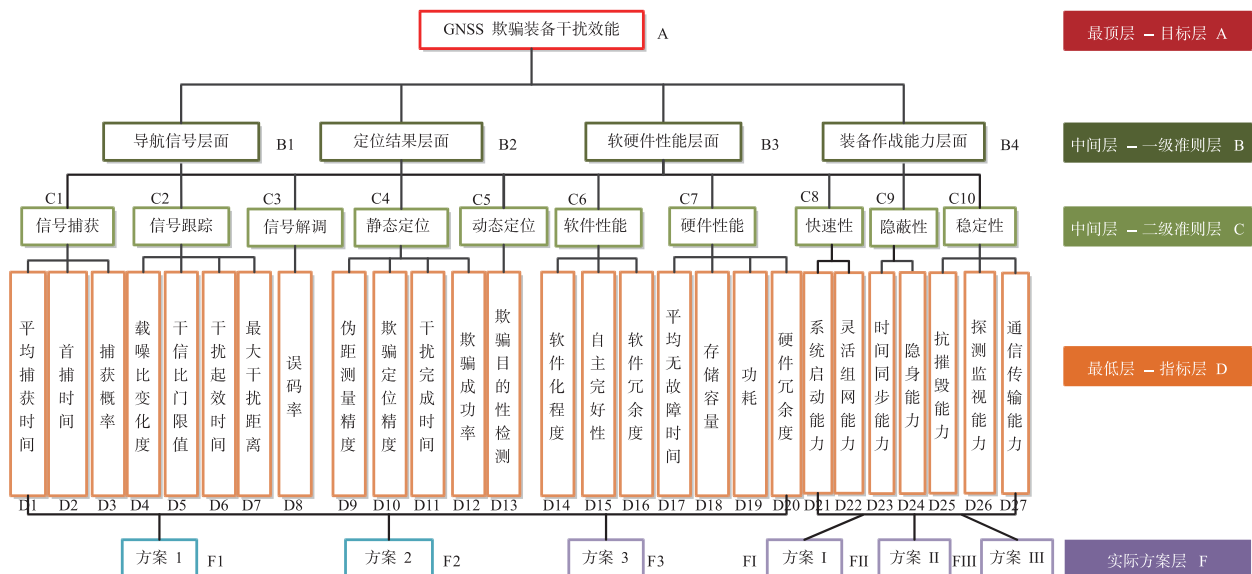


图1 效能指标多层次等级结构

2.3 模糊综合评判

模糊综合评判方法是一种定性与定量相结合、精确与非精确相统一的综合评估方法,也是以模糊推理为主的分析评价方法.该方法的优越性表现为,它能解决传统的数学方法难以攻克的模糊数学的相关问题,已广泛应用于各学科领域.

本文为了克服第一个难点问题,即减小影响因素的模糊性和随机性,通过这种评判方法,选取三种经典隶属函数进行最优方案的评估,得到其对应的评估结果,用于对方案的重新调整反馈,也可确定适用于GNSS欺骗干扰效能评估体系的最合理隶属函数.

3 评估方法

为了对装备干扰效能实现有效评估,本文首先利用AHP方法实现指标定权,并通过GRA方法纵向计算灰色关联度确定最优方案;其次通过FCA方法,确定最优方案的百分制评估结果;最后通过GRA方法横向计算灰色关联度,选取与评估结果关联度高的指标.

3.1 最优方案确定

3.1.1 指标定权

利用AHP方法进行指标定权步骤如下:

步骤1 建立多层次等级结构.利用AHP方法构建层次结构模型时,首先要对指标进行分层,自上而下按照最顶层、若干中间层和最低层的结构排列,如图1所示.其中一级准则层B是效能评估时的一级指标集;指标层D是由定性评估转为定量评估的关键,也是指标检测开展的第一切入点,还是效能评估时的二级指标集.

步骤2 建立比较判断矩阵.建立多层次等级结构之后,通过指标间的相互比较得到其对于上一层次指标的相对重要性,并由专家按文献[8]提出的标度法(见表1)打分建立对应的判断矩阵.如一级准则层B相对于目标层A的判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,及指标层D相对于一级准则层B判断矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times n}$.

