

引用格式:汤云革,韦庆洲,黎力,等.基于受体脆弱性的复杂电磁环境构建与评估[J].电光与控制,2017,24(11):100-104. TANG Y G, WEI Q Z, LI L, et al. Construction and evaluation of complex electromagnetic environment based on receptor's vulnerability[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(11):100-104.

基于受体脆弱性的复杂电磁环境构建与评估

汤云革, 韦庆洲, 黎力, 任哲
(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘要: 基于信息系统无线接收机脆弱性机理,提出了基于受体脆弱性机理的复杂电磁环境构建方法,解决了频跨度大的作战单元需要大量电磁环境模拟装备难题;建立的针对电子信息系统信道占有度、频谱重合度、背景信号强度等要素的多激励多响应电磁环境效应“套桶”评估模型,解决了被试对象的客观性与形象性评估问题,为电子信息系统类复杂电磁环境适应性鉴定提供有益借鉴。

关键词: 复杂电磁环境; 受体脆弱性; 套桶; 适应性考核

中图分类号: TN911.4 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.11.021

Construction and Evaluation of Complex Electromagnetic Environment Based on Receptor's Vulnerability

TANG Yun-ge, WEI Qing-zhou, LI Li, REN Zhe
(Luoyang Electronic Equipment Test Center, Luoyang 471003, China)

Abstract: Based on the vulnerability mechanism of wireless receivers, this paper proposes a method to construct a complex electromagnetic environment based on the vulnerability mechanism of the receivers, which solves the problem that a great amount of electromagnetic environment simulation equipments are needed for the combating unit with large frequency span. A multi-excitation, multi-response sleeve barrel evaluation model is built, which is based on signal channel occupancy, spectral overlap degree, background signal intensity and other factors in electronic information system. It solves the problem of the objectivity and figurativeness evaluation of the tested object, and supplies a useful reference for complicated electromagnetic environment adaptability identification.

Key words: complicated electromagnetic environment; vulnerability of receiver; sleeve barrel; adaptability assessment

0 引言

目前,复杂电磁环境适应性考核主要存在两类问题:一是复杂电磁环境的构建问题;另一个是复杂电磁环境评估问题。复杂电磁环境构建主要问题是缺乏操作性强的通用标准,已有的GJB 6130-2007《战场电磁环境术语》、GJB 6520-2008《战场电磁环境分类与分级方法》主要是定义上的描述,若按其要求的方法进行,对于宽频带不同等级复杂电磁环境构建将需要大量的模拟装备,即不经济也不现实^[1];对于复杂电磁环境

评估来说,可用的评估方法较多,如层次分析法、模糊集理论、粗糙集理论等,但诸如此类方法中的主观性评价因素所占权重过大,所得评估结果体现不出复杂电磁环境效应的动态性变化过程,影响了评估的客观性与形象性。

本文基于上述问题,探索性地提出相应解决办法,针对第一个问题,提出了一种基于受体脆弱性复杂电磁环境适应性考核环境构建方法,利用重点频段、信号强度起伏、信号密集度、信号类型样式等不同复杂组合变化,不仅体现了复杂电磁环境构建的针对性、多样性、交织性、动态性、对抗性、逼真性、等效性原则,同时减少了环境构建的模拟装备数量,达到了同等考核效果,节省了测试资源与大量人力、财力消耗;针对第二个问题,基于电磁环境激励与响应的综合评估机制,利用诸影响因素测试结果,建立了针对电子信息系统信

收稿日期:2016-12-13 修回日期:2017-01-19

基金项目:“八六三”项目(2014A7074023A)

作者简介:汤云革(1971—),男,河南邓州人,硕士,高工,研究方向为通信对抗仿真。

道占有度、频谱重合度、背景信号强度等要素的多激励多响应电磁环境效应“套桶”评估模型,减少了主观因素,解决了被试对象的客观与形象评估问题。本文的研究结果在相关多频段、多组网的无线通信指挥信息系统复杂电磁环境适应性考核中得到了成功应用^[2]。

