

基于改进 ADC 模型的反导预警雷达作战效能评估

盖美庆^{1,2}, 闫世强¹, 马 梁¹, 王大众², 杨大伟², 李文杰¹

(1. 空军预警学院 空天预警系, 武汉 430019; 2. 解放军 94326 部队, 济南 250023)

摘要:反弹道导弹早期预警雷达(EWR)在防空反导作战体系中发挥越来越重要的作用,对其进行作战效能评估具有重要的战略意义。文中试着站在反导战略预警体系的高度,从反导作战使命出发,根据装备作战运用实际,建立了反弹道导弹 EWR 作战效能评估指标体系;结合理论分析和工作实际,提出一种改进的反弹道导弹预警雷达 ADC 效能评估模型;最后通过算例数据分析,论证了改进的 ADC 模型从一定程度上客观评估了雷达的作战效能,为雷达装备作战运用提供了一定依据。

关键词:ADC 模型;弹道导弹早期预警雷达;效能评估

中图分类号:TN972 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-7859(2020)03-0020-05

引用格式:盖美庆, 闫世强, 马 梁, 等. 基于改进 ADC 模型的反导预警雷达作战效能评估[J]. 现代雷达, 2020, 42(3): 20-24.

GAI Meiqing, YAN Shiqiang, MA Liang, et al. Operational effectiveness evaluation of anti-ballistic-missile EWR based on improved ADC model[J]. Modern Radar, 2020, 42(3): 20-24.

Operational Effectiveness Evaluation of Anti-ballistic-missile EWR Based on Improved ADC Model

GAI Meiqing^{1,2}, YAN Shiqiang¹, MA Liang¹, WANG Dazhong², YANG Dawei², LI Wenjie¹

(1. Department of Aerospace Early Warning, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

(2. The Unit 94326 of PLA, Jinan 250023, China)

Abstract:The early warning radar of anti-ballistic missile is playing an increasingly important role in the combat system of air defense and anti-missile. Trying to stand in the height of the anti-missile strategic early warning system, starting from the anti-missile combat mission, the anti-ballistic missile early warning radar operational effectiveness evaluation index system is established according to the actual equipment operational use. Combining with theoretical analysis and the actual working experience, an improved anti-ballistic missile early warning radar ADC effectiveness evaluation model is put forward. To a certain extent, the operational effectiveness of radar is objectively evaluated by analyzing an example of the improved ADC model. A certain basis for the operational application of radar equipment is provided.

Key words:ADC model; anti-ballistic-missile early warning radar(EWR); effectiveness evaluation

0 引 言

战略预警体系是国家空天防御体系的重要组成部分,直接支持战略决策和作战行动^[1]。防空预警雷达作为情报、监视和侦察过程中的主要探测装备,在战略预警体系中发挥着不可替代的作用。现代体制雷达必须能够应对弹道导弹、巡航导弹、高超音速滑翔飞行器等目标所带来的威胁,尽可能地为防空反导系统(AMD)提供精准的坐标位置信息,为目标拦截打下良好基础。研制新程式、高性能的防空反导雷达是战略预警体系装备系统的重要发展方向。效能是武器开发

和武器使用所追求的总体目标^[2]。对于雷达建设甚至国防建设的现实意义,对防空作战中起重要作用的反导早期预警雷达(EWR)的效能分析是十分重要的。考虑到影响武器装备作战效能的因素具有动态性,本文分析了影响 EWR 作战效能的主要因素,结合美国武器系统效能咨询委员会(WSEIAC)性能模型,评估了 EWR 的作战效能。

1 效能评估 WSEIAC 模型

WSEIAC 在 20 世纪 60 年代中期提出 ADC 效能评估模型,ADC 模型是武器装备系统效能评估中被广泛认可的权威性模型^[3-6]。根据系统的可用性、可靠性和能力来研究武器系统性能。系统效能的表达式可表示为

