

引用格式:方棉佳,陈朝.一种改进的TOPSIS法雷达干扰效果评估[J].信息对抗技术,2023,2(2):90-96. [FANG Mianjia, CHEN Zhao. Jamming effect evaluation of radar based on improved TOPSIS method[J]. Information Countermeasure Technology, 2023, 2(2): 90-96. (in Chinese)]

一种改进的 TOPSIS 法雷达干扰效果评估

方棉佳^{1*}, 陈朝²

(1. 93209 部队, 北京 100085; 2. 95865 部队, 北京 100073)

摘要 针对标准逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)在雷达干扰效果评估中存在受数据波动影响和对数据规律分析不充分的问题,提出了一种改进的 TOPSIS 法。该方法结合 TOPSIS 法和灰色关联分析理论对原始数据进行分析,并组合 2 种方法的评估结果作为最终的评估结果,弥补了 TOPSIS 法在雷达干扰效果评估中的缺陷,仿真实验验证了该方法的有效性。

关键词 干扰效果评估;标准逼近理想解排序法;灰色关联分析

中图分类号 TN 974

文章编号 2097-163X(2023)02-0090-07

文献标志码 A

DOI 10.12399/j.issn.2097-163x.2023.02.008

Jamming effect evaluation of radar based on an improved TOPSIS method

FANG Mianjia^{1*}, CHEN Zhao²

(1. Unit 93209 of PLA, Beijing 10085, China; 2. Unit 95865 of PLA, Beijing 10073, China)

Abstract Aiming at the problem that the standard technique for order preference by similarity to ideal solution(TOPSIS) method is affected by data fluctuation and insufficient analysis of data law in the jamming effect evaluation of radar, an improved TOPSIS method was proposed. This method combined TOPSIS method and grey correlation analysis theory to analyze the original data, and combined the evaluation results of the two methods as the final evaluation result, which well made up the defects of TOPSIS method in the evaluation of radar jamming effect. Finally, the effectiveness of the proposed method was verified by simulation experiments with the jammer reconnaissance data.

Keywords jamming effect evaluation; technique for order preference by similarity to ideal solution(TOPSIS) method; grey correlation analysis

0 引言

在雷达对抗中,雷达干扰效果评估是判断干扰装备性能的关键技术,它能够根据敌方雷达和我方干扰装备的参数得到当前干扰样式的评估结果,指导干扰决策模块生成最优的干扰策略^[1]。

传统的干扰效果评估技术是以敌方雷达的性能参数作为评价指标,例如,雷达探测目标的最大距离、雷达发现目标的概率等^[2],但是在实际作战环境中,由于雷达方和干扰方属于非合作方,雷达的性能参数难以获取,因而以敌方雷达性能参数为基础的干扰效果评估技术无法应用于真实战场中。

目前国外在相关领域的研究已取得较大的突破。自 2010 年起,美国国防部先后发布了关于“行为学习自适应电子战(behavioral learning for adaptive electronic warfare, BLADE)”项目以及“自适应雷达对抗(adaptive radar countermeasures, ARC)”项目等公告^[3],主要实现了在敌我双方对抗过程中,找出未知的雷达信号,判断该信号的威胁等级,生成并发射对抗信号,最后通过观测雷达行为评估对抗措施的有效性。2020 年,美军公布了《电磁频谱优势战略》,并围绕该战略制定了具体的实施方案^[4]。国内学者为了解决这个问题,提出了基于干扰方的干扰效果评估技术^[5]。该技术主要通过两步实现,一是根据侦察参数构建评估指标集,二是根据指标集选取评估方法。2008 年,李潮等^[6]利用在实施干扰前后,侦察设备接收雷达信号表现出的被干扰信息,分析了雷达在受到干扰后采取的抗干扰措施,以及各种抗干扰措施对侦察参数的影响。2018 年,邢强等^[7]提出干扰方基于支持向量机的雷达在线干扰效果评估方法,并分析了雷达受扰行为及参数变化特点,构建了干扰效果评估知识库。2019 年,耿凯迪^[8]通过分析雷达受扰后行为变化的规律,应用层次分析法和熵权分配法设计了干扰效果在线评估方案。2020 年,雷震烁等^[9-11]分析了雷达受到干扰前后可能采取的行为,对描述雷达受扰行为变化的指标进行了筛选,构建了干扰效果在线评估指标体系,利用支持向量机得到准则层干扰效果评估置信概率,并结合 D-S 证据理论确定了综合评估结果,并验证了所提方法的有效性。2022 年,李瑞等^[12]提出了一种基于逆滤波处理的雷达干扰效果在线评估方法,并设计了针对拖引欺骗干扰的在线评估方案和参数优化方法,并通过仿真验证了方法的可行性和有效性。目前,在基于干扰方的干扰效果评估的应用背景下,可用于评估的参数较少且各参数之间的关系不明显。因此,如何从复杂的侦察参数中挖掘出与干扰效果有关的规律,并最终评估干扰效果是相关研究中的重要问题。