1 基于受体脆弱性机理的复杂电磁环境适应性考核环境构建方法

1.1 受体脆弱性机理分析

进行受体脆弱性分析是为了实现电磁环境构建的针对性。接收机的脆弱性主要有两类:1) 抵抗作战对手有意干扰能力的不足,如瞄准式、跟踪式、灵巧式、欺骗式等各类有意干扰;2) 抵抗无意干扰能力的不足,这是由于各类无线接收机工作电路的电子器件线性或非线性特性,不可避免存在抗频谱重合度、邻道、中频、镜频、互调等干扰能力的不足,尽管不同接收机都具有相应的干扰抑制功能。无线接收机大多采用超外差式接收机结构,一般由天线、信道、DSP 等模块组成,如图 1 所示。

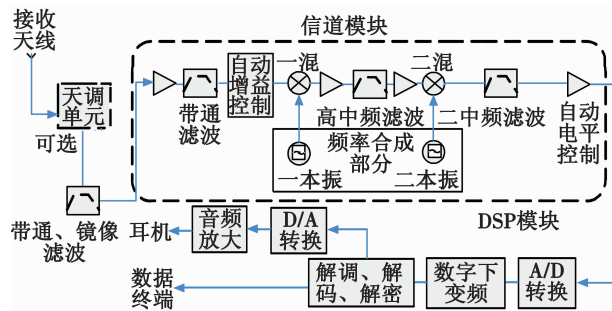


图 1 一般无线接收机工作原理示意图

Fig. 1 Working principle of general wireless receiver

接收通道中的天线滤波单元一般采用信道分组滤波的方式,滤除带外杂波、中频、镜频等,信道模块实现变频、滤波和电平控制,射频信号经放大、带通滤波、自动增益控制和过载保护,送到第一混频器,一混频输出信号经过一中频放大、滤波,也可以多次放大、滤波,滤取出一中频信号,再经放大,送入第二混频器,二混频输出的二中频通过滤波器匹配放大,送到滤波器,滤除部分噪声和杂波后,经阻抗变换送到中放进行中频放大,自动电平控制,二中频信号经 DSP 模块的 A/D 转换、下变频及速率变换、解调、解密、自动增益控制和滤波后,数据通过数据接口送到数据终端,音频通过 D/A 转换、音频放大送入耳机,完成数据和音频信号的接收。由于无线电信号传播的开放性,接收设备在接收有用信号的同时,还会接收其他信号(如有意干扰信号、有用信号邻近信号、自然环境电磁信号等),由于接收机器件的线性、非线性特性,其他信号不可避免

会与有用信号相互作用产生线性效应与非线性效应,线性变换会产生新的谐波成分,非线性变换会使信号产生失真。

1) 线性效应^[3]。当接收机为线性系统时,有两种信号会对有用信号产生干扰效应,即同频干扰效应与邻频干扰效应,同频干扰效应是频率与有用信号频率相同或相近的同信道信号,邻频干扰效应是指频率落在有用信号所在信道的相邻信道内的干扰信号,它与同频干扰的区别在于它会受到接收机某种程度的抑制,当它的频率成分落在接收机滤波器的非线性区域,与有用信号的相互作用可使新的成分落在有用信道内,干扰作用增强。

2) 非线性效应^[3]。当进入接收机的信号或合成信号的电平比较高时,在接收机的部分电路或者全部电路都可能成为非线性电路,所有这些非线性都会使信号产生幅度和相位失真,并使这些信号相互作用,产生诸多新的干扰信号,使干扰成分增强。一般来说,单一的高电平信号与有用信号,可能会产生交叉干扰和阻塞干扰,多个高电平的干扰信号之间相互作用可能会产生互调干扰,若发生在混频器可能会产生混频干扰和倒混频干扰。

1.2 基于受体脆弱性机理的复杂电磁环境适应性考核环境构建方法

依据上述接收机脆弱性机理的分析结果,可将这些威胁电磁信号区分为 3 类:1) 有意干扰信号,为信息系统战场上可能面临作战对手电子对抗装备施放的不同干扰方式、不同干扰样式的电磁环境信号^[4];2) 无意干扰信号,为信息系统战场上可能面临的敌我双方电子装备施放的电磁环境信号,这些信号在信息系统接收机端可能造成接收机多级邻道干扰、交叉干扰、互调干扰、中频干扰、混频干扰、倒易混频干扰等;3) 随机背景电磁环境信号,主要是场地自然环境信号及人为模拟随机环境信号,场地自然环境信号为典型场区的实际采集,人为模拟随机环境信号主要是为体现背景电磁环境的动态性^[4-5]。

