

理论与试验研究

雷达装备复杂电磁环境适应性评价研究

沈阳, 李修和, 李勇
(电子工程学院, 合肥 230037)

摘要: 目的 研究雷达装备的复杂电磁环境适应性评价问题。方法 首先分析雷达装备复杂电磁环境适应性的影响因素, 继而构建雷达装备复杂电磁环境适应性评价指标体系和模型, 最后通过实例验证模型的合理性和方法的可行性。结果 雷达装备复杂电磁环境适应性评价指标包括电子对抗侦察环境适应性、电子干扰环境适应性、电子摧毁环境适应性、目标低空环境适应性和目标隐身环境适应性等5个方面。结论 算例和分析结论表明, 该评价体系反映了雷达装备在复杂电磁环境适应性方面的技术要求, 同时, 也为雷达装备在电磁环境适应能力上的建设提供了参考。

关键词: 雷达装备; 环境适应性; 复杂电磁环境; 评价

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.03.001

中图分类号: TN974 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)03-0001-05

Research on Complex Electromagnetic Environmental Worthiness Evaluation of Radar Equipment

SHEN Yang, LI Xiu-he, LI Yong

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

ABSTRACT: Objective To study complex electromagnetic environmental worthiness evaluation of radar equipment. **Methods** Firstly, this paper analyzed the influencing factors on the complex electromagnetic environmental worthiness of radar equipment, then established evaluation indexes system and model for complex electromagnetic environmental worthiness of radar equipment, and finally validated the model rationality and method feasibility with instances. **Results** The evaluation indexes for complex electromagnetic environmental worthiness of radar equipment included electronic countermeasures reconnaissance environmental worthiness, electronic jamming environmental worthiness, electronic destroy environmental worthiness, target low height environmental worthiness and target stealthing environmental worthiness. **Conclusion** Discussion Numerical examples and analysis of the results showed that the evaluation system reflected the technological require-

收稿日期: 2014-02-05; 修订日期: 2014-03-15

Received: 2014-02-05; Revised: 2014-03-15

基金项目: 国防预研重点基金项目(9140A33020112JB39085)

Fund: Supported by the National Defense Pre-research Key Fund Program(9140A33020112JB39085)

作者简介: 沈阳(1978—), 男, 安徽安庆人, 博士, 讲师, 主要研究方向为战场电磁环境建模仿真。

Biography: SHEN Yang(1978—), Male, from Anqing, Anhui, Ph. D., Lecturer, Research focus: modeling and simulation of battlefield electromagnetic environment.

ments for complex electromagnetic environmental worthiness of radar equipment. At the same time, it also provided reference for building the complex electromagnetic environmental worthiness of radar equipment.

KEY WORDS: radar equipment; environmental worthiness; complex electromagnetic environment; evaluation

现代战场是由陆、海、空、太空、电磁等五维空间共融一体的作战空间,电磁环境成为战场环境的重要组成部分,也是武器装备发挥作战效能的重要客观条件之一^[1-3]。随着战争信息化程度的升级,武器装备的电磁环境适应性越来越受到装备论证、研制、生产和作战等全寿命过程的重视。GJB 239《装备环境工程通用要求》中将环境适应性定义为:“装备在其寿命期预计可能遇到的各种环境的作用下能实现其所有功能、性能和(或)不被破坏的能力,是装备的重要质量特性之一”^[4]。随着军队信息化建设的加速推进,武器装备面临战场的电磁环境越来越复杂。大量事实表明,环境是导致武器装备失效和功能下降的一个重要因素。为了充分发挥武器装备的作战效能,必须加强装备环境工程建设,对武器装备的环境适应性要求及评价方法进行研究,使之更好地适应未来战场复杂电磁环境^[5-7]。

