

一种装备战场电磁兼容性综合评估方法

周尚武¹, 徐英², 周勇³

(1.新华学院 电子通信工程学院, 合肥 230088; 2.电子工程学院, 合肥 230037;
3.北京信息控制研究所, 北京 100078)

摘要: **目的** 衡量和论证复杂电磁环境下单个装备的综合电磁兼容性和战场己方所有装备系统的整体电磁兼容性。**方法** 结合电磁兼容性综合评估需求, 建立对装备电磁兼容性评估指标体系, 研究综合评估方法。**结果** 给出了装备战场电磁兼容性评估指标, 建立了基于多指标的战场电磁兼容性综合评估指标体系, 并从多属性决策角度, 提出了基于网络分析法(ANP)和逼近理想解排序法(Topsis)的装备战场电磁兼容综合评估方法, 通过评估实例验证了方法的实用性和正确性。**结论** 装备战场电磁兼容性综合评估方法可以为装备、平台和集群的战场运用方式论证提供决策依据, 评估结果具有一致性和可重用性。

关键词: 电磁兼容; 网络分析法; 逼近理想解排序法

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.04.004

中图分类号: TJ04; TG174

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)04-0016-05

A Method for Battlefield Electromagnetic Compatibility Evaluation of Equipment

ZHOU Shang-wu¹, XU Ying², ZHOU Yong³

(1. Electronics and Communications Engineering College of Anhui Xinhua University, Hefei 230088, China;

2. Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China;

3. Beijing Institute of Information and Control, Beijing 100078, China)

ABSTRACT: Objective To determine and demonstrate the comprehensive electromagnetic compatibility of individual equipment in complex electromagnetic environment and the overall comprehensive electromagnetic compatibility of all equipment in one battlefield party. **Methods** The index system for battlefield electromagnetic compatibility evaluation was built to research the comprehensive evaluation method in combination with evaluation indicators given for electromagnetic compatibility of battlefield equipment. **Results** Evaluation indexes and multi-indexes based evaluation index system of electromagnetic compatibility of battlefield equipment were proposed. Evaluation method based on analytic network process (ANP) and technique for order preference by similarity to an ideal solution (Topsis) was provided from the perspective of multiple attribute. The practicability and correctness of the method was proved through an evaluation example. **Conclusion** The comprehensive evaluation method can provide a decision-making basis for the demonstration of equipment, platform and formation operational mode in the battlefield, and the result of evaluation has consistency and reusability.

KEY WORDS: electromagnetic compatibility; network evaluation; Topsis

复杂战场电磁环境下, 为了避免战场上己方电磁 装备间电磁干扰的发生, 有必要在装备应用前进行面

收稿日期: 2016-11-24; 修订日期: 2016-12-08

基金项目: 重点预研基金项目 (9140A33020112JB39085)

作者简介: 周尚武 (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电磁环境监测与信号处理。

向任务的战场电磁兼容预测分析,对战场电磁兼容方案进行评估,从而制定合理有效的电磁防护措施,保障己方装备间的电磁兼容,达成最佳作战效能。战场电磁兼容性评估是一个非常复杂的问题。单独的电磁兼容性指标无法衡量干扰对战场装备多方面综合性能的影响程度,也不能对整个战场的综合电磁兼容性能给出综合评价,因此,必须研究适用于复杂战场多系统间的电磁兼容性综合评估的方法,对单个装备(多方面性能)的综合电磁兼容性和整个战场己方装备系统整体的区域集群电磁兼容性进行评估,为更合理的装备战场运用提供决策依据。综合评估包括两个层次。

1) 单个装备战场电磁兼容综合评估。虽然战场上每个信号接收装备(电磁敏感设备)可能受到来自多个干扰发射源的干扰影响,通过电磁兼容评估指标可以确定各接收机某方面性能受到的影响程度,但接收机受到的影响是多方面的,需要对这些影响指标进行综合评估,获得定量分析结果,以便对不同接收装备的电磁兼容状态和电磁防护效果进行综合比较。

