

· 抗干扰专题 ·

DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2021.08.006

# 基于性能评估的雷达抗干扰研究

武亚涛, 魏耀\*, 范鹏飞, 郝明

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

**摘要:**客观定量地评估雷达抗干扰性能是系统评估雷达抗干扰能力的关键,也可以为优化雷达抗干扰措施提供参考。文中建立了适用于实时评估抗干扰性能的指标体系,采用层次分析法确定了各指标的权重,构建了一套评估系统并给出实时评估结果,实现了抗干扰性能评估与措施优化迭代。通过实例定量地评估了抗干扰性能,科学地优化了抗干扰措施,实现了抗干扰性能的提升。

**关键词:**雷达抗干扰;性能评估;层次分析法

中图分类号:TN974 文献标志码:A 文章编号:1004-7859(2021)08-0036-05

引用格式:武亚涛, 魏耀, 范鹏飞, 等. 基于性能评估的雷达抗干扰研究[J]. 现代雷达, 2021, 43(8): 36-40.

WU Yatao, WEI Yao, FAN Pengfei, et al. A study on radar anti-jamming based on effectiveness evaluation[J]. Modern Radar, 2021, 43(8): 36-40.

## A Study on Radar Anti-jamming Based on Effectiveness Evaluation

WU Yatao, WEI Yao\*, FAN Pengfei, HAO Ming

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

**Abstract:** Evaluating anti-jamming performance objectively and quantitatively is the key to systematically evaluate the anti-jamming ability of radar, which can also provide a reference for optimizing the anti-jamming measures. An index system suitable for real-time anti-jamming effectiveness evaluation is established, and the weight of each index is determined by analytic hierarchy process. An evaluation system is constructed and real-time evaluation results are given. The anti-jamming effectiveness evaluation and iteration of measures are realized. The example result shows that the effectiveness can be evaluated quantitatively, the measures can be optimized scientifically, and the improvement of anti-jamming performance can be achieved.

**Key words:** radar anti-jamming; effectiveness evaluation; analytic hierarchy process

## 0 引言

在电磁频谱作战概念不断发展的时代背景下,雷达对抗与反对抗已然成为战争常态。当前,雷达面临的电磁环境日益复杂,抗干扰成为现代雷达的必备技能,在智能化发展的大背景下,干扰与雷达的博弈对抗愈演愈烈,抗干扰性能的快速自提升更是成为雷达在未来战场中发挥效能的关键因素<sup>[1-2]</sup>。

雷达抗干扰性能评估是科学评价雷达抗干扰能力的一种手段,同时也是评价干扰机干扰能力的一种有效途径。近年来,专家学者对防空导弹雷达、导引头雷达、机载雷达、分布式雷达等多种体制雷达抗干扰性能评估进行了针对性研究,提出了合适的评价指标体系及其约简方法,并采用了层次分析法、模糊综合评判法、神经网络法等方法对雷达抗干扰性能进行评

价<sup>[3-12]</sup>。但是,现有的研究成果主要集中于评估指标体系和评估方法的建立,较少考虑性能评估在雷达工作过程中可能发挥的作用。

本文以雷达抗干扰性能评估为出发点,建立了合理有效的评估指标,给出了综合评估方法,通过构建评估系统实现了雷达抗干扰性能的实时评估,并结合评估结果对雷达抗干扰措施进行了优化,实现了雷达抗干扰性能的提升,为雷达在与干扰进行博弈对抗中夺取优势地位提供指导。

## 1 评估指标构建

雷达抗干扰评估指标可在不同维度上进行针对性设计,从某个方面对雷达抗干扰性能进行有效评估。如图1所示,干扰区域、自卫距离等七项评估指标在特定干扰场景下可用于雷达抗干扰性能评估,但这些指标的定义主要是对比雷达采用抗干扰措施前和采用抗