表1 1~9 标度含义

比例标度	含义(前一因素相对后一因素的比较)
1	同等重要
3	稍微重要
5	明显重要
7	非常重要
9	极端重要
2,4,6,8	对应比例标度代表的重要程度的中间值

步骤3 计算层次单排序向量.通过求解判断矩阵的最大特征值对应的特征向量可计算出一级准则层B中因素相对于目标层A的一级单排序权重向量,结果用于表示层次B中因素的排序优先程度,见式(1):

$$AW = \lambda_{\max} W, W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T \quad (1)$$

而特征向量的计算方法有求和法和平方根法.这里采用求和法得到矩阵的特征向量W,见式(2)和式(3).同理可得指标层D中因素相对于一级准则层B的二级单排序权重向量 W_i .

$$v_i = \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \right) / \left(\sum_{i=1}^n a_{ij} \right), w_i = v_i / \left(\sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (2)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(AW)_i / w_i], i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

步骤4 计算层次总排序向量.所谓层次总排序向量是指标层中各因素相对于目标层重要性的权值排序向量.其中层次B中因素相对于层次A的单排序向量用 W_B^A 表示,而层次D相对于层次B的单排序向量用 W_D^B 表示,故可得指标层D相对于目标层A的总排序向量 W_D^A :

$$W_D^A = W_D^B W_B^A \quad (4)$$

步骤5 一致性检验.由于决策者的偏好不同,致使对指标主观判断具有不稳定性.同时评估指标具有复杂性,使得判断矩阵不一定满足一致性条件.因此,矩阵的不一致程度可以利用一个数量标准来衡量,即一致性比例,具体计算参见文献[8].

3.1.2 效能评估

利用GRA法进行效能评估步骤如下:

步骤1 构建指标矩阵.干扰效能评估指标矩阵可表示为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: n 为方案数, m 为指标数, x_{ij} 表示第*i*个方案的第*j*个指标的值.

步骤2 灰色关联生成.由于效能评估指标具有不同的单位和数量级,需对其进行等极化,即按极性可将指标分为正向型(评估值越大,其对应的指标性能越优)、负向型(评估值越小,指标性能越优)和适中型(评估值适中,指标性能为最优);再通过归一化处理,可使其全部覆盖在区间[0,1]内.本文在评估时将指标分为正向型和负向型两类:正向型指标的等极化处理公式为

$$u'_{ij}(x_{ij}) = \frac{x_{ij} - \min_i \{x_{ij}\}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}} \quad (6)$$

负向型指标的等极化处理公式为

$$u'_{ij}(x_{ij}) = \frac{\max_i \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}} \quad (7)$$

通过式(6)和式(7)处理得到的矩阵称为等极化矩阵.再对其进行归一化处理得到决策矩阵为U.其中,决策矩阵中的各评估值 u_{ij} 适用于评判该指标体系的方案

优劣程度. u_{ij} 越大, 表示该指标体系对应的第 i 个方案越优, 可优先作为效能评估时的预选方案.

步骤 3 灰色关联系数计算. 计算差值矩阵 Δ 的元素. 为

$$\Delta_{ij} = |u_{0j} - u_{ij}| \quad (8)$$

在 Δ 中找出 Δ_{\min} 和 Δ_{\max} . 则 u_{ij} 与预设参考值 u_{0j} 之间的灰色关联系数 ε_{ij} 由式(9)计算:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \rho\Delta_{\max}} \quad (9)$$

式中, 用于调节灰色关联系数范围的分辨系数 ρ 通常取值为 0.5.

步骤 4 灰色关联度计算. 利用灰色关联系数 ε_{ij} 和总排序权重 w_j 得方案的关联度:

$$r_i = \sum_{j=1}^m w_j \varepsilon_{ij} \quad (10)$$

根据各方案的关联度 r_i 的高低, 对其进行排序, 确定关联度最高的方案, 即为最优方案.