2) 区域集群战场电磁兼容综合评估。战场电磁兼容除了关注各接收机受到的干扰影响外,还需要分析战场复杂电磁环境对整体战场电磁兼容性的综合影响,即要计算战场上所有己方设备发射的干扰对己方接收设备整体功能质量的影响程度。这就要求将战场上所有己方装备系统的电磁兼容性指标作为整体来研究,获得定量分析结果,以便对不同的战场装备运用方案进行比较。

现有的 SEMCAP, IEMCAP^[1-2], ISCAP, SEMCA 等电磁兼容预测分析系统,大多侧重于单个电磁兼容指标的预测和等级评估,与干扰对整体性能的影响不直接相关,这必然导致评估结果的不准确,且评估结果仅适用于单次评估,可比性差。文中在分析装备战场电磁兼容性评估指标的基础上,给出基于网络层次分析法(ANP)和逼近理想解排序算法(Topsis)的装备战场电磁兼容性综合评估方法。

1 装备电磁兼容性评估指标

战场装备间的电磁兼容性评估指标^[3]可以分为三类:描述装备完成自身基本功能状态的质量指标;反映接收机受干扰影响的概率指标;反映装备之间干扰能量大小的干扰余量和装备间刚好达到电磁兼容时的兼容距离等能力指标。

1.1 兼容距离

辐射干扰源(发射机)和电子信息接收装备(电磁敏感设备)部署在同一区域时,当辐射干扰源和敏感设备之间达到某一距离时,干扰源辐射的电磁波经传输通道在敏感设备上产生的电压和电流刚好等于

其敏感度门限,这一距离就称作该发射-响应对应的电磁兼容距离。当辐射干扰源与敏感设备之间的距离大于该距离时,二者是电磁兼容的。

1.2 信纳德

在模拟通信中,通常根据信纳德的变化来判断通信质量^[4],信纳德定义如下:

$$\text{SINAD} = 10 \lg \frac{P_S + P_N + P_R}{P_N + P_R} \quad (1)$$

式中: P_S 为达到接收机射频端口的有用信号功率; P_R 为到达接收机射频端口的干扰信号功率; P_N 为环境噪声功率。

1.3 误码率

衡量数字通信系统工作性能的主要指标是误码率,采用不同编码、调制方式的数字通信系统的误码率模型也不同。因此,为了利用误码率作为数字通信设备受干扰影响的判据,需要将设备的考察端口从射频端口拓展到数字端口。

1.4 干扰功率

设信纳德从 12 dB 下降到 9 dB 时,接收机不能正常工作,此时接收机受到的干扰信号功率大小为 P_R 。由式(1)可以推得干扰功率 P_R 与接收机噪声电平 P_N 的关系为:

$$P_R = 1.14 P_N \quad (2)$$

1.5 干扰带宽

基波邻频和谐波干扰是战场电磁装备之间最主要的干扰方式^[5]。因此在进行战场电磁兼容预测和评估时,应重点考虑基波邻频干扰和谐波干扰的影响,并将互调、杂散等按一定比例计入,用等效干扰带来描述干扰影响的频带宽度。

1.6 受扰概率

设战场各接收机的工作状态相互独立,接收机存在 N 个可用频点,发射机存在 N_z 个频点,且任意时刻接收机 i 在其频段上落到第 j 个频点的事件呈等概率分布。依据干扰判据引入符号变量^[5]:

$$g_{i,j,k,s} = \begin{cases} 1 & |f_{i,j} - f_{k,s}| < BW_{\text{基波}}(f_{k,s}) \\ & \text{或 } |f_{i,j} - mf_{k,s}| < BW_{\text{基波}}(f_{k,s}) \\ 0 & |f_{i,j} - f_{k,s}| \geq BW_{\text{基波}}(f_{k,s}) \\ & \text{或 } |f_{i,j} - mf_{k,s}| \geq BW_{\text{基波}}(f_{k,s}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: m 代表谐波次数, $m=3, 5, 7, \dots$ 。