干扰措施后的性能。为了实现雷达实时抗干扰性能评估, 需要对比前后两种措施两个状态下的抗干扰性能, 图1列举的七项指标不太合适, 尚需进一步设计有效指标。

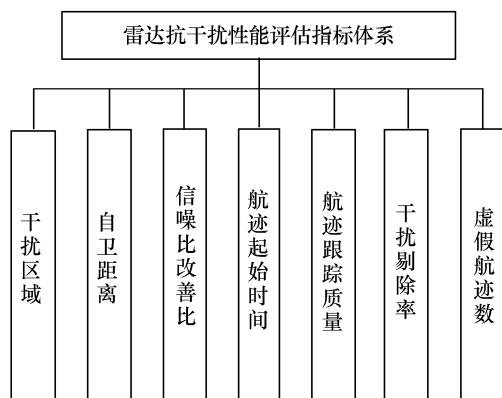


图1 指标体系

抗干扰性能评估指标的选取需要遵循完备性、独立性和可用性原则。完备性要求多层次、多方面选取评估指标; 独立性要求评估指标减少交叉, 彼此独立性强; 可用性要求尽可能定量描述评估指标, 便于计算和测量。在评估指标设计时, 主要参考功率准则、信息准则、效率准则、概率准则等准则<sup>[13]</sup>。

一般可将常见雷达干扰类型划分为压制干扰和欺骗干扰两类。鉴于压制干扰采用噪声遮盖目标信号、破坏其被检测和参数测量的特点, 采用功率准则对其进行评估。欺骗干扰采用虚假目标及信息作用于雷达的目标检测和跟踪系统, 使雷达不能正确检测真实目标或者不能正确测量真实目标参数, 针对该特点, 采用概率准则进行评估。

针对压制干扰和欺骗干扰特点, 设计干扰强度改善因子、抗干扰改善因子、受干扰频率和剩余虚警率四项核心指标, 用于实时抗干扰性能评估。

### 1) 干扰强度改善因子

雷达受干扰强度定义为雷达在干扰主瓣方向遭受到的干扰强度大小。雷达受干扰强度本身并不能说明雷达抗干扰措施的有效性, 但雷达抗干扰措施调整前后的雷达受干扰强度的变化可用于评价当前措施调整的有效性, 故定义干扰强度改善因子为雷达抗干扰措施调整后与雷达抗干扰措施调整前的受干扰强度的比值。

$$E_1 = \frac{J_{\text{new}}}{J_{\text{old}}} \quad (1)$$

式中:  $J_{\text{old}}$  和  $J_{\text{new}}$  分别为抗干扰措施调整前后两个状态下的雷达受干扰强度。

压制干扰为具有一定带宽的连续波噪声, 宽带压制干扰通常覆盖较大带宽, 可同时干扰宽频带内的多部雷达, 但干扰功率小; 窄带压制干扰通过瞄准雷达带宽释放窄带干扰来提高干扰功率, 但不能同时干扰不同频带的多部雷达。频率捷变、频率分集等措施可躲避或减弱压制干扰的能量输入, 可通过干扰强度改善因子来评估雷达抗干扰性能。

### 2) 抗干扰改善因子

抗干扰改善因子是美国学者 JOHNSTON S L<sup>[14]</sup> 于1974年提出的抗干扰性能评估指标, 定义为雷达采用抗干扰措施后系统输出信干比与不采用抗干扰措施时系统输出信干比的比值。该指标适用于性能测试中已知目标信噪比的情况, 但实际雷达在干扰对抗过程中目标作为被探测对象, 其信噪比事先未知, 故抗干扰改善因子在实际使用中并不合适。采用一种更为简单实用的评估方法, 即计算干扰抑制比用于抗干扰性能评估。

$$E_2 = \frac{(J/N)_i}{(J/N)} \quad (2)$$

式中:  $(J/N)_i$  和  $(J/N)$  分别为干扰抑制前和干扰抑制后的干扰噪声比。

### 3) 受干扰频率

受干扰频率定义为一个探测周期内雷达受干扰次数占总的探测次数的比例。雷达采用诱骗、低截获波形、变重频等抗干扰措施可能降低电子战装备侦测雷达信号的难度, 从而降低雷达接收干扰的频率。因此, 将受干扰频率作为评估雷达抗欺骗干扰性能的一种有效指标。