针对上述问题,本文结合灰色关联分析理论对逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)进行改进,解决 TOPSIS 法应用于雷达干扰效果评估中时存在受数据波动影响和对数据规律分析

不充分的问题,提升了传统方法的稳定性。

1 雷达干扰效果评估原理

基于干扰方的雷达干扰效果评估本质上是通过多个指标综合分析的评估问题,其流程如图 1 所示,主要包括指标集和评估方法 2 个部分。

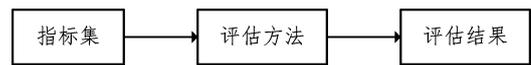


图 1 雷达干扰效果评估流程图

Fig. 1 The flow chart of radar jamming effect evaluation

在评估流程中,首先应选取恰当的指标集来描述雷达的行为。对于干扰方而言,由于无法直接获取雷达的性能参数,导致无法从雷达探测能力等方面实现干扰效果评估。因此,干扰方通常采用侦察中获得的参数来设计干扰效果评估指标。本文采用脉冲重复周期(pulse recurrence interval, PRI)、脉宽(pulse width, PW)、每个相干处理间隔(coherent processing interval, CPI)上的脉冲个数、带宽(band width, BW)和频率捷变范围作为评估指标^[13-14]。

1) PRI。PRI 变化通常反映了雷达获取目标信息的数据率。当雷达处于搜索状态时,由于待搜索的区域较大,并且搜索的目的仅为发现目标,因此需要的数据率较低,反映在侦察参数上就是 PRI 较大。当雷达处于跟踪状态时,由于需要大量精确的目标信息,因此其 PRI 较小。

2) PW。PW 通常受 PRI 的影响而变化。但信号 PW 增大时,发射信号的能量也增大,对目标探测能力增强;当 PW 减小时,发射信号能量较小,对目标的探测能力弱。

3) CPI 的脉冲个数。相干处理间隔指的是雷达用于处理相参的目标回波持续时间。每个 CPI 上的脉冲个数越多,在信号处理中脉冲积累的增益也就越大。

4) BW。BW 通常与雷达的目标分辨力有关,BW 越大,脉压增益越大,分辨力越强;BW 越小,脉压增益越小,分辨力越弱。

5) 频率捷变范围。雷达通常会采用频率捷变的方式进行抗干扰。频率捷变范围越大,雷达抗干扰能力越强;频率捷变范围越小,则抗干扰能力越弱。

综合上述指标,给出干扰效果评估模型,如

图2所示。将干扰后的多组侦察参数作为原始数据,使用干扰效果评估方法对各组数据进行排序打分,实现干扰效果评估。

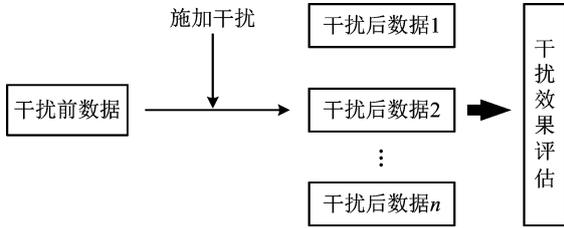


图2 干扰效果评估模型

Fig. 2 The jamming effect evaluation model

2 改进的 TOPSIS 法

2.1 改进 TOPSIS 法的原理

标准的 TOPSIS 法直接使用原始数据来构造决策矩阵,并将各个方案描述为评价空间中的一个点,进而确定正、负理想解,最终通过各个方案与正、负理想解之间的距离关系来进行排序^[15]。