基金项目:国家自然科学基金项目(11805278);国家自然科学基金项目(61602506)

通信作者:盖美庆 Email:0512100124@163.com

收稿日期:2019-11-24 修订日期:2020-01-20

$$E = ADC \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A}=(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)$ 是 $1 \times n$ 维向量,表示度量任务执行开始时系统的状态; a_i 是起始时刻系统处于状态 i 的概率, $\sum_{i=1}^n a_i = 1$;可信度矩阵 $\mathbf{D}=(d_{ij})_{n \times n}$ 为 $n \times n$ 维的矩阵,在已知系统的起始状态的情况下,在执行任务期间的一个或多个时刻系统所处状态的度量,其中, $\sum_{j=1}^n d_{ij} = 1$;矩阵 $\mathbf{C}=(c_{ij})_{n \times n}$ 是能力矩阵,它是在已知系统处于执行任务的过程中,系统完成该项任务的能力的度量, c_{ij} 为系统的处于有效状态 i 条件下第 j 个品质因子值。某 EWR 装备系统的效能评估指标体系如图 1 所示。

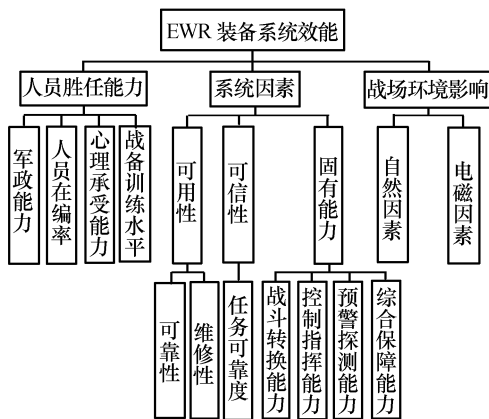


图 1 EWR 装备系统效能评估体系

2 EWR 装备系统效能评估指标体系建立

EWR 装备系统战斗力是系统固有能力和用户和战场环境的综合作用的结果。结合 EWR 战斗力评估实际,引入人员胜任能力 \mathbf{M} 和战场环境影响因子 $R^{[7]}$ 。改进的 EWR 战斗力评估模型表达式为

$$E = MADC(1 - R) \quad (2)$$

2.1 系统可用性向量 \mathbf{A}

当在战场环境中执行战斗任务使用装备时,武器装备根据任务的需要进入相关战斗状态的概率叫做武器系统的可用性。可用性向量 \mathbf{A} 是系统开始执行作战任务时处于可能状态的概率的所有情况组合。当雷达系统需要执行作战任务时,状态可分为正常状态和故障状态。可用性向量 \mathbf{A} 有两种情况: $\mathbf{A}=(a_1, a_2)$,在雷达系统启动作战任务时,雷达处于可用状态的概率用 a_1 表示,在雷达系统启动作战任务时,雷达处于不可用状态的概率用 a_2 表示^[8-9]。

$$\begin{cases} a_1 = MTBF / (MTBF + MTTR) \\ a_2 = MTTR / (MTBF + MTTR) \end{cases} \quad (3)$$

式中:雷达的无故障工作时间用 $MTBF$ 表示;雷达的平

均故障修复时间用 $MTTR$ 表示。

2.2 可信度矩阵 \mathbf{D}

可信度矩阵 \mathbf{D} 是系统在任务完成时进入或处于任何有效状态的概率,并且与系统故障率、系统修复率和遂行作战任务所需的平均时间有关。根据雷达装备系统处于正常和故障状态不同情况,系统可信度矩阵是 $\mathbf{D}=(d_{ij})_{2 \times 2}$,雷达在遂行作战任务时,从状态 i 转换到状态 j 的概率用 d_{ij} 表示。假设雷达的各分系统的故障和修复时间为指数分布,雷达故障率为 λ ,雷达修复率 μ ,雷达系统遂行作战任务的平均时间用 T 表示,那么

$$\begin{cases} d_{11} = e^{-\lambda T} \\ d_{12} = 1 - e^{-\lambda T} \\ d_{21} = e^{-\mu T} \\ d_{22} = 1 - e^{-\mu T} \end{cases} \quad (4)$$