$$E_3 = \frac{n_{\text{jam}}}{n_{\text{total}}} \quad (3)$$

式中:  $n_{\text{jam}}$  和  $n_{\text{total}}$  分别为雷达受干扰计数与雷达总的探测计数。

### 4) 剩余虚警率

剩余虚警率定义为当前一个周期点迹数目与历史无干扰环境一个周期点迹数目的比值。欺骗干扰会在雷达画面上产生大量虚假目标, 雷达可针对性地抑制虚假目标, 故剩余虚警率可用于评估雷达对抗欺骗干扰的性能。

$$E_4 = \frac{m_{\text{anti-jam}}}{m_{\text{nojam}}} \quad (4)$$

式中: $m_{\text{anti-jam}}$  和  $m_{\text{nojam}}$  分别为当前周期点迹数目与无干扰环境下点迹数目。

## 2 评估权重确定

如果仅采用单一的评估指标对雷达抗干扰性能进行评价,难免存在片面性和局限性。将多项指标综合考虑起来,采用加权法进行综合评价,即

$$Q = \sum_{i=1}^n \omega_i E_i \quad (5)$$

式中: $\omega_i$  为加权系数,反映了各个指标的重要性。

加权系数采用层次分析法(AHP)确定,该方法是一种定性定量相结合的多准则决策方法,基本思想是将复杂问题分解为各个组成因素,按照支配关系分组形成一个有序的递进层次结构,通过两两比较的方式确定同一层次中各个元素相对重要性的总排序,最后求出各个指标的加权系数<sup>[15]</sup>。

构造两两比较判断矩阵

$$\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times n} \quad (6)$$

矩阵中的元素表示评估指标两两之间相对重要性的比较,采用1~9标度方法给出数量标度,一般根据专家的意见和系统分析人员的经验确定。

将判断矩阵按列归一化,即

$$(\bar{a}_{ij})_{n \times n} = \left[ \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \right]_{n \times n} \quad (7)$$

按行加总

$$\bar{\omega}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \quad (8)$$

再归一化后即得各个指标的加权系数

$$\omega_i = \frac{\bar{\omega}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{\omega}_j} \quad (9)$$

## 3 模拟验证

抗干扰性能指标是否客观有效,是否能够指导雷达抗干扰措施优化并实现抗干扰能力提升,需要进行

有效性检验。本文构建了一套抗干扰性能评估系统,在外场通过一部雷达和一部干扰机搭建了对抗试验平台,结合远距离支援干扰、近距离支援干扰、随队掩护干扰和自卫干扰等典型试验场景进行模拟试验验证。抗干扰处理集成了多种手段,如表1所示。这些手段针对压制干扰和欺骗干扰进行对抗。

表1 抗干扰措施集

干扰类型	抗干扰措施
压制	频率捷变
	频率分集
	干扰对消
	诱骗
欺骗	低截获波形
	宽限窄
	变重频

模拟场景:一个远距离支援干扰机,施放压制干扰,具备实时测频和调整压制干扰带宽的能力。如图2所示,雷达事先无抗干扰措施,干扰强度约56 dB;雷达采取了频率捷变措施后,干扰强度下降至41 dB左右;雷达采取了频率分集措施后,干扰强度约50 dB。

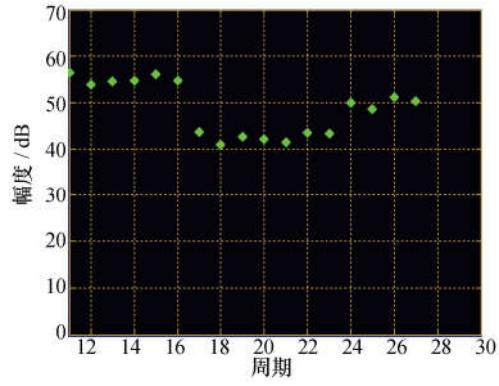


图2 干扰强度

如表2所示,针对压制干扰,雷达在对抗干扰时不断迭代措施,采用一系列抗干扰措施并进行了相应的性能评估。当采用频率捷变和干扰对消相结合的措施时,抗干扰性能达到95分,取得了最佳对抗效果。

