

一种精细化的复杂电磁环境相似度评估方法

李海 宿丁 宋家锦

成都市茶店子 429 信箱

DOI:10.12238/etd.v6i4.15487

[摘 要] 复杂电磁环境相似度评估是构造逼真复杂电磁环境必不可少的环节。针对传统的复杂电磁环境相似度评估方法过于简单,无法全面精细反映复杂电磁环境构造效果的问题,本文提出一种从相似因子、单个电磁信号相似度、各类复杂电磁环境相似度、装备复杂电磁环境相似度、系统复杂电磁环境相似度四个方面进行复杂电磁环境相似度评估方法,该方法能够获取信号级相似度评估、装备级相似度评估和体系级相似度评估,实现了复杂电磁环境相似度多维度精细化全面评估,为电磁环境构造方案的优化迭代和复杂电磁环境实时构造动态调整提供精准依据。

[关键词] 复杂电磁环境构造; 复杂电磁环境相似度评估; 相似因子; 电磁信号相似度

中图分类号: TM153+.3 **文献标识码:** A

A Refined and Complex Method for Evaluating the Similarity of Electromagnetic Environments

Hai Li Ding Su Jiajin Song

P.O. Box 429, Chadianzi, Chengdu

[Abstract] The evaluation of the similarity of complex electromagnetic environments is an indispensable link in constructing realistic complex electromagnetic environments. Aiming at the problem that traditional methods for evaluating the similarity of complex electromagnetic environments are too simplistic and cannot fully and precisely reflect the effectiveness of complex electromagnetic environment construction, this paper proposes a method to evaluate the similarity of complex electromagnetic environments from four aspects: similarity factors, the similarity of individual electromagnetic signals, the similarity of various types of complex electromagnetic environments, the similarity of equipment – oriented complex electromagnetic environments, and the similarity of system – oriented complex electromagnetic environments. This method can obtain signal – level, equipment – level, and system – level similarity evaluations, realizing a multi – dimensional, refined, and comprehensive evaluation of the similarity of complex electromagnetic environments. It provides an accurate basis for the optimization and iteration of electromagnetic environment construction schemes and the dynamic adjustment of real – time complex electromagnetic environment construction.

[Key words] complex electromagnetic environment construction; complex electromagnetic environment similarity evaluation; similarity factor; electromagnetic signal similarity

引言

构建逼真的复杂电磁环境是信息化条件下训练的重要基础和前提^{[1][2]},而复杂电磁环境相似度评估作为电磁环境构造的重要环节之一,旨在回答构造电磁环境和需求电磁环境“像不像”、“有多像”的问题,量化展示电磁环境的构造效果,作为优化迭代电磁环境构造方案和复杂电磁环境实时构造动态调整的依据。传统的复杂电磁环境相似度评估方法过于简单,无法全面精细反映复杂电磁环境构造效果^[3]。

本文提出了一种从相似因子、单个电磁信号相似度、各类复杂电磁环境相似度、装备复杂电磁环境相似度、系统复杂电

磁环境相似度四个方面进行复杂电磁环境相似度评估,能够获取信号级相似度评估、装备级相似度评估和体系级相似度评估,实现了复杂电磁环境相似度多维度精细化全面评估。

1 评估指标体系建立

复杂电磁环境相似度反映的是被试装备所接收到的复杂电磁环境信号与预测的战场电磁环境信号的一致性,所以单个电磁信号是构成复杂电磁环境的基础单元。单个电磁信号相似度评估指标体系包括雷达信号相似度评估指标、雷达干扰信号相似度评估指标、通信导航信号相似度评估指标和通信导航干扰信号相似度评估指标,每种电磁信号均从频域相似因子、时域相

似因子、功率域相似因子、调制域相似因子和极化域相似因子等5个方面进行计算,得到单个电磁信号相似度,再依据被试装备的作战使命,将单个电磁信号相似度分类聚合成各类电磁环境相似度。各类电磁信号相似度评估指标主要包括目标信号环境相似度评估指标、威胁电磁环境相似度评估指标和背景电磁环境相似度评估指标,然后由各类电磁环境相似度聚合形成装备复杂电磁环境相似度,当被试对象是由多个单体装备组成的系统时,还需将装备复杂电磁环境相似度聚合形成系统复杂电磁环境相似度。