图3为 TOPSIS 法评估的原理示意图,其中 d_1^+ 表示方案 I 与正理想解的距离, d_1^- 表示方案 I 与负理想解的距离。由于标准的 TOPSIS 法直接使用原始数据,因而评估结果体现了一定的客观性。但是,在基于干扰方的雷达干扰效果评估中,雷达具有多种工作状态和多种抗干扰措施,而且干扰方获得的数据非常有限。这会导致用于评估的数据波动较大,没有典型的分布规律。因此,直接使用原始数据难以保证评估结果的准确性。灰色关联分析理论因具有较强的挖掘数据规律的能力而受到普遍关注^[16-19]。在灰色关联分析法中,将各个方案的数据描述为评价空间中的曲线,衡量各方案曲线与参考方案曲线之间的相似度来评价方案的优劣。图4给出了一个灰色关联分析的原理示意图,其中方案 I 曲线为参考曲线。可以看出,方案 II 曲线与参考曲线相似度最高,方案 III 曲线次之,方案 IV 曲线和参考曲线的相似性最差。因此,可以得出方案 II 的评估结果最好,方案 IV 的评估结果最差。

在雷达干扰效果评估中,可以将评估指标集中的各指标看作原始数据,处理后的不同评估指标集看作不同的方案。针对干扰方评估中原始数据少、分布规律不明显的问题,本文提出了一种综合 TOPSIS 法和灰色关联分析法的方

法,实现对干扰效果的评估,具体实施流程如图5所示。

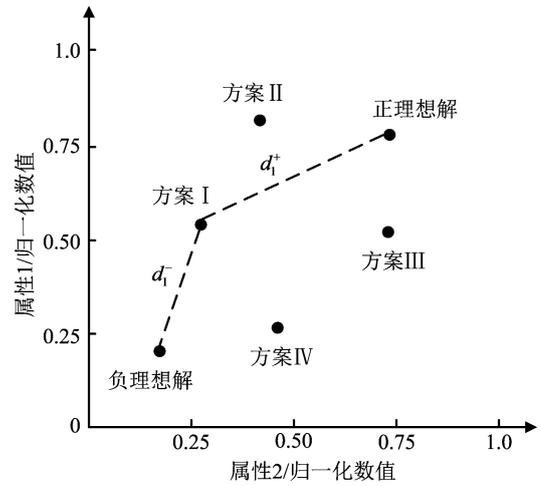


图3 TOPSIS 法原理示意图

Fig. 3 Principle of TOPSIS method

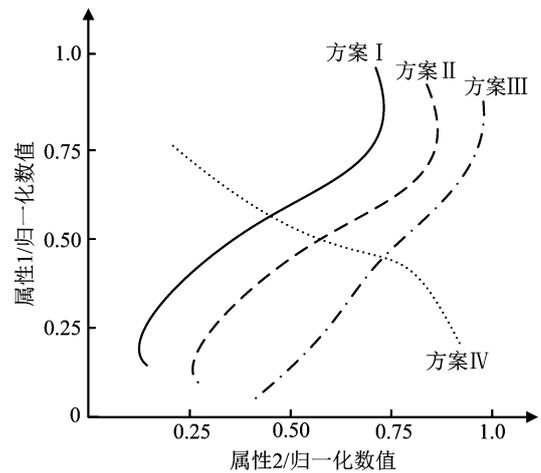


图4 灰色关联分析原理示意图

Fig. 4 Principle of grey correlation analysis

2.2 改进 TOPSIS 法的步骤

步骤1 使用侦察数据建立决策矩阵,记为 $A = (a_{ij})_{m \times n}$,其中, m 表示方案个数, n 表示评价指标个数。

步骤2 采用极差变换法规范化决策矩阵,记为 $B = (b_{ij})_{m \times n}$ 。把用于干扰效果评估的技术指标区分为效益型 T_1 (值越大越好) 和成本型 T_2 (值越小越好)。 T_1 和 T_2 的规范化方式为:

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{a_{ij} - \min_i a_{ij}}{\max_i a_{ij} - \min_i a_{ij}}, & i \in m, j \in T_1 \\ \frac{\max_i a_{ij} - a_{ij}}{\max_i a_{ij} - \min_i a_{ij}}, & i \in m, j \in T_2 \end{cases} \quad (1)$$