3.2 最优方案评估

利用 FCA 进行最优方案评估步骤如下:

步骤 1 确定因素集合. 设二级指标有 n 个, 即 $S = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, 根据一级指标的属性将其分成 u 个子集, 即 X_1, X_2, \dots, X_u , 其中

$$\bigcup_{i=1}^u X_i = S, X_i \cap X_j = \emptyset, i \neq j, X_i = [x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_{n_i}}] \quad (11)$$

式中, n_i 表示第 i 个一级指标对应的二级指标个数, 且

$$\sum_{i=1}^u n_i = n.$$

步骤 2 分配指标权重. 利用 AHP 方法, 可得到第 i 个一级指标对应的二级指标集的一级单排序权重向量和二级单排序权重向量, 见式(12). 其中 $\sum_{i=1}^{n_i} w_{i_{n_i}} = 1$.

$$\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_u], \mathbf{W}_i = [w_{i_1}, w_{i_2}, \dots, w_{i_{n_i}}] \quad (12)$$

步骤 3 确定评价集合. 对指标去除量纲后, 根据评估的实际需求, 构建评价集合 V , 其包含 4 个等级: “不合格”、“合格”、“良好”和“优秀”; 再将定性等级对应转化成百分值, 使评判结果的优劣程度易于区分, 即: 0 ~ 60 为不合格, 60 ~ 70 为合格, 70 ~ 80 为良好, 80 ~ 100 为优秀. 取等级区间的中间值 (“不合格”的中间值取 55) 可得评价集量化为:

$$\mathbf{V} = [55, 65, 75, 95] \quad (13)$$

步骤 4 获得评估结果. 在得到评估结果前, 首先需要选取合理覆盖各个指标参数的隶属函数. 本文利用三角形、各种岭形及三角形和半梯形结合的 3 种经典隶属函数计算隶属度. 函数仿真得到图 2 ~ 图 4. 可得第 i 个一级指标对应的二级指标集的隶属矩阵 \mathbf{R}_i . 随后根据隶属矩阵及二级单排序权重向量 $\mathbf{W}_i =$

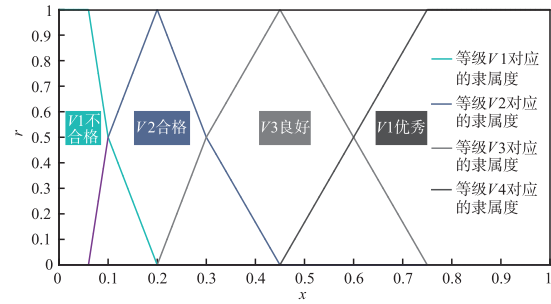


图2 三角形隶属函数

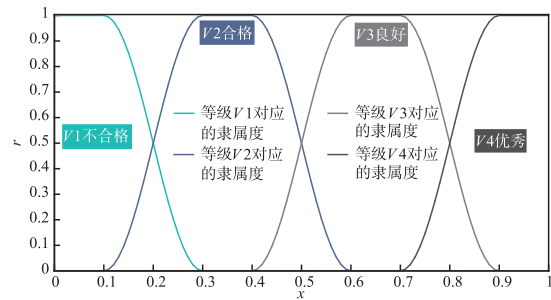


图3 各种岭形结合的隶属函数

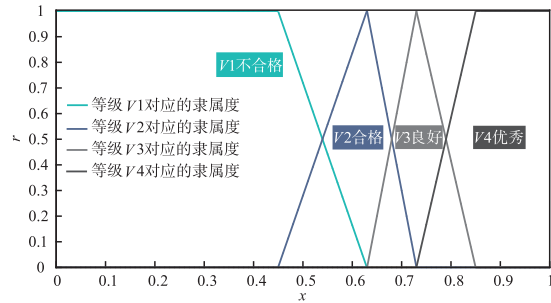


图4 三角形和半梯形结合的隶属函数

$[w_{i_1}, w_{i_2}, \dots, w_{i_{n_i}}]$, 进行评判计算. 具体方法如下:

先假设有 v 个评价等级, 则所有一级评判向量为

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{W}_i \circ \mathbf{R}_i = [e_{i_1}, e_{i_2}, \dots, e_{i_v}], i = 1, 2, \dots, u \quad (14)$$