2 复杂电磁环境精细化相似度计算

2.1 单个电磁信号相似度计算

针对不同的雷达信号、雷达干扰信号、通信导航信号、通信导航干扰信号等特点,针对性设计并计算频域、时域、功率域、调制域和极化域等5个方面的相似度,精准获取雷达信号、雷达干扰信号、通信导航信号、通信导航干扰信号相似度。

2.1.1 频域相似因子计算

针对雷达信号,通过分析雷达信号的工作频率类型、频率、带宽以及工作频率类型相应特征参数的差异进行频域相似因子计算,当工作频率类型不一致时,频域相似因子值为0,工作频率类型一致时,根据类型不同采用不同的计算方法。

固定频:采用式(1)所示方法进行计算,式中 f 表示构设电磁环境中单个雷达信号的频率, f' 表示需求电磁环境中相应雷达信号的频率:

$$v_f = 1 - \frac{|f - f'|}{\max(f, f')} \quad (1)$$

脉间频率捷变:采用式(2)所示方法进行计算,式中 R_f 、

R'_f 分别表示构设电磁环境和需求电磁环境中单个信号的频率起止范围, N_f 、 N'_f 分别表示构设电磁环境和需求电磁环境中单个信号的频率捷变点数:

$$v_f = \frac{R_f \cap R'_f}{R_f \cup R'_f} \times \left(1 - \frac{|N_f - N'_f|}{\max(N_f, N'_f)} \right) \quad (2)$$

频率分集:采用式(3)所示方法进行计算,式中 S_f 、 S'_f 分别表示构设电磁环境和需求电磁环境中单个信号的分集频点集合。

$$v_f = \frac{S_f \cap S'_f}{S_f \cup S'_f} \quad (3)$$

针对雷达干扰信号,采用式(4)所示方法进行频域相似因子

计算,式中 R_f 、 R'_f 分别表示构设电磁环境和需求电磁环境中单个雷达干扰信号的干扰频率覆盖范围。

$$v_f = \frac{R_f \cap R'_f}{R_f \cup R'_f} \quad (4)$$

针对通信导航信号,通过分析通信频率使用方式及相关特征参数的差异进行频域相似因子计算。通信频率使用方式包括定频、跳频、直扩、跳频直扩,若使用方式不一致,则频域相似因子值为0,使用方式一致时,根据不同使用方式采用不同的计算方法。

定频:针对通信导航定频类型的信号,其频域特性与雷达固定频率类型的频域特性相似,因此其频域相似因子计算的方法采用式(1)进行计算。

跳频:采用式(5)所示方法进行计算,式中 S_f 、 S'_f 分别表示构设电磁环境和需求电磁环境中单个通信导航信号的跳频频点集合, V_f 、 V'_f 分别表示构设电磁环境和需求电磁环境中单个通信导航信号的跳频跳速:

$$v_f = \frac{S_f \cap S'_f}{S_f \cup S'_f} \times \left(1 - \frac{|V_f - V'_f|}{\max(V_f, V'_f)} \right) \quad (5)$$

针对通信导航干扰信号,其频域特性与雷达干扰信号频域特性相似,采用式(4)所示方法进行频域相似因子计算。

2.1.2 时域相似因子计算

针对雷达信号,当前时刻若没有监测到相应信号,则时域相似因子为0。对于连续波信号,若当前时刻信号存在,则时域相似因子为1;对于脉冲周期信号,其脉冲周期类型包括固定重频、重频抖动、重频参差、重频滑变,当脉冲周期类型不一致时,时域相似度为0,脉冲周期类型一致时,根据不同类型采用不同的计算方法。