表2 压制干扰对抗结果

评分	类型	频率捷变	频率分集	干扰对消	诱骗	低截获波形	宽限窄	变重频
82	压制			■				
95	压制	■			■			
88	压制			■	■			
95	压制	■			■			

模拟场景:一个自卫干扰机,施放欺骗干扰,具备侦察雷达信号和数字存储转发的能力。如图3所示,

雷达事先无抗干扰措施, 受干扰频率接近 100%; 雷达采取了变重频措施后, 受干扰频率变化不大; 雷达采取了诱骗措施后, 受干扰频率下降至 60%。

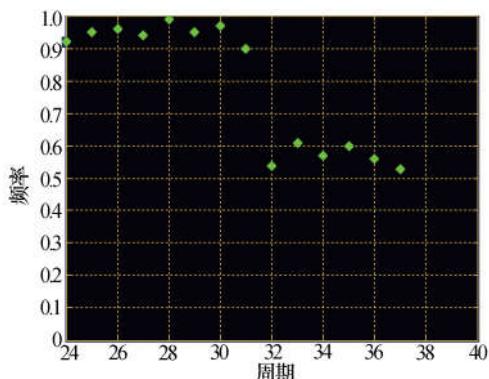


图 3 受干扰概率

如表 3 所示, 针对欺骗干扰, 雷达在采用宽限窄措施后, 获得了 86 分, 增加变重频措施后, 干扰响应没有明显变化, 但低截获波形和诱骗措施的加入, 降低了干扰机截获概率, 雷达抗干扰性能获得了提升。

表 3 欺骗干扰对抗结果

评分	类型	频率捷变	频率分集	干扰对消	诱骗	低截获波形	宽限窄	变重频
86	欺骗					■		
86	欺骗					■	■	
89	欺骗				■	■	■	
96	欺骗			■		■	■	

#### 4 结束语

本文研究了雷达抗干扰性能评估及其在抗干扰措施优化设计中的应用。瞄准雷达抗干扰能力建设, 建立了有效的评估指标和评价模型。构建了抗干扰性能评估系统, 通过两个试验场景模拟了雷达干扰场景以及抗干扰处理过程, 对雷达抗干扰性能进行了有效评估, 并基于评估结果对多种雷达抗干扰措施的效果进行了评价。基于实时抗干扰性能评估的研究能够指导雷达抗干扰设计优化, 有效支撑雷达在与干扰博弈对抗的过程中快速夺取优势地位, 因而该研究具有很高的工程应用参考价值。