1 装备面临的电磁环境分析

影响雷达装备复杂电磁环境适应性的因素很多,对环境适应性的评价,首先要从环境的影响因素入手^[8]。从组成上电磁环境可以划分为自然电磁环境、人为电磁环境和辐射传播因素等,战争的对抗性决定了复杂电磁环境的重点是人为电磁辐射和辐射传播因素。人为电磁辐射主要是敌方电子战行动,辐射传播因素主要是敌方人为因素对雷达发射电磁波和目标回波传输路径的影响。

1.1 电子对抗侦察环境

电子对抗侦察是实施电子干扰和电子摧毁的前提。在未来的信息化战场上,雷达装备必然处于敌方严密的侦察监视之下,尤其是对雷达信号的截获与识别。因此,敌方的电子对抗侦察系统对雷达装备形成了监视控制威胁,对雷达装备的工作和生存造成了极大的影响。为了应对战场电子对抗侦察因素的影响,雷达装备的电磁隐蔽性必须提高,就是要具有低截获特性和难识别的特点。

1.2 电子干扰环境

电子干扰是电子进攻的软杀伤部分,它使得被干扰装备的工作效能暂时下降。在未来的信息化战场上,敌方的各种雷达干扰系统都会想方设法针对雷达装备实施各种干扰,降低雷达装备的作战效能。因此,敌方的电子干扰系统对雷达装备形成了降低效能的威胁,对雷达装备效能的发挥造成了极大的影响。为了应对战场电子干扰因素的影响,雷达装备的电磁抗扰性必须提高,就是要具有低干扰敏感性的特点。

1.3 电子摧毁环境

电子摧毁是电子进攻的硬杀伤部分,它威胁到被干扰装备的使用寿命,工作效能会永久丧失。在未来的信息化战场上,敌方可能采取反辐射、定向能和电磁脉冲武器对雷达装备实施电子摧毁,使得雷达装备完全失去作战能力。因此,敌方的电子摧毁系统对雷达装备形成了物理毁伤威胁,对雷达装备的战场生存造成了极大的影响,而且雷电和静电也可能会对装备系统造成物理毁伤。为了应对战场电子摧毁因素的影响,雷达装备的电磁隐蔽性必须提高,同时要具有抗高能电磁攻击的能力和良好的电磁加固特性。

1.4 电波传播条件

雷达是依靠发射和接收电磁波工作的,雷达发射和接收电磁波的传播条件都会对雷达工作效能产生影响,电磁波传播条件包括地形遮蔽和路径损耗。由于微波频段的视距传播特性,雷达目标往往采取低空突防战术躲避雷达的探测,在雷达站选址时会考虑海拔高度以提升通视距离,即使这样,地面或海面杂波仍然会对雷达探测产生影响。因此,雷达的反地面/海面杂波能力必须强,以应对低空电波传播条件。

随着目标雷达隐身技术的发展,未来战场上的雷达装备将会受到来自目标隐身的挑战。无论是外

形隐身还是材料隐身,它们都是通过影响雷达回波的正常传输来降低其工作效能的。因此,目标雷达隐身对雷达装备形成了降低效能威胁,对雷达装备效能的发挥造成了极大的影响。为了应对战场目标隐身因素的影响,雷达装备的反隐身能力必须提高,就是要具有反隐身目标的能力。

2 雷达装备复杂电磁环境适应性评价方法

2.1 评价指标体系

从上节分析可知,雷达装备复杂电磁环境适应性评价指标包括电子对抗侦察环境适应性、电子干扰环境适应性、电子摧毁环境适应性、目标低空环境适应性和目标隐身环境适应性等5个部分,各部分又包含下级指标,形成一个相对完备的指标体系,如图1所示。

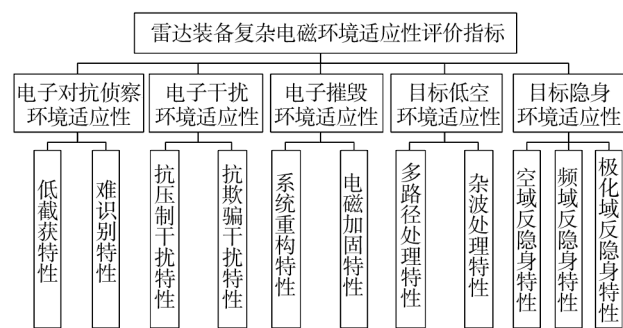


图1 雷达装备复杂电磁环境适应性评价指标体系

Fig.1 Index system for complex electromagnetic environmental worthiness evaluation of radar equipment