式中, \circ 为模糊算子. 再根据一级指标集对应的一级单排序权重向量 $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_u]$ 与其对应的隶属矩阵 $\mathbf{R} = [\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \dots, \mathbf{E}_u]^T$, 可得最终的二级评判向量为

$$\mathbf{E} = \mathbf{W} \circ \mathbf{R} = [e_1, e_2, \dots, e_v] \quad (15)$$

最后利用两次评判计算得到的二级评判向量 \mathbf{E} 和评价集合 V 的运算, 得到综合评估结果为

$$\mathbf{Z} = \mathbf{E} \mathbf{V}^T \quad (16)$$

根据综合评估结果值 Z , 对应评价集合区间, 确定以最优方案为测试条件的欺骗装备干扰效能的优劣等级.

3.3 应急指标选取

利用上述 GRA 方法的原理及步骤: 首先, 设定 FCA 方法得到的评估结果为母序列, 等极化处理的各指标

为子序列;其次,求取母序列与子序列的差值,利用式(9)计算各指标的灰色关联系数;最后,结合 AHP 方法得到的权值,利用式(10)计算二级指标相对于最优方案评估结果的灰色关联度,选取关联度高的指标,即对欺骗装备干扰效能影响程度较大的指标,作为紧急状况下,快速确定装备性能的应急评估体系。

4 实例分析

以装备效能评估方案为例,验证评估方法。所有方案对应的指标量化值的获取需要 6 种检测手段(指标用图 1 中编号替代):

(1) 室内仿真测试。利用导航信号模拟器(生成多路导航信号,将真实信号进行一定延时,作为欺骗信号叠加到真实信号中)和微波暗室,如图 5(a)~(c),进行半实物仿真。改变欺骗信号功率得到不同的

D2、D3、D6、D8、D9、D14;(2) 播发特定指令。在不同功率的模拟信号环境下,通过给接收机播发特定指令,再通过稳定度公式^[9]计算,可得不同的 D2、D4、D8;(3) 理论公式仿真。对于信号层指标:通过前期研究的理论及公式^[9]推导得到 D1、D3、D5 与不同信号性能参数的关系,改变生成信号功率,得到不同指标值。对于软硬件层指标:根据不同装备本身的性能值带入对应指标计算公式^[10]得到 D15、D16、D20;(4) 室外动态测试。在设置不同欺骗信号功率的前提下,利用自动测量机器人动态评估实验(部分设备见图 5(d)~(e))得到 D7、D10、D11、D12、D13;(5) 直接取值。参考不同装备的出厂值可得 D17、D18、D19;(6) 专家打分。由专家按 1~9 标度法打分获取作战能力层对应量化值 D21~D27。



图5 定量指标数值的实测仿真环境

基于以上 6 点,测试方案简述为:方案 1:设置欺骗信号平均功率为 -150dBW ,改变 5 次功率(考虑成本仅进行了 5 次改变得到的指标结果取平均值),欺骗装备编号为 XA;方案 2:欺骗装备编号为 XB,其他条件与方案 1 相同,下同;方案 3:欺骗装备编号为 XC。方案 I:全数字仿真法;方案 II:半实物仿真法;方案 III:全实物测试法。

利用评估方法对如上 3 项方案进行评估,评估流程(图 6)、主要步骤和数据结果(仅展示图 6 中用蓝色和绿色填充的对应步骤及结果)分析如下:

4.1 最优方案确定

首先,利用式(4)计算得到总排序权重向量,如式

(17) 所示。

$$W_D^A = \begin{bmatrix} 0.0321, 0.0173, 0.0121, 0.0199, 0.0076, 0.0214, \\ 0.0812, 0.0449, 0.0841, 0.1318, 0.0409, 0.2618, \\ 0.0212, 0.0108, 0.0063, 0.0056, 0.0099, \\ 0.0039, 0.0027, 0.0164, 0.0354, 0.0120, \\ 0.0300, 0.0085, 0.0211, 0.0045, 0.0563. \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