固定重频:采用式(6)所示方法进行计算,式中 T_r 、 T'_r 分别表示构设电磁环境和需求电磁环境中单个雷达信号的脉冲重复周期:

$$v_t = 1 - \frac{|T_r - T'_r|}{\max(T_r, T'_r)} \quad (6)$$

重频抖动:采用式(7)所示方法进行计算,式中 R_t 、 R'_t 分别表示构设电磁环境和需求电磁环境中单个雷达信号的脉冲重复周期范围:

$$v_t = \frac{R_t \cap R'_t}{R_t \cup R'_t} \quad (7)$$

重频参差: 采用式(8)所示方法进行计算, 式中 S_t 、 S'_t 分别表示构造电磁环境和需求电磁环境中单个雷达信号的脉冲重复周期集合;

$$v_t = \frac{S_t \cap S'_t}{S_t \cup S'_t} \quad (8)$$

针对雷达干扰信号、通信导航信号和通信导航干扰信号, 通过分析干扰信号的有无进行时域相似因子计算, 当前时刻若监测到相应干扰信号, 则时域相似因子值为1, 否则为0。

2.1.3 功率域相似因子计算

在功率域维度, 计算被试装备天线口面感受的功率差异, 如式(9)所示, 式中 P 、 P' 分别表示构造电磁环境和需求电磁环境中单个信号到达被试装备处的功率。

$$v_p = 1 - \frac{|P - P'|}{\max(P, P')} \quad (9)$$

2.1.4 调制域相似因子计算

针对雷达信号, 通过分析雷达信号的脉内调制类型及其特征

参数的差异进行调制域相似因子 v_m 计算, 脉内调制类型包括无调制、线性调频、非线性调频、相位编码、频率编码, 若脉内调制类型不一致, 则调制域相似因子值为0, 若类型一致, 则根据不同类型采用不同的计算方法。

无调制: 相似因子值为1;

线性调频、非线性调频: 采用式(10)所示方法进行计算,

式中 B_f 、 B'_f 分别表示构造电磁环境和需求电磁环境中单个雷达信号的调制带宽;

$$v_m = 1 - \frac{|B_f - B'_f|}{\max(B_f, B'_f)} \quad (10)$$

相位编码: 采用式(11)所示方法进行计算, 式中 S_c 、 S'_c 分别表示构造电磁环境和需求电磁环境中单个雷达信号的码元集合;

$$v_m = \frac{S_c \cap S'_c}{S_c \cup S'_c} \quad (11)$$

频率编码: 采用式(12)所示方法进行计算, 式中 S_f 、 S'_f 分别表示构造电磁环境和需求电磁环境中单个雷达信号的载频频

率集合。

$$v_m = \frac{S_f \cap S'_f}{S_f \cup S'_f} \quad (12)$$

针对雷达干扰信号, 通过分析干扰信号的干扰样式差异进行计算, 干扰样式分为噪声干扰、欺骗干扰, 若干扰样式一致, 则调制域相似因子值为1, 否则为0。

针对通信导航信号, 通过分析信号调制样式及其调制度进行调制域相似因子计算, 调制样式包括调幅、单边带、双边带、独立边带、调频、频移键控、最小频移键控、相移键控、幅移键控、正交幅度调制、正交频分复用、复合调制, 若调制样式不一致, 则调制域相似因子值为0, 调制样式一致时, 采用式(13)所示方法进行调制域相似因子计算, 式中 D_m 、 D'_m 分别表示构造电磁环境和需求电磁环境中单个信号的调制度。

$$v_m = 1 - \frac{|D_m - D'_m|}{\max(D_m, D'_m)} \quad (13)$$

针对通信导航干扰信号, 通过分析干扰信号的干扰样式差异进行计算, 干扰样式分为单音调频、噪声调频、幅移键控、频移键控、相移键控, 若干扰样式一致, 则调制域相似因子值为1, 否则为0。

2.1.5 极化域相似因子计算

在极化域维度, 如果极化方式均为水平极化则极化域相似因子为1, 否则为0; 如果极化方式均为斜线极化, 相似因子为1, 否则为0; 如果极化方式均为左旋极化, 相似因子为1, 否则为0; 如果极化方式均为右旋极化, 相似因子为1, 否则为0。