接收机的受扰概率为:

$$p_i = 1 - \prod_{k=1, k \neq i}^n \left\{ 1 - \sum_{j=1}^N \left\{ \sum_{s=1}^{N_z} g_{i,j,k,s} p(s) \right\} p(j) \right\} \quad (4)$$

式中： $p(j)=\frac{1}{N}$ ； $p(s)=\frac{1}{N_z}$ 。设接收机受扰概率的（受扰）容限为 p_0 ，当 $p_i \leq p_0$ 时，战场电磁装备之间是电磁兼容的，否则不兼容。

2 基于多指标的综合评估

复杂电磁环境下，电磁敏感设备可能受到来自多个干扰发射源的干扰影响，通过装备性能评估指标（如误码率、信纳德等）可以确定其某方面性能受到的影响程度。接收机受到的影响是多方面的，需要对这些影响进行综合指标评估，获得定量分析结果，以便对不同接收装备的电磁兼容状态进行综合比较。多指标综合评估是指通过一定的数学模型（集结算子）将多个评价指标值“合成”为一个整体性的综合评估值^[6-7]。在战场电磁兼容评估中，方案通常是少量的，所以选用基于 ANP 的小样本评价方法。基于装备战场电磁兼容性指标，建立装备战场电磁兼容性评估体系如图 1 所示。

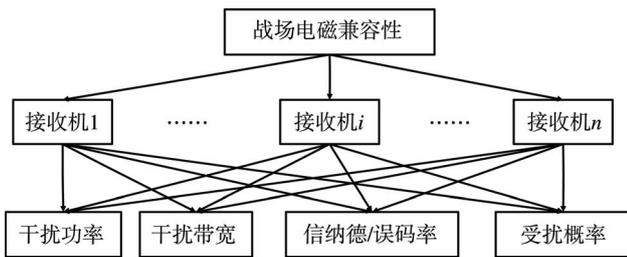


图 1 装备战场电磁兼容性评估体系

将上述指标进行一定方式的集结，从而使电磁兼容的多属性指标转化成单属性指标，以便对电磁兼容综合性能进行量化比较。根据多属性决策理论^[8-9]和综合评估理论^[10-11]，构造系统间电磁兼容性能的总体模型：

$$SR = f(\bar{w}, \bar{Q}) \tag{5}$$

式中： \bar{w} 为非负归一化的指标加权向量； \bar{Q} 为待评估方案中的属性数据集； f 为数据集集结算子。 SR 为多属性数据集集结后得到的单属性值，其值在 0~1 之间，称为综合贴近度。

2.1 基于 Topsis 的集结算子

Topsis 算子是一种“贴近度集结算子”，首先构造加权标准化决策矩阵 V 。已知各指标的归一化权重向量 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ ，由 w 和规范化矩阵 R 构造加权评估矩阵 V ， $v_{ij} = r_{ij}w_j$ 。由加权标准化矩阵确定正负基准点，通过测度各方案与基准点之间的距离，给出各方案与理想方案的贴近度，贴近度越大说明该方案的效果越好。

2.2 正负基准点的确定

在对不同的装备运用方案进行电磁兼容性评估时，必须保证某特定方案的评估结果在不同的评估对象序列中保持一致的评价值，即保证评估结果是可重用的。

取指标的最大值为正基准点，指标的最小值为负基准点。最优方案为各接收机均未受到干扰，此时对应的指标为负基准点；最劣方案为各接收机均受到严重干扰，此时对应的指标为正基准点。

以模拟通信系统为例，通常根据信纳德的变化来判断其通信质量。设信纳德从 12 dB 下降到 9 dB 时，接收机不能正常工作，此时接收机受到的干扰信号功率大小即为干扰功率指标的正基准点。由式（2）可知，在最劣方案中各接收机受到的干扰功率赋值为该接收机敏感度门限值的 1.14 倍。如果能够获得接收机噪声电平测量数据，按照正态分布采用概率统计的方法求其平均噪声电平，否则，把接收机敏感度门限作为接收机的噪声电平。