分别表示雷达由正常工作状态转向正常工作状态,雷达由正常工作状态转向故障工作状态,雷达由故障工作状态转向正常工作状态,雷达由故障工作状态转向故障工作状态。

2.3 能力向量 \mathbf{C}

雷达系统在每个正常可用状态下拥有的能力称为固有能力和向量 \mathbf{C} ,指的是在已知系统在执行任务时,当前状态条件下能够达到完成目标任务的向量。在遂行作战任务时,雷达系统只处于两种模式:正常工作状态和故障状态,此时可用 $\mathbf{C}=(c_1, c_2)$ 表示能力向量 \mathbf{C} 。当雷达系统处于故障状态时,假定故障不能及时修复,此时雷达系统所拥有的能力认为是零,可表示为 $c_2=0$ 。文献[10]中对天波雷达能力的分解,得出在正常条件下系统的能力主要由以下能力指标决定,如图 2 所示。

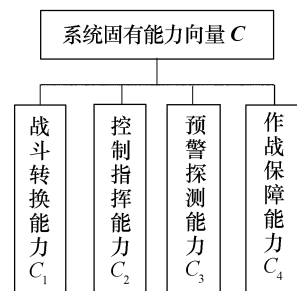


图 2 系统固有能力和示意图

(1) 战斗转换能力 C_1

战斗转换能力意味着作战单位可以完成战斗等级转换,完成各种设施和设备的状态转换,并在指定时间内有效处理各种突发事件。尤其是雷达由常规模式转

换到空间模式时更需要转换时间迅速,因为通常导弹飞行速度快,战机转瞬即逝,这对指挥人员以及操作人员能力素质提出了更高的要求。

(2)控制指挥能力 C_2

控制指挥能力意味着在接到战斗任务后,各级指挥人员和操作人员可以准确地判断敌情、我情和战场环境。各级指挥人员积极组织策划针对本次任务的作战行动,按照预定作战方案对部队作战实施指挥控制。

(3)预警探测能力 C_3

预警探测能力是 EWR 的核心能力指标。通过作用范围、检测精度、虚警率、目标发现概率和系统抗干扰能力,可以对设备本身的探测能力进行全面权衡。

(4)作战保障能力 C_4

作战保障能力是系统能力的重要组成部分,影响作战保障能力的因素主要包括装备保障能力、后勤保障能力和信息防护能力。

通过以上叙述可知,由战斗转换能力 C_1 、控制指挥能力 C_2 、预警探测能力 C_3 和作战保障能力 C_4 组成系统的固有能力向量 C ,各分能力要素均可采用层次分析法(AHP)^[11]进行评估。根据系统固有能力向量中各个元素的重要性程度不同,可以确定系统固有能力向量 C 的基本模型,可表示为

$$C = \sum_{i=1}^4 w_i C_i \quad (5)$$

式中:固有能力向量用 C 表示;重要性程度用加权系数 w_i 表示;每个能力元素可用 C_i 表示。图 3 表示了通过 AHP 方法确定每个效能指标权重的过程。

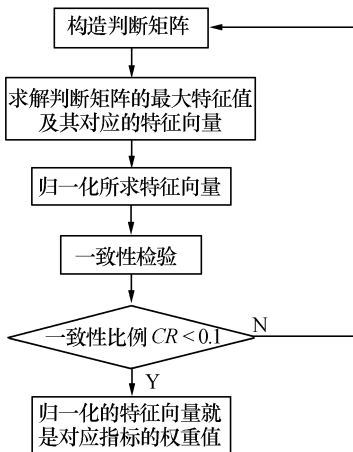


图 3 AHP 流程图

确定系统固有能力各因素的权值采用 AHP 法,通过对相关领域专家调研,对调查表和报告进行数据分析,得到如表 1 所示的按照相对重要性构造的判断矩阵。

表 1 系统固有能力各因素两两打分表

系统能力向量 C	战斗转换能力 C_1	控制指挥能力 C_2	预警探测能力 C_3	作战保障能力 C_4
战斗转换能力 C_1	1	1/3	1/7	1/3
控制指挥能力 C_2	3	1	1/5	1
预警探测能力 C_3	7	5	1	5
作战保障能力 C_4	3	1	1/5	1