电子对抗侦察环节主要包括截获信号和识别型号。雷达低截获技术使得雷达信号被侦察截获的概率大大降低,雷达难识别特性主要是指雷达指纹特性,对雷达型号的侦察识别越来越多地依赖指纹识别^[9]。因此,综合雷达的低截获特性和难识别特性来度量其电子对抗侦察环境适应性。

电子干扰主要包括压制干扰和欺骗干扰。雷达压制干扰主要淹没目标回波来妨碍目标检测,雷达欺骗干扰主要制造相似回波来扰乱目标参数测量^[10-11]。因此,综合雷达的抗压制和抗欺骗特性来度量其电子干扰环境适应性。

电子摧毁主要包括反辐射攻击、定向能和电磁脉冲攻击。反辐射攻击主要针对雷达天线这一“前门”,定向能和电磁脉冲攻击主要经过雷达设备孔缝这一“后门”攻击系统电子线路^[12]。在雷达遭受电子摧毁时,如果备用天线能够及时启用或电磁屏蔽等抗摧毁的电磁加固性能强,即可继续工作。因此,综合雷达的系统重构和电磁加固特性来度量其电子摧毁环境适应性。

目标低空环境包括电波传输多路径效应和地/海面杂波干扰。当目标高度较低时,将会有多路径信号和地/海面杂波信号进入雷达接收机,进而影响雷达的探测^[13]。因此,综合雷达的多路径处理和杂波处理特性来衡量其目标低空环境适应性。

目标隐身包括外形和吸波材料等影响目标回波的方法。雷达空域反隐身是针对外形隐身的前向散射弱点,采取收发分置的技术反隐身;雷达频域反隐身是针对吸波涂料反隐身的频率响应特点,选用更低频段或更高频段工作来反隐身;雷达极化域反隐身是采取变极化技术增强对隐身目标的探测。因此,综合雷达的空域反隐身、频域反隐身和极化域反隐身特性来衡量其目标隐身环境适应性^[14]。

2.2 评价方法模型

雷达装备的电磁环境适应性指标涉及上述很多方面,而且适应性检验试验的影响因素众多。因此,建立基于层次分析法(AHP)和最优指标法相结合的评价模型^[15],算法如下。

1) 确定原始试验数据矩阵。设有 m 个评价对象,每个评价对象有 n 个评价指标,原始试验数据以矩阵表示:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}_{n \times m} \quad (1)$$

2) 确定最优指标,构成最优值向量 y :

$$y = (x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n) \quad (2)$$

其中元素 x_j 的确定有2种可能。

① 若该元素为高优指标,则:

$$x_j = \max \{x_{j1}, x_{j2}, \cdots, x_{jm}\} \quad (j=1, 2, \cdots, n) \quad (3)$$

② 若该元素为低优指标,则:

$$x_j = \min \{x_{j1}, x_{j2}, \cdots, x_{jm}\} \quad (j=1, 2, \cdots, n) \quad (4)$$

3) 数据归一化处理。归一化后的数据矩阵记

为:

$$Z = \begin{pmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ z_{n1} & \cdots & z_{nm} \end{pmatrix}_{n \times m} \tag{5}$$

其中元素 z_{ij} 由归一化处理所得,对于高优指标:
 $z_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j}$;对于低优指标: $z_{ij} = \frac{x_j}{x_{ij}}$ 。
式中: x_j 为最优指标值, $i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, m$ 。

4) 确定权重系数。用 AHP 方法确定。AHP 法确定权重有 3 种方法: 幂法、和积法以及方根法, 具体参考文献[15], 这里不再赘述。

5) 计算评价值 M_j , 进行排序评价:
$$M_j = \sum_{i=1}^n z_{ij}w_i \quad (j = 1, 2, \cdots, m) \tag{6}$$