按照单个电磁信号相似度评估思路, 计算公式如(14)所示,

式中 v_f 表示频域相似因子, v_t 表示时域相似因子, v_p 表示功率域相似因子, v_m 表示调制域相似因子, v_a 表示极化域相似因子。

$$v = v_f \cdot v_t \cdot \sqrt[3]{v_p v_m v_a} \quad (14)$$

2.2 各类电磁环境相似度计算

目标信号环境相似度 V_m 、背景信号相似度 V_b 、威胁信号

环境相似度 V_w 计算逻辑一致, 以威胁信号环境相似度计算为例,

阐述各类电磁环境相似度计算方法。威胁信号相似度 V_w 计算公

式如(15)所示, 式中 n_w 为需求威胁电磁环境中的信号总数,

V_{wi} 表示威胁电磁环境中第*i*个威胁电磁信号的相似度, 通过单个电磁信号相似度计算公式获取, α_{wi} 表示威胁电磁环境中第*i*个信号相似度的权值, 计算公式如(16)所示, 式中 c_{wi} 表示构造威胁电磁环境中第*i*个信号与被试装备的相关度。

$$V_w = \sum_{i=1}^{n_w} \alpha_{wi} V_{wi} \quad (15)$$

$$\alpha_{wi} = \frac{c_{wi}}{\sum_{i=1}^{n_w} c_{wi}} \quad (16)$$

2.3 装备复杂电磁环境相似度计算

装备复杂电磁环境相似度 V_e 表示的是一个装备感受的整体复杂电磁环境相似度, 计算公式如(17)所示, 式中 V_w 表示的是被试装备感受的威胁电磁环境相似度, V_b 表示的是被试装备感受的背景电磁环境相似度, V_m 表示的是被试装备感受的目标信号环境的相似度, α_w 、 α_b 、 α_m 分别表示威胁电磁环境、背景电磁环境、目标信号环境的相似度权值, 权值和为1。

$$V_e = \alpha_w V_w + \alpha_b V_b + \alpha_m V_m \quad (17)$$

2.4 系统复杂电磁环境相似度计算

系统复杂电磁环境相似度 V_s 表示的是一个体系系统感受

的整体复杂电磁环境相似度, 计算公式如(18)所示, 式中 n 为装备个数, V_{ei} 表示系统中第*i*个单体装备复杂电磁环境相似度, α_{ei} 表示系统中第*i*个单体装备复杂电磁环境相似度的权值, 该权值可基于该装备的体系贡献进行灵活配置。

$$V_s = \sum_{i=1}^n \alpha_{ei} V_{ei} \quad (18)$$

3 结语

在复杂电磁环境构造过程中, 如果复杂电磁环境相似度评估不准确精细, 无法用于优化迭代电磁环境构造方案和复杂电磁环境实时构造动态调整, 直接影响到对被试装备作战效能评定可信度及实战化能力。本文提出针对不同的雷达信号、雷达干扰信号、通信导航信号、通信导航干扰信号等电磁信号特点, 针对性设计并计算频域、时域、功率域、调制域和极化域等5个方面的相似度, 精准获取精细化的雷达信号、雷达干扰信号、通信导航信号、通信导航干扰信号相似度, 然后基于信号级的相似度结果开展装备级的复杂电磁环境相似度计算, 基于装备级的相似度开展体系级的复杂电磁环境相似度评估, 实现了复杂电磁环境相似度信号级-装备级-体系级多维度精细化全面评估。

[参考文献]

- [1]杨帆,董正宏,尹云霞,等.战场复杂电磁环境计算与仿真技术研究[M].北京:国防工业出版社,2019:1-16.
- [2]董晓博,陆静.雷达对抗装备试验[M].北京:国防工业出版社,2005:1-18.
- [3]李文鹏,徐忠富.基于相似系统理论的训练电磁环境逼真度评估[J].指挥控制与仿真,2014(36):4.

作者简介:

李海(1987—),男,汉族,四川资阳市人,硕士,高工,研究方向:复杂电磁环境体系构造。