可见,若按基于受体脆弱性机理的威胁电磁信号搭建复杂电磁适应性考核环境,可节省不必要的模拟装备,实际操作时,可依据战情推动,从环境模拟重点频段,信号密集程度、信号强度起伏范围、信号样式多变的不同复杂度进行,不同复杂度的威胁电磁信号要体现在空域覆盖、时域变化、频域交叠、功率域起伏等方面。

1.2.1 环境模拟重点频段复杂度设置方法

选择需要环境模拟重点频段有两个需要:1) 为了减少模拟装备,因为远离受体工作频点/频段的电磁环境信号对受体基本不产生影响,不必在全频段模拟;2)

为了区分不同级别的复杂度,可随着复杂度设置的提高,体现在重点频段的带宽展宽、信号数量增加上。重点频段复杂度设置方法表示为

$$L_i = (f_{\text{high}} - f_{\text{low}}) \times x_i \% \quad (1)$$

式中: L_i 为模拟的各个重点区域频带带宽; f_{high} 为工作频段的高端(或跳频带宽的高端); f_{low} 为工作频段的低端(或跳频带宽的低端); $x_i\%$ 依据重点频段复杂度来设定。

1.2.2 信号密集复杂度设置方法

针对受体的信号密集复杂度设置方法表示为

$$\rho_i = \frac{n_i}{N} = \frac{(f_{\text{high}} - f_{\text{low}}) \times y_i \% \times 1000}{N \times w_i} \quad (2)$$

式中: ρ_i 为各个重点区域频带带宽内的信号密集复杂度; N 为重点区域带宽内被试受体所能承受的最大信道数量; n_i 为重点区域带宽内模拟环境的信号数量; $y_i\%$ 依据信号密集的复杂度来设定; w_i 为被试对象的信道带宽,单位为 kHz。

1.2.3 信号强度复杂度设置方法

信号起伏范围反映战场电磁环境中各种信号在能量域上对信息装备的干扰程度,信号强度复杂度设置方法表示为^[6]

$$K_{\text{En}} = \frac{(E_n - P_{\text{min}}) \times z_i \%}{E_n} \quad E_n > P_{\text{min}} \quad (3)$$

式中: K_{En} 为各个重点区域频带带宽内的信号强度复杂度; E_n 为背景信号强度; P_{min} 表示无线接收机门限电平; $z_i\%$ 依据信号强度起伏范围的复杂度来设定。

1.2.4 信号样式复杂度设置方法

信号样式的设置原则可基于信息系统可能面临的作战对手的诸多电子装备样式而定,信号样式设置要随着复杂度提高而呈现多样。

2 基于多域多维复杂电磁环境效应“套桶”评估模型

2.1 激励与响应评估机制

建立各类受体复杂电磁环境适应性激励与响应评估机制,目的是在设定的不同复杂度电磁环境下,考核各类受体诸多能力的变化(如数据通信误码率、语音通信清晰度、传输时延、组网时间、承受子网数量、路由能力等)。图2为复杂电磁环境适应性考核的激励与响应评估机制示意图。

图2中评估模型是问题的核心,依据被测系统各类响应变化情况,通过综合分析去评估被试系统的复杂电磁环境适应性。目前,传统的评估方法有层次分析法、粗糙集理论、模糊理论等^[7],存在着主观性评价因素所占权重过大及评估结果看不到复杂电磁环境效应的动

态性变化问题,本文在相关数学分析的基础上,基于激励与响应关系建立了一种基于多域多维电磁环境效应“套桶”评估方法,一定程度上弥补了上述缺陷^[8]。

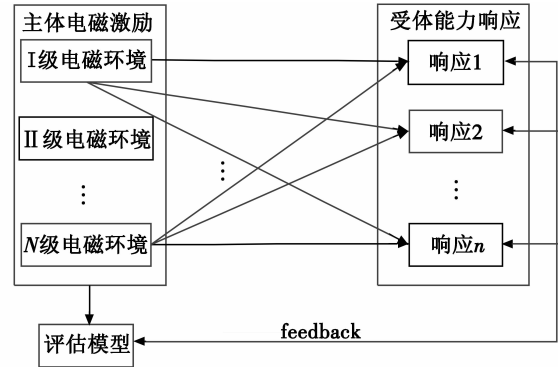


图2 信息系统复杂电磁环境响应及评估机制

Fig. 2 Complex electromagnetic environmental response and evaluation mechanism of information system