式中: w_i 为各项指标的组合权重。 M_j 值越大, 表明第 j 个评价对象越接近最优水平。可按照 M_j 值的大小, 对各评价对象进行优劣排序。

3 雷达装备电磁环境适应性评价算例

3.1 计算示例

设雷达 A 和 B, 通过电磁环境适应性试验获得其原始数据见表 1。

表 1 雷达装备电磁环境适应性试验数据
Table 1 Parameters for complex electromagnetic environmental worthiness experiment of radar equipment

一级指标项	二级指标项	雷达 A	雷达 B
电子对抗侦察 环境适应性	低截获特性	0.8	1.2
	难识别特性	2.3	1.8
电子干扰 环境适应性	抗压制干扰特性	3.5	2.4
	抗欺骗干扰特性	0.7	0.8
电子摧毁 环境适应性	系统重构特性	3.0	5.0
	电磁加固特性	2.0	1.0
目标低空 环境适应性	多路径处理特性	3.0	5.0
	杂波处理特性	2.8	3.2
目标隐身 环境适应性	空域反隐身特性	2.0	1.0
	频域反隐身特性	3.0	5.0
	极化域反隐身特性	1.0	3.0

由表 1 得原始数据矩阵, 经归一化后得评价矩阵:

$$Z = \begin{pmatrix} 1.0 & 0.67 \\ 1.0 & 0.78 \\ 1.0 & 0.69 \\ 1.0 & 0.875 \\ 0.6 & 1.0 \\ 1.0 & 0.5 \\ 0.6 & 1.0 \\ 0.875 & 1.0 \\ 1.0 & 0.5 \\ 0.6 & 1.0 \\ 0.33 & 1.0 \end{pmatrix} \tag{7}$$

经平均加权综合(计算过程略)得雷达 A 和雷达 B 的电磁环境适应性评价价值分别为 0.896 和 0.954。

3.2 分析结论

按照第 2 节的指标体系和评价模型, 对两部雷达的电磁环境适应性进行了定量分析, 从上述计算示例可以看出:

- 1) 雷达装备的电磁环境适应性评价指标包含多个方面, 适应性评价是一个多指标综合评价系统。文中运用层次分析法计算指标权重, 运用最优指标法计算指标值, 综合评价方法简单易行。
- 2) 文中给出的综合评价方法科学合理, 既能客观衡量不同雷达装备之间电磁环境适应性的相对优劣程度, 又能定量分析某雷达装备在特定电磁环境适应性标准下的电磁环境适应性高低。
- 3) 按照文中方法, 评价结果具有区分不同装备实体电磁环境适应能力的分辨率和划定某装备实体电磁环境适应能力的灵敏度, 因此, 该评价方法合理可行。

4 结语

未来战场复杂电磁环境是武器装备作战运用时的客观条件之一, 尤其是像雷达这样的电子信息装备。雷达装备的电磁环境适应性评价是装备适应性检验试验的关键技术之一, 关系到装备研制生产的进程和作战效能的发挥。论文从战场电磁环境构成要素出发, 全面系统地分析了雷达装备面临的电磁

环境,构建了科学完备的雷达装备电磁环境适应性评价指标体系,并结合示例说明了评价指标和方法的实用性和科学性。其中的底层评价指标与试验设计和数据采集的对应关系是今后进一步深入研究的方向之一,希望引起学者的共同关注。

参考文献:

- [1] 李修和,薛磊,沈阳,等. 战场电磁环境仿真与训练效果评估[M]. 北京:解放军出版社,2012.
LI Xiu-he, XUE Lei, SHEN Yang, et al. Battlefield Electromagnetic Environment Simulation and Training Effect Evaluation[M]. Beijing: PLA Press, 2012.
- [2] 赵书平,张亚清,李金国,等. 基于典型地域的地面雷达实验室环境试验设计[J]. 装备环境工程,2011,8(5):104—107.
ZHAO Shu-ping, ZHANG Ya-qing, LI Jin-guo, et al. Laboratory Environmental Test Design of Ground Radar for Typical Zone[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(5): 104—107.
- [3] 张芳,蔡金燕,朱艳辉. 雷达电磁环境的联合建模与仿真[J]. 装备环境工程,2009,6(2):86—88.
ZHANG Fang, CAI Jin-yan, ZHU Yan-hui. Joint Modeling and Simulation of Radar Electromagnetic Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(2): 86—88.
- [4] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].
GJB 4239—2001, Equipment Environmental Engineering Universal Requirement[S].
- [5] 宣兆龙,易建政. 装备环境工程[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
XUAN Zhao-long, YI Jian-zheng. Equipment Environmental Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [6] 于衍华,史国华. 武器装备环境适应性论证[M]. 北京:兵器工业出版社,2007.
YU Yan-hua, SHI Guo-hua. Weapon Equipment Environmental Worthiness Demonstration[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2007.
- [7] 赵书平,刘丽新,李金国,等. 地面雷达设计定型环境鉴定试验分析[J]. 装备环境工程,2012,9(3):75—77.
ZHAO Shu-ping, LIU Li-xin, LI Jin-guo, et al. Analysis of Design Finalization Environmental Qualification Test of Ground Radar[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 75—77.
- [8] 王玉明,谭志良,毕军建. 复杂电磁环境对雷达与指控系统的影响[J]. 装备环境工程,2013,10(3):12—15.
WANG Yu-ming, TAN Zhi-liang, BI Jun-jian. Effects of Complex Electromagnetic Environment on Radar and C2 System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 12—15.
- [9] 侯小林,羊彦,高健健,等. 雷达低截获概率信号及验证方法[J]. 西安电子科技大学学报,2012,39(4):184—190.
HOU Xiao-lin, YANG Yan, GAO Jian-jian, et al. Methods for Testing the Low Probability of Interception Performance of Radar Signals[J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(4): 184—190.
- [10] 张云秀. 雷达对抗中3种压制系数的比较[J]. 信息与电子工程,2011,9(4):413—417.
ZHANG Yun-xiu. Comparative Study of Three Suppression Coefficients in Radar Countermeasure[J]. Information and Electronic Engineering, 2011, 9(4): 413—417.
- [11] 解凯,陈永光,汪连栋,等. 距离波门拖引方案的分析建模与评估[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(8):1158—1163.
XIE Kai, CHEN Yong-guang, WANG Lian-dong, et al. Analysis Modeling & Evaluation of Rangegate Pull Off[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(8): 1158—1163.
- [12] 舒楠,张厚,李奎源. 强电磁脉冲对雷达系统影响分析[J]. 战术导弹技术,2011,13(1):96—98,104.
SHU Nan, ZHANG Hou, LI Kui-yuan. Electromagnetic Pulse Effect Analysis for the Radar System[J]. Tactical Missile Technology, 2011, 13(1): 96—98, 104.
- [13] 王红光,吴振森,朱庆林. 大气折射对雷达低仰角跟踪误差的影响分析[J]. 电子与信息学报,2012,34(8):1893—1896.
WANG Hong-guang, WU Zhen-sen, ZHU Qing-lin. Influence Analysis of Atmospheric Refraction on Low-angle Radar Tracking Errors[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(8): 1893—1896.
- [14] 曹丽梅,王瑛. 雷达隐身与反隐身技术发展综述[J]. 现代导航,2012,8(3):215—218.
CAO Li-mei, WANG Ying. Overview on Development of Radar Stealth and Anti-stealth Technologies of Radar[J]. Modern Navigation, 2012, 8(3): 215—218.
- [15] 谭跃进,陈英武. 系统工程原理[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1999.
TAN Yue-jin, CHEN Ying-wu. System Engineering Theory[M]. Changsha: National Defense Science Technology Press, 1999.