同时,构建对应方案的指标矩阵,如图 1. 27 个指标均通过上述 6 种检测手段获得定量值,汇总得到指标矩阵。以欺骗-基础性能指标为例,如表 2 所示。

表 2 欺骗-基础性能指标矩阵

方案	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈	D ₉	D ₁₀
1	99	2105	0.33	0.103	77.3	4.9	5000	0.098	0.12	0.0276
2	2099	1852	0.89	0.083	77.8	3.9	8000	0.121	0.26	0.1583
3	75580	1999	0.97	0.091	78.0	3.7	600	0.233	0.10	0.0143
方案	D ₁₁	D ₁₂	D ₁₃	D ₁₄	D ₁₅	D ₁₆	D ₁₇	D ₁₈	D ₁₉	D ₂₀
1	14.9	0.94	0.130	4.9	6	1.3	83333	20	1.00	0.97456
2	13.8	0.78	0.073	3.9	10	0.9	50000	15	0.75	0.57933
3	13.1	0.84	0.061	3.7	9	0.7	10000	10	0.30	0.40215

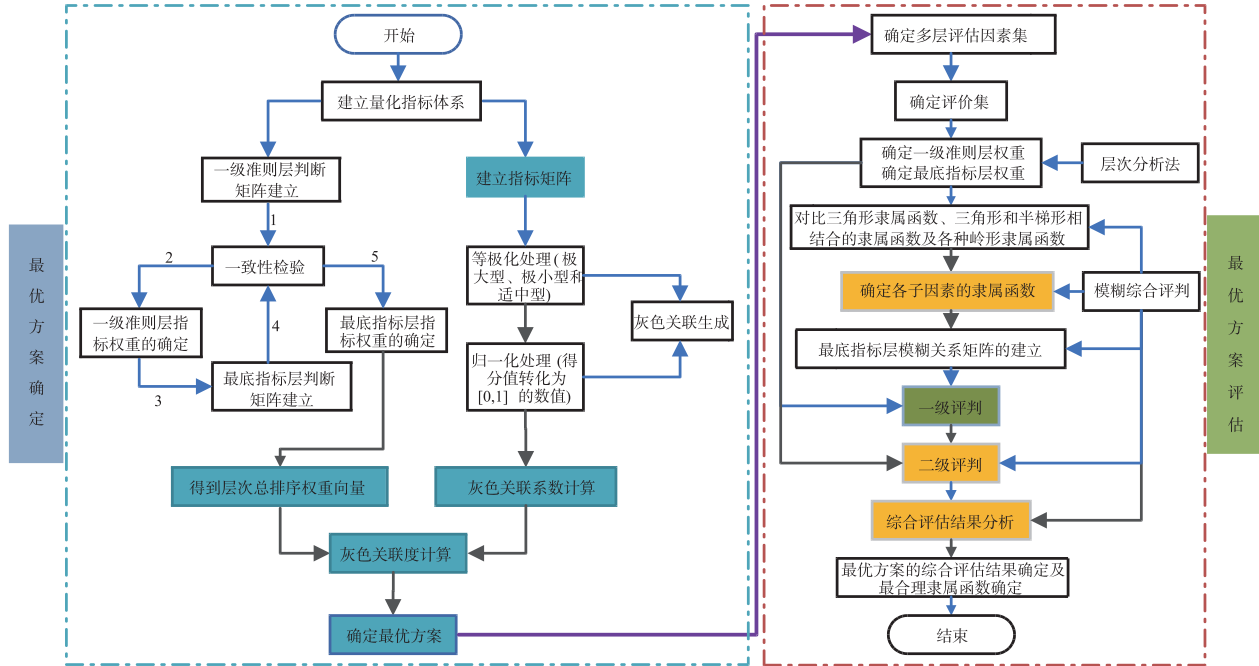


图6 GNSS欺骗干扰效能评估流程及步骤

随后,灰色关联系数计算. 在决策矩阵的基础上, 用式(8)计算,得到差值矩阵 Δ , 其中 $\Delta_{\max} = 1.00, \Delta_{\min} =$

0.15, 经过式(9)计算, 得灰色关联系数. 以欺骗-基础性能指标为例, 如表 3 所示.