2.3 基于 ANP 的指标权重确定

通过 ANP 实现系统电磁兼容的多属性指标赋权。设有 n 个指标 $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ ，对所有指标进行两两比较建立成对比较矩阵，比较其对装备战场电磁兼容性能的影响大小。全部比较结果用判断矩阵^[12] $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 表示。

设 ANP 的指标层有元素组 U_1, \dots, U_N ，其中 U_i 中有子指标层元素 c_{i1}, \dots, c_{ini} ，以目标层性能为准则， U_j 中元素 $c_{jl}(l=1, \dots, n_j)$ 为次准则， U_i 中各元素按其影响 c_{jl} 的影响力大小进行间接优势度比较，得到判断矩阵。为了把判断矩阵中每个元素定量化，采用 Saaty 提出了“1~9”比较标度法^[13]。

由判断矩阵得到相应的归一化特征向量 $(ws_{i1}^j, ws_{i2}^j, \dots, ws_{in_i}^j)$ 。依次遍历次准则 $c_{jl}(l=1, \dots, n_j)$ ，形成矩阵 WS_{ij} ：

$$WS_{ij} = \begin{bmatrix} ws_{i1}^{j1} & \dots & ws_{i1}^{jn_j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ws_{in_i}^{j1} & \dots & ws_{in_i}^{jn_j} \end{bmatrix} \tag{6}$$

其中列向量是 U_i 中元素 c_{i1}, \dots, c_{ini} 对 U_j 中元素 c_{j1}, \dots, c_{jn_j} 的影响程度排序向量，若 U_i 中元素与 U_j 中元素相互独立 ($i \neq j$)，则 $WS_{ij} = 0$ ，将矩阵 WS_{ij} 作为子矩阵，可以形成超矩阵 WS ：

$$WS = \begin{bmatrix} \vdots & \dots & \vdots \\ p_1 & \begin{bmatrix} WS_{11} & \dots & 0 \end{bmatrix} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \begin{bmatrix} 0 & \dots & WS_{NN} \end{bmatrix} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \tag{7}$$

超矩阵的子块 WS_{ij} 都是归一化的，但是 WS 并不是归一化的。为此，对各指标的重要性进行比较，类

似超矩阵 WS 中子块 WS_{ij} 的求取，得加权矩阵 WP ，其反映了 WS 子块的相对排序。

$$WP = \begin{bmatrix} wp_{11} & \cdots & wp_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ wp_{M1} & \cdots & wp_{MN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

对超矩阵元素进行加权得到加权超矩阵 W ：

$$W = (W_{ij}) \quad (9)$$

$$W_{ij} = wp_{ij} \cdot WS_{ij} \quad (10)$$

2.4 贴近度的确定

设某待评估的装备电磁兼容方案的子指标向量（决策向量）为 $Q = (q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n)$ 。根据上述基于原始数据的统计方法获得的正负基准点向量分别为：