计算可得: $\omega = (0.0617, 0.1530, 0.6323, 0.1530)$, $\lambda_{\max} = 4.0731$, $CI = 0.0244$, $CR = 0.0254 < 0.1$,所以判断矩阵满足一致性指标。

根据部队实际训练和演习情况积累的经验数据,咨询军事专家确定固有能力各指标进行打分,所得结果如表 2 所示。

表 2 系统固有能力影响因素表

战斗转换能力 C_1	控制指挥能力 C_2	预警探测能力 C_3	作战保障能力 C_4
0.90	0.92	0.95	0.88

由以上分析,可得

$$C = \sum_{i=1}^4 w_i C_i = 0.9316 \quad (6)$$

2.4 战场环境影响因子 R

战场的外部环境对系统的性能发挥具有很大的影响,在特定作战环境中对环境因素指标的具体考虑也存在差异。考虑自然因素和电磁因素等主要影响因素,构成战场环境影响因子 R ,如图 4 所示。

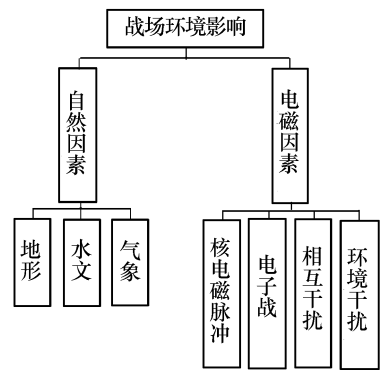


图 4 战场环境影响因子构成图

采用 AHP 法确定战场环境影响因子 R 值,表达式可表示为

$$R = \sum_{i=1}^2 t_i L_i \quad (7)$$

式中: t_i 为各指标权值; L_i 表示第 i 个战场环境影响因子对雷达系统作战效能的影响程度,由研究战场环境方面的专家根据作战时战场的具体情况,综合确定 L_i 。

咨询专家(包括装备研制厂家、装备保障厂家、装备使用单位主管部门等)对战场环境影响因子权值进行两两打分,具体情况如表 3 所示。

表 3 战场环境因子比较打分情况

战场环境	电磁因素 L_1	自然因素 L_2
电磁因素 L_1	1	2
自然因素 L_2	1/2	1

从上面打分情况,计算可得出: $u=(0.33,0.667)$,
 $\lambda_{\max}=2.0,CI=0,CR=0$,通过一致性检验。

组织战场环境方面的研究人员对环境影响因子进行打分并进行统计分析,结果如表 4 所示。

表 4 战场环境影响因子情况

自然因素 H_1	电磁因素 H_2
0.1	0.2

由以上叙述可得

$$R = \sum_{i=1}^2 t_i L_i = 0.1667 \quad (8)$$

2.5 人员胜任能力 M

同样的武器装备系统由不同的人操作,效果也各不相同。人员胜任能力因素是指武器装备操作使用人员和作战指挥员的综合能力素质对系统性能产生的影响,主要取决于相关军事人员的在编率,操作人员的军事和政治素质,战时的心理承受能力以及人员日常战备训练水平。这些权值与武器装备系统效能发挥成正比。使用人员因素 Q 的表达式为

$$M = \sum_{i=1}^4 n_i V_i \quad (9)$$

式(9)中各符号的含义:相关领域专家调研,对人员胜任能力因素进行打分并经过统计分析确定各指标权值 n_i ;用概率的形式表示在战斗任务中可以实现每个指标因子的程度 V_i ;上级参谋部门综合往年重大演习演练情况和半年、年终军事训练考核情况确定使用人员胜任能力打分情况如表 5 所示。