表 3 欺骗-基础性能指标对应的灰色关联系数

方案	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D ₁₀
1	0.65	0.43	0.43	0.43	0.89	0.43	0.57	0.43	0.62	0.63
2	0.64	0.81	0.62	0.74	0.51	0.62	0.74	0.48	0.43	0.43
3	0.43	0.54	0.62	0.57	0.43	0.67	0.43	1.00	0.67	0.66
方案	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D ₂₀
1	0.43	0.84	0.43	0.43	0.43	0.86	0.76	0.77	0.43	0.88
2	0.60	0.43	0.62	0.63	0.70	0.52	0.56	0.55	0.52	0.51
3	0.70	0.53	0.68	0.67	0.60	0.43	0.43	0.43	0.85	0.43

再将得到的灰色关联系数与层次总排序权重带入式(10)中, 计算出方案 1~3 的灰色关联度为 $r^{1-3} = [0.54, 0.43, 0.49]$, 方案 I~III 的灰色关联度为 $r^{I-III} = [0.09, 0.10, 0.11]$.

最后, 确定最优方案. 方案 1~3 的灰色关联度大小排序为 $0.54 > 0.49 > 0.43$, 方案 I~III 的大小排序为 $0.11 > 0.10 > 0.09$. 由图 7 可知, 各方案的最终排序为 $I > III > II > I$, 方案 1 和方案 III 为最优方案. 即对于欺骗-基础性能而言, 装备 X4 的干扰效能相对较好, 可优先用于实际; 而对于作战能力而言, 全实物测试虽然成本高, 但真实的测试环境使得评估结果利用价值最高.

4.2 最优方案评估

首先, 确定评估模型隶属函数. 各指标去除量纲

后, 再根据三种隶属函数(图 2~图 4), 建立各因素的评判矩阵, 以三角形隶属函数和导航信号层为例, 得一级评判矩阵为

$$R_1^{a(\text{三角形隶属函数})T} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.21 & 0.00 & 0.54 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.79 & 0.72 & 0.46 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.41 \\ 0.00 & 0.00 & 0.28 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.59 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \quad (18)$$

利用与导航信号层对应的二级单排序权重矩阵 W_1 , 如式(12), 和一级评判矩阵 R_1^a , 可得一级综合评判结果 E_1^a , 见式(19):

$$E_1^a = W_1 \circ R_1^a = [0.53, 0.21, 0.13, 0.14] \quad (19)$$

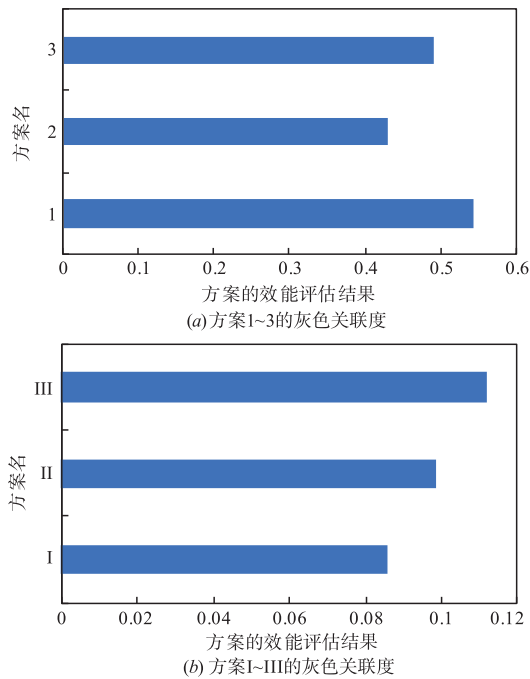


图7 方案1~3和方案I~III的灰色关联度柱状图

随后,利用一级准则层 B 包含因素的一级评判结果 $E_1^a, \dots, E_n^a, E_1^b, \dots, E_n^b$ 和 E_1^c, \dots, E_n^c , 构成二级综合评判矩阵 R^a, R^b 和 R^c . 最后,利用对应的一级单排序权重矩阵 W , 如式(12), 和二级评判矩阵 R , 根据式(15), 得到二级综合评判结果 E^a, E^b 和 E^c ; 再根据式(16), 将其换算成百分制即可得到最终的评估结果为

$$\begin{aligned} Z^a(\text{三角形隶属函数}) &= E^a V^T = 84.00, \\ Z^b(\text{各种岭形隶属函数}) &= E^b V^T = 80.51, \\ Z^c(\text{三角形和半梯形隶属函数}) &= E^c V^T = 79.96. \end{aligned} \quad (20)$$

从评估结果可知,最优方案得到的评价等级均属于良好及以上水平,验证了其其为最优方案,可用于实践; Z^a 和 Z^b 的评价等级均为优,而 Z^c 值更大,证明三角形隶属函数最适用于 GNSS 欺骗干扰效能评估.