$$\bar{Q}^+ = (q_1^+, q_2^+, \dots, q_i^+, \dots, q_n^+) \quad (11)$$

$$\bar{Q}^- = (q_1^-, q_2^-, \dots, q_i^-, \dots, q_n^-) \quad (12)$$

构造其归一化向量分别为：

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n) \quad (13)$$

$$\bar{Y}^+ = (y_1^+, y_2^+, \dots, y_i^+, \dots, y_n^+) \quad (14)$$

$$\bar{Y}^- = (y_1^-, y_2^-, \dots, y_i^-, \dots, y_n^-) \quad (15)$$

其中当 q_i 为望大型指标时：

$$y_i = \frac{q_i - q_i^-}{q_i^+ - q_i^-} \quad (16)$$

当 q_i 为望小型指标时：

$$y_i = \frac{q_i^- - q_i}{q_i^- - q_i^+} \quad (17)$$

当 q_i 为望适中型指标时，即评估者最满意的值为 \bar{q}_j ，则：

$$y_i = \frac{D_i - |q_i - a|}{D} \quad (18)$$

定义该兼容方案与正、负基准点的欧几里德加权距离为：

$$S^- = \sqrt{\sum_i^n [(y_i - y_i^-)^2 \times w_i^2]} \quad (19)$$

$$S^+ = \sqrt{\sum_i^n [(y_i - y_i^+)^2 \times w_i^2]} \quad (20)$$

该方案的贴近度为：

$$SR = \frac{S^-}{S^+ + S^-} \quad (21)$$

SR 为 0~1 之间的无量纲量，其数值大小表征了该方案装备电磁兼容综合性能的优劣程度，值越大，装备的战场电磁兼容性越优。

3 计算实例

以单个接收机的电磁干扰预测和评估结果为基础，装备战场电磁兼容性综合评估流程如下。

1) 获取装备接收机的电磁兼容性单项指标评估结果，这里取接收到的干扰信号功率与接收机敏感度的比值、干扰带宽与接收带宽的比值、信纳德或误码率、受扰概率作为评估指标，并进行指标量化，见表 1。

2) 构造各接收机电磁兼容评估的最优方案和最劣方案，以便于求出待评估方案的贴近度，其中最劣方案是接收机未受到干扰，最劣方案是接收机受到严重干扰，见表 1。

3) 由 ANP 求得各指标权重。

$$w = \begin{bmatrix} 0.2974 \\ 0.4836 \\ 0.1095 \\ 0.1095 \end{bmatrix} \quad (22)$$

4) 根据 Topsis 评估算法进行干扰评估，采用望小型指标，即受扰程度越小越好，见表 2。

表 1 各指标的最优方案和最劣方案

接收机编号	1	2	3	4	5	6	正基准点 (最劣)	负基准点 (最优)
干扰信号功率/接收机敏感度	1.0	1.2	3.4	4.5	3.0	2.0	13.92(对应3 dB)	1
干扰带宽/总接收带宽	1	0.2	0.4	0.4	0.1	0.4	1	0
信纳德或误码率	0.01	0.01	0.2	0.12	0.13	0.03	1	0
受扰概率	0.5	0.2	0.5	0.6	0.1	0.4	1	0

表 2 贴近度求取过程的归一化向量计算结果

	1	2	3	4	5	6	正基准点 (最劣)	负基准点 (最优)
y_1	0	0.0155	0.1858	0.2709	0.1548	0.0774	13.92	1
y_2	1	0.2	0.4	0.4	0.1	0.4	1	0
y_3	0.01	0.01	0.2	0.12	0.13	0.03	1	0
y_4	0.5	0.2	0.5	0.6	0.1	0.4	1	0

5) 计算望小型指标与正负基准点的欧几里德加权距离:

$$\begin{aligned} S_1^- &= 0.4867, & S_2^- &= 0.0993, & S_3^- &= 0.2096, \\ S_4^- &= 0.2200, & S_5^- &= 0.0691, & S_6^- &= 0.1997, \\ S_1^+ &= 0.3212, & S_2^+ &= 0.5048, & S_3^+ &= 0.3918, \\ S_4^+ &= 0.3774, & S_5^+ &= 0.5210, & S_6^+ &= 0.4184. \end{aligned}$$

6) 给出待评估方案与最优方案的贴近度, 判断各装备接收机的战场电磁兼容性。

$$\begin{aligned} SR_1 &= 0.3976, & SR_2 &= 0.8357, & SR_3 &= 0.6514, \\ SR_4 &= 0.6317, & SR_5 &= 0.8828, & SR_6 &= 0.6769. \end{aligned}$$