步骤3 计算加权规范化决策矩阵

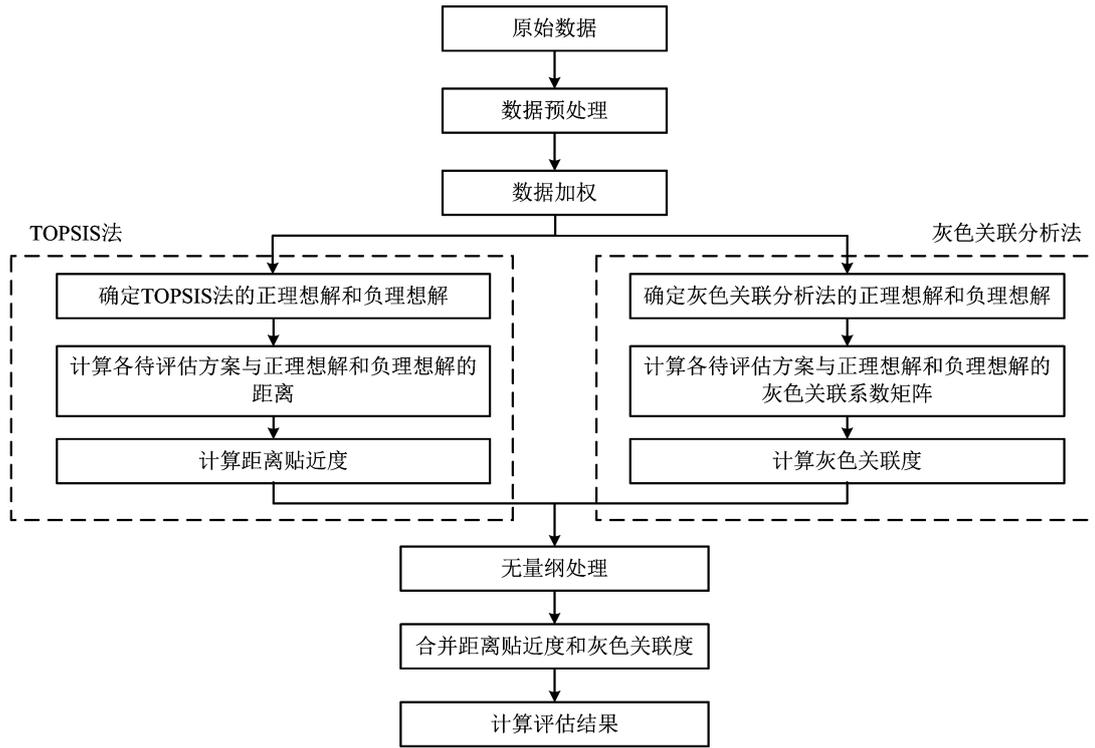


图 5 改进的 TOPSIS 方法流程图

Fig. 5 The flow chart of the improved TOPSIS method

$C = (c_{ij})_{m \times n}$, 且:

$$c_{ij} = \omega_j b_{ij}, \quad i \in m, j \in n \quad (2)$$

式中, ω_j 表示第 j 个指标对应的权重。

步骤 4 确定加权规范化决策矩阵的正理想解 C^+ 和负理想解 C^- , 有:

$$\begin{cases} C^+ = (c_1^+, c_2^+, \dots, c_n^+) \\ C^- = (c_1^-, c_2^-, \dots, c_n^-) \end{cases} \quad (3)$$

步骤 5 计算各方案到正、负理想解的距离 d_i^+ 、 d_i^- , 有:

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (4)$$

步骤 6 确定灰色关联系数矩阵的正理想解 U^+ 和负理想解 U^- , 有:

$$\begin{cases} U^+ = (u_1^+, u_2^+, \dots, u_n^+) \\ U^- = (u_1^-, u_2^-, \dots, u_n^-) \end{cases} \quad (5)$$