4.3 应急指标选取

利用式(9)、式(10)和式(17)横向计算关联度,得到各指标相对于最优方案评估结果的各方案关联度及关联平均值分布图见图8和图9.

从图8和图9可知,D1、D7、D9、D10、D12、D21和D27的指标与最优评估结果的关联度高,即在需要快速确定装备效能优劣时,选取该组指标利用提出的方法进行粗略评估.而D9和D10关联度最突出,则在极端场景下评估该组指标,可提高评估效率.

在所有7个指标中,有2个信号层指标,3个定位层指标,2个作战层指标,关联度占比最高的是定位层的两个指标.由此可知:软硬件性能层对应指标客观性太强,在紧急状况下可直接判断.由于实测数

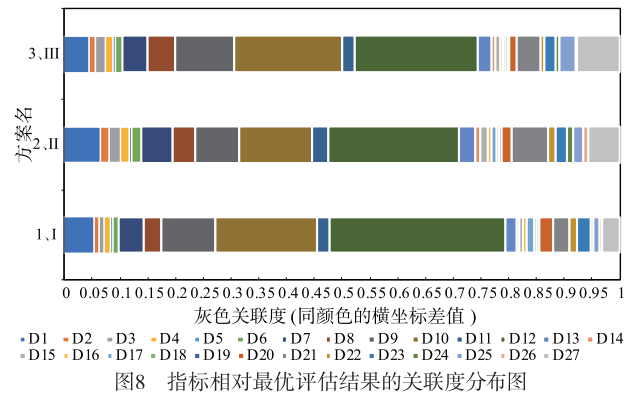


图8 指标相对最优评估结果的关联度分布图

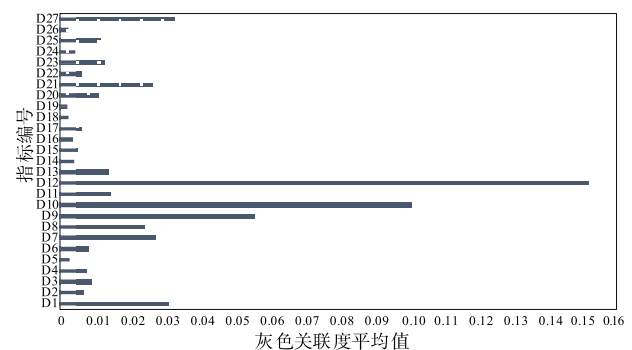


图9 指标相对最优方案评估结果的关联平均值分布图

据较难获取,作战能力层对应指标具有较高的模糊性,但由于其在评估装备效能时具备的特殊地位,致使该层对装备性能优劣程度的决定性高,但不是最高;而定位结果层对应的关联度高的指标最多,也将最大程度上影响装备欺骗效能的综合值.为提高生产装备的实际效能,应着重提高对应层指标的测试准确度.

5 结论

本文利用 GRA、FCA 和 AHP 方法,有效评估了装备的欺骗干扰效能,并通过实例分析验证了所提方法,结果表明:

(1) 装备 XA 的干扰效能相对较好;全实物测试虽然成本高,但真实的测试环境使得评估结果利用价值最高.

(2) 三角形隶属函数最适用于 GNSS 欺骗干扰效能的评估;而最优方案得到的评价等级均属于良好及以上,验证了其其为最优方案.

(3) 在需要快速锁定效能优的装备时,选取关联度高的欺骗成功率等7个指标进行评估;而在极度紧急场景下,评估伪距测量精度和欺骗定位精度即可以提高评估效率.