可见, 接收机 5 的战场电磁兼容性最好, 接收机 1 的战场电磁兼容性最差。

7) 再进一步, 可以对某一装备应用方案中战场上所有装备的综合电磁兼容性进行评估。采用望大型指标, 即单个接收机兼容性越大越好, 见表 3。

表 3 基于 Topsis 算法进行方案战场电磁兼容性综合评估

接收机	方案1		方案2		正基准点 (最优)	负基准点 (最劣)
	兼容性	y_1	兼容性	y_2		
1	0.3976	0.3976	0.1	0.3	1	0
2	0.8357	0.8357	0.8	0.8	1	0
3	0.6514	0.6514	0.8	0.8	1	0
4	0.6317	0.6317	0.8	0.8	1	0
5	0.8828	0.8828	0.9	0.9	1	0
6	0.6769	0.6769	0.7	0.7	1	0

8) 计算望大型指标与正负基准点的欧几里德加权距离。

$$S_1^+ = \sqrt{\sum_i^6 (y_i - y_i^+)^2 \cdot w_i^2} = 0.2394 \quad (23)$$

$$S_2^+ = 0.2690$$

$$S_1^- = \sqrt{\sum_i^6 (y_i - y_i^-)^2 \cdot w_i^2} = 0.2556 \quad (24)$$

$$S_2^- = 0.2509$$

9) 给出待评估方案与最优方案的贴近度。

$$SR_1 = \frac{S_1^+}{S_1^+ + S_1^-} = 0.5164 \quad (25)$$

$$SR_2 = 0.4827$$

由此可见, 虽然方案 2 的接收机 2—6 都具有较好的电磁兼容性, 但由于重要接收机 1 的兼容性差, 所以方案 2 的战场综合电磁兼容性较差。

上述评估结果不仅可以用于单个方案的战场电磁兼容性评估, 还可以用于多个评估方案的比较, 具

有一致性和可重用性。根据各接收机所在平台的重要程度, 进一步加权可以获得战场所有装备总体的电磁兼容性评估结果, 为装备的战场运用提供决策依据。

4 结语

针对战场电磁装备特点和评估需求, 建立了包括电磁兼容距离、信纳德、误码率、干扰功率、干扰带宽、受扰概率等在内的战场电磁兼容评估指标体系, 并从多属性决策角度, 提出了基于网络层次分析法和 Topsis 算法的装备战场电磁兼容综合评估算法和集群战场电磁兼容综合评估算法。通过算例分析, 验证了方法的实用性和正确性。该评估方法还具有的一致性和可重用性, 可以为复杂电磁环境下的装备运用提供决策支撑。

参考文献:

- [1] PEARLMAN R. Intrasystem Electromagnetic Compatibility Analysis Program(IEMCAP)F-15 Validation[R]. Technical Report, Part I: Roma Air Development Center Griffiss, AFB, NY, 1977.
- [2] CAPRARO G. The Intrasystem EMC Analysis Program [R]. AGARD Lecture Series No 116 on EMC, AGARD-LS-116, 1981.
- [3] 毛秀红. 雷达系统电磁兼容关键指标分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [4] GJB 151A—97, 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求[S].
- [5] 田锦. 通信系统电磁兼容指标构建与综合评估技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [6] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [7] 郭亚军. 综合评价理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [8] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [9] 何美丽, 刘浪, 王宏伟. 基于集对分析的工程评标未知权重多属性决策[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(10): 4057—4062.
- [10] 夏冰, 潘磊, 孙飞显, 等. 基于多元数据融合和层次分析的评估模型[J]. 计算机工程, 2010, 36(9): 153—155.
- [11] 李博. 多指标综合评价方法应用中存在的问题与对策[J]. 沈阳工程学院学报: 社会科学版, 2010, 06(2): 200—202.
- [12] 王莲芬. 网络分析法(ANP)的理论与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(3): 44—50.
- [13] SAATY T L. Decision Making with Dependence and Feedback[M]. RWS Publication Pittsburgh, PA, 1996.