表 5 人员胜任能力打分比较情况

人员胜任能力	军政能力 V_1	人员在编率 V_2	战备训练水平 V_3	心理承受能力 V_4
军政能力 V_1	1	4	2	2
人员在编率 V_2	1/4	1	1/3	1/3
日常训练水平 V_3	1/2	3	1	1/2
心理承受能力 V_4	1/2	3	2	1

根据上述比较情况,经过计算可得: $v=(0.437,0.073,0.203,0.287)$, $\lambda_{\max}=4.12,CI=0.040,CR=0.039 \leq 0.1$,通过一致性检验。

部署该雷达装备系统的部队上级参谋部门,结合该部队历年重大演习演练和半年、年终军事训练考核情

况,对该部队的作战指挥员和雷达装备使用人员的综合能力素质进行量化,并确定权值,最终情况如表 6 所示。

表 6 部署该武器装备系统的某部队操作人员胜任能力情况

人员胜任能力	军政能力 V_1	人员在编率 V_2	战备训练水平 V_3	心理承受能力 V_4
能达到的程度	0.92	0.95	0.90	0.85

所以可以得到

$$M = \sum_{i=1}^4 n_i V_i = 0.8981 \quad (10)$$

3 实例分析

为验证上述所建 EWR 系统相关指标体系和作战效能评估模型的可行性,以某型 EWR 系统为本次效能评估实例,应用上述建立的系统评估模型,对该系统综合效能进行评估。某型 EWR 装备系统,雷达无故障工作时间 $MTBF=70$ h,雷达的故障平均修复时间 $MTTR=0.4$ h,假定按照编组序列该装备系统开机连续工作 6 h,系统在开机工作期间,发生的故障为临战故障无法修复,雷达出现故障后不能转向正常工作情况,系统的故障时间服从指数分布,则根据假设,可以得出 $a_1=0.9943$, $a_2-a_1=0.0057$, $D=\begin{pmatrix} 0.9179 & 0.0821 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 。综合以上分析,联立式(1)、式(9)、式(11)和式(13),可得出此 EWR 系统综合作战效能 $E=0.6972$ 。与使用该装备的部队专家进行交流,此指标符合实际情况,也验证了所建立的评估模型。通过查询相关资料可以看出,此指标比该装备出厂时效能指标低,因为所建评估模型更符合装备实际使用和工作情况,考虑了主要因素的影响,得出的数据更符合作战实际。

4 结束语

本文采用改进的 ADC 系统效能评估模型,通过对某 EWR 系统的实例分析验证了该模型的可行性。在某种程度上,实现了对 EWR 系统有效性的定量评估。结合层次分析法,将各因素分解成若干方面能力指标,所选指标能够反映系统各方面的主要功能。建立了指标权重打分表,分开考虑了雷达在理论和实际工作条件下的综合能力的影 响。随着弹道导弹性能的不 断提高和 EWR 系统关键技术性能的不 断提升,对 EWR 系统的效能评估要考虑的因素会越来越多,根据评估原则如何选取合适的指标对系统进行效能分析,成为了关键问题所在。本文只是对 EWR 系统效能评估的初步探讨,模型建立比较简单,后续应结合所建立的评估模型进行灵敏度分析,以进一步提高评估模型的可用性和有效性。