(4) 在“导航战”中,决定装备性能优劣的核心依然是作战能力及定位能力的高低.

参考文献

- [1] 张顺健,程力睿,王斌. 对 GPS 制导巡航导弹干扰效能评估方法[J]. 火力与指挥控制,2015,40(2):66-69.
Zhang Shun-jian, Cheng Li-rui, Wang Bing. Efficiency analysis of jamming on cruise missile guided by GPS[J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(2):66-69. (in Chinese)
- [2] 陈希祥,邱静,刘冠军. 基于层次分析法与模糊综合评判的测试设备选择方法研究[J]. 兵工学报,2010,31(1):68-73.
Chen Xi-xiang, Qiu Jing, LIU Guan-jun. Research on the method of test-equipment selection based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive assessment[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(1):68-73. (in Chinese)
- [3] 韩国强,李永祯,邢世其,等. 对新型 SAR 欺骗干扰效果的评估方法[J]. 宇航学报,2011,32(9):1994-2010.
Han Guo-qiang, Li Yong-zhen, Xin Shi-qi, et al. Research on an evaluation method for new deceptive jamming effect on SAR[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(9):1994-2010. (in Chinese)
- [4] 李筠,吴洁. ISAR 欺骗干扰仿真与效果评估研究[J]. 现代雷达,2018,40(1):86-91.
LI Yun, WU Jie. Simulation and effect evaluation of deception jamming signal on ISAR[J]. Modern Radar, 2018, 40(1):86-91. (in Chinese)
- [5] 王伟柱,刘治国,王仕成,等. 激光角度欺骗干扰效果评估实验研究[J]. 红外与激光工程,2018,47(11):67-72.
WANG Wei-zhu, LIU Zhi-guo, WANG Shi-cheng, et al. Evaluation of laser angle deception interference effect based on experiment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11):67-72. (in Chinese)
- [6] 李双刚,聂劲松,李化,等. 对激光半主动制导武器的角度欺骗干扰的效能评估[J]. 红外与激光工程,2011,40(1):41-45.
LI Shuang-gang, NIE Jin-song, LI Hua, et al. Assessment of effectiveness on angle deceptive jamming to semi-active laser-guided weapon [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(1):41-45. (in Chinese)
- [7] 田晓. 雷达有源欺骗干扰综合感知方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2013. 33-47.
TIAN Xiao. Study on the Methods of Radar Active Deception Jamming Integrated Sensing[D]. Chengdu: University of Electronic and Technology of China, 2013. 33-47. (in Chinese)
- [8] DONG Yu-cheng, HONG Wei-chiang, XU Yin-feng, et al. Selecting the individual numerical scale and prioritization method in the analytic hierarchy process: a 2-tuple fuzzy linguistic approach [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2011, 19(1):13-25.
- [9] 王月,郝金明,刘伟平,等. GNSS 欺骗干扰效能指标检测方法[J]. 测绘与空间地理信息,2019,42(10):51-56.
WANG Yue, HAO Jin-ming, LIU Wei-ping, et al. Indicator detection method of spoofing effectiveness of GNSS [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(10):51-56. (in Chinese)
- [10] 王永超,黄智刚. 时钟改进模型辅助 RAIM 算法研究[J]. 电子学报,2007,35(6):1084-1088.
WANG Yong-chao, HUANG Zhi-gang. Research on receiver autonomous integrity monitoring augmented with improved clock bias model [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6):1084-1088. (in Chinese)

作者简介



王 月 女,1994 年 12 月出生,江西九江人. 战略支援部队信息工程大学在读博士研究生,主要研究方向为 GNSS 欺骗干扰装备效能评估方法.

E-mail:2895771372@qq.com



郝金明 男,1962 年 3 月出生,山东曹县人. 信息工程大学获硕士学位. 现任信息工程大学博士生导师,研究方向为卫星精密定位技术等.

E-mail:haojm@139.com



刘伟平 男,1986 年 9 月出生,河南三门峡人. 信息工程大学获博士学位. 现任信息工程大学副教授,研究方向为卫星精密定轨技术等.

E-mail:lwpchxy@sina.com