2.2 激励与响应关系构建

2.2.1 激励集描述

激励因子为基于受体脆弱性的各类影响因素,包括各类有意干扰(瞄准式干扰信号、区域拦阻压制信号等)、无意干扰(工作频道的各邻道干扰信号、交叉调制干扰信号、互调干扰信号、中频干扰信号、镜频干扰信号及各类抬高底噪的其他环境信号等)及随机背景电磁环境信号,这些可变环境信号用 X_i 来表示,即 $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,集合中的所有元素都是一个变化的量,分别表示各类干扰影响参数,当其变化使接收机出现功能中断问题时,此时的临界值为其最大值。由于各类干扰影响因子差别很大,意义不一样,为便于分析问题及可比性,分别将其归一化,用 X_i' 表示,且 $X_i' = (x_1', x_2', \dots, x_n')$,即其取值分别除以其最大值。

2.2.2 响应集的描述

1) 单激励响应集的描述。

从激励与响应的关系知道, X_i 中每一类因素干扰等可导致信息系统至少一项或多项能力的变化,因此,电磁环境单元与响应之间是一种一对多的关系,用集合来描述它们,即

$$Z_i \rightarrow (x_1, x_2, \dots, x_n, \dots) \quad (4)$$

式中, $(x_1, x_2, \dots, x_n, \dots)$ 对应被试系统能力的变化(如数据通信误码率、语音通信清晰度、传输时延、组网时间、承受子网数量、路由能力等)。由于各类能力元素的意义不一致,为了使其相互具有可比性, $(x_1, x_2, \dots, x_n, \dots)$ 中各元素也分别归一化,即 $(x_1', x_2', \dots, x_n', \dots)$ 分别是对应资源的归一化数值。

为了更清楚问题的表述以及便于量化分析,把电磁环境引起各类通信能力变化的值,统一到一个矩阵

中去,用矩阵的各列对应各环境因素下单通信能力的逐渐变化情况,矩阵中各行对应着在单一电磁环境影响因素下参数取值时的各类能力值,这样的矩阵被称为系统单激励通信能力响应矩阵,即

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \chi'_{11} & \chi'_{12} & \cdots & \chi'_{1n} \\ \chi'_{21} & \chi'_{22} & \cdots & \chi'_{2n} \\ \chi'_{31} & \chi'_{32} & \cdots & \chi'_{3n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \chi'_{n1} & \chi'_{n2} & \cdots & \chi'_{nn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

2) 多激励相关响应集的描述。

多激励为多类影响因子的综合效应,因各影响因子之间存在着直接或间接的联系,因此可以通过它们的相关关系做经验判定,如图 3 所示。

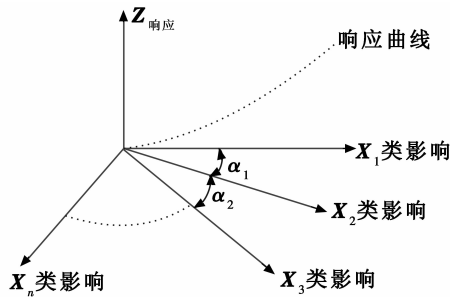


图 3 各激励相关响应示意图

Fig. 3 Incentive and response relations

图 3 中,利用各旋转坐标轴之间的夹角来表示各电磁环境影响效应之间的相关性。由向量合成计算公式知:当夹角小于 90° 时,表示这两类电磁环境影响效应之间具有正相关性;当夹角等于 0° 时,表示这两类资源之间具有最强的正相关性;当夹角等于 90° 时,说明这两类资源之间没有相关性,当夹角大于 90° 时负相关,负相关是不可能发生在资源响应之间的,因此, α 的经验取值范围为 $[0^\circ, 90^\circ)$ 。根据余弦函数的特性及资源响应数据的变化情况,把 α 的取值进一步细分为两个区域,即 $[0^\circ, 45^\circ]$ 及 $(45^\circ, 90^\circ)$,当从反馈信息中发现任意两类电磁环境效应相关性很强时,就从 $[0^\circ, 45^\circ]$ 取经验值,否则就从 $(45^\circ, 90^\circ)$ 取值。为了便于后边相关计算,效应的相关性用矩阵表示,即

$$(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \cdots, \alpha_n)^T \quad (6)$$