参考文献

- [1] 蓝江桥. 战略预警体系概论[M]. 北京: 军事科学出版社, 2011.
LAN Jiangqiao. Introduction to strategic early warning system[M]. Beijing: Military Science Press, 2011.
- [2] 董尤心. 效能评估方法研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
DONG Youxin. Research on effectiveness evaluation methods[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [3] LI Weifeng, ZHANG Junping, Yang Jie, et al. Notice of retraction: anti-tank company battle unit's effectiveness evaluation based on ADC and AHP[C]// International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE). Chengdu: IEEE Press, 2013: 1416-1419.
- [4] 刘仕雷, 李 昊. 改进 ADC 方法及其在武器装备系统效能评估中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(3): 130-135.
LIU Shilei, LI Hao. Modified ADC method and its application for weapon system effectiveness evaluation[J]. Journal of National Defense University of Science and Technology, 2017, 39(3): 130-135.
- [5] ZHANG G, QIAO X, LUO M. Effectiveness evaluation model of fixed wing UAV based on the improved ADC model[C]// IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). Beijing: IEEE Press, 2017: 288-292.
- [6] GUI Chunmei. Evaluation of unmanned equipment operational effectiveness based on ADC model[C]// 10th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). Hangzhou: IEEE Press, 2018: 299-303.
- [7] 齐善明, 李 磊. 基于改进 ADC 模型的指挥信息系统作战效能评估[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(5): 30-33.
QI Shanming, LI Lei. Operational effectiveness evaluation of command information system based on the improved ADC model[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(5): 30-33.
- [8] GUO Jiao, LI Tianwei, LI Caixin, et al. Construction of shipborne navigation equipment's comprehensive effectiveness evaluation index system based on improved ADC model[C]// Proceedings of IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference. Yantai: IEEE Press, 2014: 822-826.
- [9] CHEN V C, LI F, HO S S, et al. Micro-Doppler effect in radar-phenomenon, model and simulation study[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 2-21.
- [10] 董家隆, 李桂祥, 陈 辉. 基于改进 ADC 模型的天波雷达作战效能评估[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(2): 126-130.
DONG Jialong, LI Guixiang, CHEN Hui. Operational effectiveness evaluation of sky-wave over-the-horizon radar based on improved ADC model[J]. Radar Science and Technology, 2017, 15(2): 126-130.
- [11] GE Zhiqiang, LIU Yue. Analytic hHierarchy process based fuzzy decision fusion system for model prioritization and process monitoring application[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(1): 357-365.
- 盖美庆 男, 1987 年生, 博士研究生. 研究方向为军事装备作战与运用。
- 闫世强 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师. 研究方向为军事装备作战与运用。
- 马 梁 男, 1983 年生, 博士. 研究方向为军事装备效能评估。
- 王大众 男, 1965 年生, 高级工程师. 研究方向为雷达装备保障。
- 杨大伟 男, 1981 年生, 硕士. 研究方向为雷达装备作战与运用。
- 李文杰 男, 1991 年生, 博士研究生. 研究方向为军事装备与作战运用。
- [9] 刘 欣. 多传感器组网协同跟踪方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
LIU Xin. Study on multisensor collaborative tracking in sensor networks[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [10] RAMDARAS U D, ABSIL F G J. Target tracking in sensor networks; criteria for sensor selection[C]// 2007 IEEE Radar Conference. Boston, MA: IEEE Press, 2007: 192-196.
- [11] 张艺瀛. 基于静态 RCS 重构的真假弹头识别方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
ZHANG Yiyang. Research on the identification method of true and false bullet based on the static RCS reconstruction [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [12] 张凯旋, 李淑华. 雷达抗干扰技术现状及发展趋势研究[J]. 船舶电子工程, 2018, 38(11): 1-4.
ZHANG Kaixuan, LI Shuhua. Research on current situation and development trend of radar anti-jamming technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2018, 38(11): 1-4.
- 王 洋 女, 1980 年生, 硕士, 助理研究员. 研究方向为雷达总体工程。
- 黄 璐 女, 1987 年生, 助理研究员. 研究方向为雷达总体工程。
- 张 锐 男, 1982 年生, 博士, 高级工程师. 研究方向为地基相控阵雷达总体技术。
- 王 玥 女, 1997 年生, 本科, 研究实习员. 研究方向为雷达总体工程。

(上接第 19 页)