步骤 7 计算与 U^+ 、 U^- 的灰色关联系数矩阵 $R^+ = (r_{ij}^+)_{m \times n}$ 和 $R^- = (r_{ij}^-)_{m \times n}$, 有:

$$r_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j |u_j^+ - c_{ij}| + \rho \max_i \max_j |u_j^+ - c_{ij}|}{|u_j^+ - c_{ij}| + \rho \max_i \max_j |u_j^+ - c_{ij}|} \quad (6)$$

$$r_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |u_j^- - c_{ij}| + \rho \max_i \max_j |u_j^- - c_{ij}|}{|u_j^- - c_{ij}| + \rho \max_i \max_j |u_j^- - c_{ij}|} \quad (7)$$

式(6)~(7)中, ρ 为分辨系数, 一般取 $\rho = 0.5$ 。

步骤 8 计算各方案的灰色关联度 r_i^+ 和 r_i^- , 有:

$$\begin{cases} r_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij}^+ \\ r_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij}^- \end{cases} \quad (8)$$

步骤 9 对距离 d_i^+ 、 d_i^- 和关联度 r_i^+ 和 r_i^- 进行无量纲处理, 得到 D_i^+ 、 D_i^- 和 R_i^+ 、 R_i^- 为:

$$\begin{cases} D_i^+ = \frac{d_i^+}{\max_i d_i^+}, \quad D_i^- = \frac{d_i^-}{\max_i d_i^-} \\ R_i^+ = \frac{r_i^+}{\max_i r_i^+}, \quad R_i^- = \frac{r_i^-}{\max_i r_i^-} \end{cases} \quad (9)$$

步骤 10 合并无量纲距离和关联度, D_i^- 和 R_i^+ 越大, 方案越接近正理想解; D_i^+ 和 R_i^- 越大, 方案越接近负理想解, 即:

$$\begin{cases} S_i^+ = \alpha D_i^- + \beta R_i^+ \\ S_i^- = \alpha D_i^+ + \beta R_i^- \end{cases} \quad (10)$$

式中, α 和 β 反映了在决策过程中, 对欧氏距离排序和灰色关联度排序的偏好。

步骤 11 计算方案贴近度, 有:

$$E_i^+ = \frac{S_i^+}{S_i^+ + S_i^-} \quad (11)$$

式中, E_i^+ 表示待评估方案的贴近度, 贴近度越大表明干扰效果越好, 贴近度越小表明干扰效果越差。

3 仿真实验及结果分析

本节通过 2 个仿真实验验证所提改进

TOPSIS 法的有效性。首先根据雷达手册^[20], 构造数据样本, 如表 1 所列。其中, 结果 1~4 为跟踪状态下的侦察结果, 结果 5~8 为搜索状态下的侦察结果。8 种侦察结果对应的干扰效果由分值表示, 分值越小, 干扰效果越差; 分值越大, 干扰效果越好。另外, 根据专家建议, 设置下列各侦察参数指标的权重为:

$$W = [0.45, 0.12, 0.16, 0.12, 0.15] \quad (12)$$

表 1 侦察结果参数表

Tab. 1 Parameter list of reconnaissance results

侦察结果	PRI/ μ s	PW/ μ s	每个 CPI 上的 脉冲数	BW/MHz	频率捷变范围 /MHz	干扰效果
结果 1	51	0.5	20	2	0	1
结果 2	105	3	20	8	100	2
结果 3	312	5	20	10	105	3
结果 4	452	8	20	2	150	4
结果 5	520	200	8	150	0	5
结果 6	806	200	8	280	100	6
结果 7	1 203	200	8	300	105	7
结果 8	2 000	200	8	300	300	8

仿真实验 I 验证在侦察参数不受噪声影响的情况下干扰效果评估的结果。分别使用标准 TOPSIS 法和改进的 TOPSIS 法对表 1 中的指标集进行分析评估, 评估结果如表 2 所列。由仿真结果可知, 改进的 TOPSIS 法和标准 TOPSIS 法的评估结果均与真实干扰效果相同, 验证本文提出方法的有效性。

表 2 无噪声影响干扰效果评估结果(仿真实验 I)

Tab. 2 Evaluation results of jamming effect without noise influence

侦察结果	TOPSIS 法	本文方法	干扰效果
结果 1	1	1	1
结果 2	2	2	2
结果 3	3	3	3
结果 4	4	4	4
结果 5	5	5	5
结果 6	6	6	6
结果 7	7	7	7
结果 8	8	8	8