由于各类电磁环境因素组合下接收机响应之间存在着相关性,用式(7)分别求它们的向量合成,这些合成点可称为相关响应点 S 。

在做合成时,合成向量可能被放大,可能影响水平面上各通信能力响应坐标轴的比例,为了保持坐标轴的比例性,减少判断误差,可以将合成向量分别乘以它对应的合成因子, $\delta = \cos \alpha_1$, 则 χ'_{11}, χ'_{12} 的合成相关点的值为 $s_{11} = |\alpha c_1| \cos \alpha_1$ 。然后,以此类推,分别求出剩余

各相关点的值。

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \chi'_{11} & \chi'_{12} & \cdots & \chi'_{1n} \\ \chi'_{21} & \chi'_{22} & \cdots & \chi'_{2n} \\ \chi'_{31} & \chi'_{32} & \cdots & \chi'_{3n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \chi'_{n1} & \chi'_{n2} & \cdots & \chi'_{nn} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

2.2.3 综合效应集描述

通过以上的步骤,就得到了被试对象几类电磁激励下的各类能力响应点及相关响应点,把得到的单响应点及相关点放在同一个矩阵中,即

$$\mathbf{C}_{\text{所有点}} = \begin{pmatrix} \chi'_{11} & \chi'_{12} & \cdots & \chi'_{1n} & s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ \chi'_{21} & \chi'_{22} & \cdots & \chi'_{2n} & s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \chi'_{31} & \chi'_{32} & \cdots & \chi'_{3n} & s_{31} & s_{32} & \cdots & s_{3n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \chi'_{n1} & \chi'_{n2} & \cdots & \chi'_{nn} & s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nn} \end{pmatrix} \quad (8)$$

评估电磁环境适应性的方法就是看在各类干扰可变参数逐渐变化时,矩阵中每行的响应点及综合响应点的变化趋势,并对这些变化趋势做综合分析,从而评估电磁环境的适应性。

2.3 基于多域多维电磁环境效应“套桶”评估方法

依据激励与响应的对应关系,为了形象评估复杂电磁环境的适应性,把式(8)的电磁环境适应性结果投射在图 4 所示旋转“套桶”坐标系中。

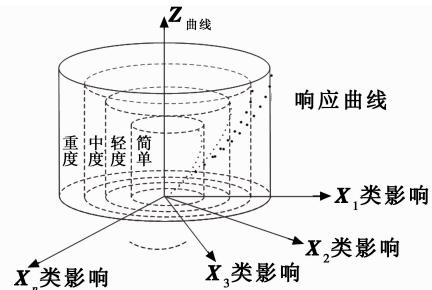


图 4 套桶评估模型示意图

Fig. 4 Sleeve barrel evaluation model

图 4 中,水平坐标面为设置的复杂电磁环境信号中对接收机产生影响的各类电磁环境激励因子 X_i, Z_i 为各类复杂电磁环境条件下,被测系统的能力变化情况(数据通信误码率、语音通信清晰度、传输时延、组网时间、承受子网数量、路由能力等通信组网能力的各类通信变化效应)。依据被试系统在不同复杂度电磁环境下的各类能力变化情况,规定不同的规则边界,划分不同的响应“套桶”边界,如可依据 GJB 6130-2007《战场电磁环境术语》、GJB 6520-2008《战场电磁环境分类与分级方法》将系统的复杂电磁环境效应规定为 4 个不同的级别效应。

1) 简单电磁环境。为最内层桶(Z_i 的取值范围 0

~0.01),即设定的电磁环境对被试对象各类能力影响可以忽略,表现为对被试对象的数据通信误码率、语音通信清晰度、传输时延、组网时间、承受子网数量、路由能力等不产生影响或影响可以忽略。