#### 参 考 文 献

- [1] 王明宇. 基于博弈思维的雷达智能探测概念与研究思路 [J]. 现代雷达, 2019, 41(10): 1–7.  
WANG Mingyu. Radar intelligent measure based on game theory: conception and methods[J]. Modern Radar, 2019,
- 41(10): 1–7.
- [2] 王沙飞, 鲍雁飞, 李岩. 认知电子战体系结构与技术 [J]. 中国科学: 信息科学, 2008, 48(12): 1603–1613.  
WANG Shafei, BAO Yanfei, LI Yan. The architecture and technology of cognitive electronic warfare[J]. Scientia Sinica Informationis, 2018, 48(12): 1603–1613.
- [3] FOGLIA G, MARCANTONI D, TROTTA F, et al. ECM counteracting SLB: analysis and effectiveness evaluation [C]// Proceedings of 2008 IEEE Radar Conference. Rome: IEEE Press, 2008: 1–6.
- [4] CAO X D, FAN H T, WU X L. ECCM performance analysis of inter-pulses frequency agility application [C]// Proceedings of 2011 CIE International Conference on Radar. Chengdu: IEEE Press, 2011: 222–225.
- [5] 谢泽峰, 罗华锋. 舰空导弹导引头抗干扰性能综合评估方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2020, 40(1): 152–156.  
XIE Zefeng, LUO Huafeng. Research on comprehensive evaluation method of anti-jamming index for ship-to-air missile seeker[J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(1): 152–156.
- [6] 王冲, 张永顺, 郑海. 机载雷达抗干扰评估试验方法研究 [J]. 现代雷达, 2007, 29(6): 23–24.  
WANG Chong, ZHANG Yongshun, ZHENG Hai. Research on anti-jamming evaluation test method of airborne radar [J]. Modern Radar, 2007, 29(6): 23–24.
- [7] 何俊, 李淑华, 周之平, 等. 基于博奕论和灰色关联分析的雷达抗干扰评估 [J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(12): 119–122.  
HE Jun, LI Shuhua, ZHOU Zhiping, et al. Evaluation of radar anti-jamming ability based on game theory and grey relation analysis[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(12): 119–122.
- [8] 闫永玲, 张庆波, 童创明. 改进 ADC 法在防空导弹雷达抗干扰评估中的应用 [J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(10): 63–67.  
YAN Yongling, ZHANG Qingbo, TONG Chuangming. Application of improved method of ADC on effectiveness evaluation of air defense missile radar anti-jamming[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(10): 63–67.
- [9] 张建军, 曲宏宇, 赵栋华. 基于神经网络的雷达抗干扰效能评估方法 [J]. 海军航空工程学院学报, 2015, 30(1): 28–32.  
ZHANG Jianjun, QU Hongyu, ZHAO Donghua. Evaluation

- method for performance of radar ECCM based on neural network [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2015, 30(1): 28–32.
- [10] 肖振民,代培龙,沈伟,等.基于AHP的分布式雷达抗干扰效能评估方法[J].现代雷达,2017,39(1): 77–83.  
XIAO Zhenmin, DAI Peilong, SHEN Wei, et al. Method of anti-jamming effectiveness evaluation for distributed radar based on AHP[J]. Modern Radar, 2017, 39(1): 77–83.
- [11] 周永恒,崔少辉,方丹.红外成像导引头抗干扰评估指标体系构建[J].现代防御技术,2019,47(3): 175–180.  
ZHOU Yongheng, CUI Shaohui, FANG Dan. Construction of antijamming performance index system of infrared imaging seeker[J]. Modern Defence Technology, 2019, 47(3): 175–180.
- [12] 杨远志,王星,陈游,等.主动雷达导引头干扰效能评估指标体系的构建与约简[J].现代雷达,2016,38(8): 7–12.  
YANG Yuanzhi, WANG Xing, CHEN You, et al. Construction and reduction of active radar seeker jamming effectiveness evaluation index system[J]. Modern Radar, 2016, 38(8): 7–12.
- [13] 周万幸.雷达抗干扰效能评估模型与指标体系研究[J].现代雷达,2013,35(11): 1–5.  
ZHOU Wanxing. A study on model and index system of radar anti-jamming effectiveness[J]. Modern Radar, 2013, 35(11): 1–5.
- [14] JOHNSTON S L. ECCM improvement factors (EIF)[J]. Electronic Warfare Magazine, 1974(3): 41–45.
- [15] 杜龙飞.雷达系统抗干扰效能评估方法的研究[D].成都:电子科技大学,2015.  
DU Longfei. Research on the anti-jamming effectiveness evaluation methods of radar system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.

### 作者简介:

- 武亚涛 男,1986年生,博士,高级工程师,研究方向为雷达信号处理、雷达抗干扰;
- 魏耀 男,1986年生,博士,高级工程师,研究方向为雷达信号处理、雷达抗干扰;
- 范鹏飞 男,1991年生,博士,工程师,研究方向为雷达信号处理、雷达抗干扰;
- 郝明 男,1971年生,硕士,研究员级高级工程师,研究方向为雷达信号处理、雷达抗干扰。