仿真实验 II 在上述实验的基础上, 进一步验证了受噪声影响时的干扰效果评估。对原始数据分别增加相对误差水平为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 的随机噪声, 实验结果如表 3 所列。由实验结果可知, 在 $d=0.1$ 时, 标准 TOPSIS 法与本文所提方法均能准确完成干扰效果评估, 对侦察结果 1~8 的评估分值与真实分值一致。在 $d=0.2$ 时, 标准 TOPSIS 法对侦察结果 4 和 5 的评估结果出现错误, 而本文所提方法仍能正确评估打分。随着噪声影响的增加, 即 $d=0.3$ 与 $d=0.4$ 时, 标准 TOPSIS 法评估结果出现了更多的错误, 而本文所提方法仍能准确评估。

对上述仿真实验进行综合分析可知, 本文所提方法由于结合了灰色关联分析理论, 使得改进后的 TOPSIS 法在原始数据在受到污染、出现侦察误差时仍能正确评估干扰效果。究其原因标准 TOPSIS 法使用欧氏距离衡量待评估方案的优劣, 而当原始数据受到污染时, 其正理想与负理想解会被异常值影响, 最终导致整体排序结果受到影响。而灰色关联分析理论将原始数据视为空间中的曲线, 并通过曲线的关联性进行排

序,即使受到噪声影响,在整体变化趋势上则变化较小,因此仍然可以准确评估。

表 3 有噪声影响下干扰效果评估结果(仿真实验 II)

Tab. 3 Evaluation result of jamming effect with noise

侦查结果	TOPSIS 法				本文方法			
	$d=0.1$	$d=0.2$	$d=0.3$	$d=0.4$	$d=0.1$	$d=0.2$	$d=0.3$	$d=0.4$
结果 1	1	1	1	1	1	1	1	1
结果 2	2	2	2	2	2	2	2	2
结果 3	3	3	5	5	3	3	3	3
结果 4	4	5	3	3	4	4	4	4
结果 5	5	4	4	4	5	5	5	5
结果 6	6	6	6	7	6	6	6	6
结果 7	7	7	7	6	7	7	7	7
结果 8	8	8	8	8	8	8	8	8

4 结束语

本文研究了基于干扰方的雷达干扰效果评估问题,提出了一种改进的 TOPSIS 法。该方法针对基于干扰方的雷达效果评估中存在数据获取困难和数据与评估结果关系复杂的问题,通过结合使用灰色关联分析理论,提高了算法挖掘原始侦察数据内部规律的能力和算法稳定性。仿真结果表明,本文提出的方法可以实现干扰效果评估,并且在受噪声影响的情况下,比标准 TOPSIS 法的评估准确性更高。

参 考 文 献

- [1] 张春磊,杨小牛. 认知电子战与认知电子战系统研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(6): 551-555.
ZHANG Chunlei, YANG Xiaoniu. Research on the cognitive electronic warfare and cognitive electronic warfare system[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2014, 9(6): 551-555. (in Chinese)
- [2] 冉小辉,朱卫纲,邢强. 电子对抗干扰效果评估技术现状[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(8): 117-121.
RAN Xiaohui, ZHU Weigang, XING Qiang. Review of electronic countermeasures jamming effectiveness evaluation[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(8): 117-121. (in Chinese)
- [3] 周波,戴幻尧,乔会东,等. 从美军 ARC 项目看雷达电子战发展趋势[J]. 飞航导弹, 2015(2): 56-60.
ZHOU Bo, DAI Huanyao, QIAO Huidong, et al. The development trend of radar electronic warfare from the ARC project of US Army[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2015(2): 56-60. (in Chinese)
- [4] 王晓东,朱松. 2021 年外军电磁频谱作战发展综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(4): 347-350.
WANG Xiaodong, ZHU Song. Review on the development of electromagnetic spectrum operations of foreign forces in 2021[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2022, 17(4): 347-350. (in Chinese)
- [5] 赵耀东,徐旺. 一种基于雷达状态变化的干扰效果在线评估方法[J]. 电子信息对抗技术, 2016, 31(3): 42-46.
ZHAO Yaodong, XU Wang. A method of real-time electronic attack effectiveness evaluation based on state transition of radar[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2016, 31(3): 42-46. (in Chinese)
- [6] 李潮,周金泉. 基于干扰方的干扰效果评估研究[J]. 电子信息对抗技术, 2008, 23(2): 46-49.
LI Chao, ZHOU Jinquan. Jamming effectiveness evaluation from the jamming side[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2008, 23(2): 46-49. (in Chinese)
- [7] 邢强,贾鑫,朱卫纲,等. 基于干扰方的雷达在线干扰效果评估[J]. 电子信息对抗技术, 2018, 33(6): 57-62.
XING Qiang, JIA Xin, ZHU Weigang, et al. Radar online jamming effect evaluation based on jamming side[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2018, 33(6): 57-62. (in Chinese)
- [8] 耿凯迪. 雷达干扰效果在线评估技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.

- GENG Kaidi. Research on the online effectiveness evaluation of radar jamming[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [9] 雷震烁, 刘松涛, 陈奇. 基于 SVM-DS 融合的干扰效果在线评估方法[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(3): 92-98.
LEI Zhenshuo, LIU Songtao, CHEN Qi. An online jamming effect evaluation method based on SVM-DS fusion[J]. Journal of Detection & Control, 2020, 42(3): 92-98. (in Chinese)
- [10] 雷震烁, 刘松涛, 葛杨, 等. 干扰效果在线评估参数筛选与特征表示方法[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(12): 2755-2760.
LEI Zhenshuo, LIU Songtao, GE Yang, et al. Parameter selection and feature representation method of jamming effect online evaluation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(12): 2755-2760. (in Chinese)
- [11] 雷震烁, 刘松涛, 葛杨, 等. 雷达干扰效果在线评估指标体系与方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(7): 691-697.
LEI Zhenshuo, LIU Songtao, GE Yang, et al. Online evaluation index system and method for jamming effect of radar[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(7): 691-697. (in Chinese)
- [12] 李瑞, 朱梦韬, 李云杰. 基于滤波处理的雷达干扰效果在线评估方法[J/OL]. (2022-08-08) [2022-10-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20220808.1711.006.html>.
- [13] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2014.
DING Lufei, GENG Fulu, CHEN Jianchun. Radar principles[M]. 5th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014. (in Chinese)
- [14] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
ZHAO Guoqing. Principles of radar countermeasures[M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2012. (in Chinese)
- [15] 虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述[J]. 统计与决策, 2004(11): 119-121.
YU Xiaofen, Fu Dai. Summarizeon multi-index comprehensive evaluation method[J]. Statistics and Decision, 2004(11): 119-121. (in Chinese)
- [16] 兰俊杰, 陈蓓, 王冰切, 等. 对组网雷达的分布式干扰效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(9): 195-198.
LAN Junjie, CHEN Bei, WANG Bingqie, et al. Effectiveness evaluation of distributed jamming on netted radar[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(9): 195-198. (in Chinese)
- [17] 师俊朋, 胡国平, 李涛. 基于改进灰色关联算法的雷达反隐身能力评估[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(3): 116-121.
SHI Junpeng, HU Guoping, LI Tao. Evaluation of anti-stealth ability of radar on improved grey correlation algorithm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(3): 116-121. (in Chinese)
- [18] 孙晓东, 焦玥, 胡劲松. 基于灰色关联度和理想解法的决策方法研究[J]. 中国管理科学, 2005, 13(4): 63-68.
SUN Xiaodong, JIAO Yue, HU Jinsong. Research on decision-making method based on gray correlation degree and TOPSIS[J]. Chinese Journal of Management Science, 2005, 13(4): 63-68. (in Chinese)
- [19] 孙晓东. 基于灰色关联分析的几种决策方法及其应用[D]. 青岛: 青岛大学, 2006.
SUN Xiaodong. Several decision-making methods based on gray correlation analysis and their applications[D]. Qingdao: Qingdao University, 2006. (in Chinese)
- [20] 斯科尼克. 雷达手册[M]. 王军, 林强, 米慈中, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2010.
SKOLNIK M I. Radar handbook[M]. Translated by WANG J, LIN Q, MI C Z. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)

作者简介

方棉佳

男, 1978 年生, 高级工程师, 研究方向为干扰效能评估、电子对抗技术
E-mail: fmj7241@163.com



陈朝

男, 1980 年生, 高级工程师, 研究方向为电子对抗技术
E-mail: chenz221@163.com



责任编辑 安蓓