2)轻度电磁环境。为次内层桶(Z_i 的取值范围0.01~0.10),即设定的电磁环境对被试对象各类能力有较轻的影响,表现为对被试对象的数据通信误码率、语音通信清晰度、传输时延、组网时间、承受子网数量、路由能力等有一定的下降。

3)中度电磁环境。为第二次内层桶(Z_i 的取值范围0.10~0.50),即设定的电磁环境对被试对象各类能力有较大的影响,表现为对被试对象的误数据通信误码率、语音通信清晰度、传输时延、组网时间、承受子网数量、路由能力等有较大的下降。

4)重度电磁环境。为最外层桶(Z_i 的取值范围大于0.50),即设定的电磁环境对被试对象各类能力有严重的影响,表现为对被试对象的数据通信误码率、语音通信清晰度、传输时延、组网时间、承受子网数量、路由能力等能力有严重的下降,全部或部分无法进行正常的通信。

2.4 一种信息指挥系统复杂电磁环境适应性考核效果评估应用

基于上述的复杂电磁环境构建及评估方法,在某区域构建了包括短波电台中、超短波电台中、散射通信网等目标信息传输网进行考核验证,动用各类复杂电磁环境模拟装备进行等级模拟。其简单电磁环境为考核场地的自然电磁环境及另加10个动态出现的随机信号;轻度复杂电磁环境在被测对象工作频点区域设置35个邻道信号、2个互调信号、1个中频信号、20个动态出现的随机信号;中度复杂电磁环境在被测对象工作频点区域设置149个邻道信号、2个互调信号、1个中频信号、1个镜频信号、30个动态出现的随机信号;重度复杂电磁环境在被测对象工作频点区域设置312个邻道信号、2个信号产生的互调信号、1个中频信号、1个镜频信号、50个动态出现的随机信号。依据多域多维电磁环境效应“套桶”评估方法,通过数据处理得到了综合效应结果。图5为上述4级电磁环境下综合信息系统中超短波电台中误码率综合效应部分结果图。

从图5处理结果可以看到,在不同复杂度的电磁环境下,构成环境的各影响因素对被测对象通信效能影响程度不一样,其中有意干扰、近邻道、互调因素影响权重较大,而中频、镜频环境信号影响比较小。

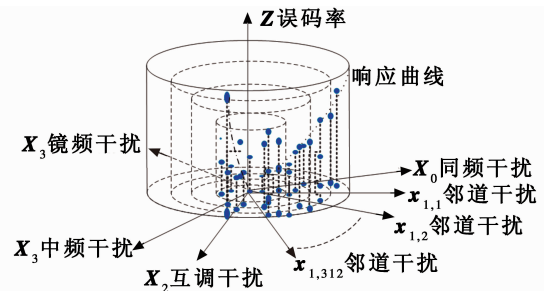


图5 超短波电台中误码率综合效应评估结果
Fig. 5 Comprehensive evaluation result of effect of bit error rate of ultrashort wave

3 结束语

本文从复杂电磁环境适应性存在的两个主要问题入手,探讨了如何解决电子信息系统复杂电磁环境适应性考核的电磁环境构建与评估的难题,阐述了基于受体脆弱性的复杂电磁环境适应性考核构建方法,解决了系统级复杂电磁环境适应性考核中,面向实战进行考核环境构建的难题,满足了考核所需,且通过针对性的考核环境构建,解决了电磁环境构建所需装备过多、消耗大量人力财力的问题,为同类型电子装备或系统鉴定试验提供有益借鉴,提出的“套桶”评估模型为复杂电磁环境适应性评估做出了一种有益尝试。

参考文献

- [1] 聂峰,汪连栋. 电子信息系统复杂电磁环境效应[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [2] 刘尚合,孙国至. 复杂电磁环境内涵及效应分析[J]. 装备指挥技术学院学报,2008,19(1):72-83.
- [3] 朱庆厚. 通信干扰技术及其在频谱管理中的应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2010.
- [4] 汪连栋,胡明明,高磊,等. 电子信息系统复杂电磁环境效应研究初探[J]. 航天电子对抗,2013,29(5):23-25.
- [5] 刘小强,魏光辉,潘晓东,等. 现代战场电磁环境与电磁屏蔽技术[J]. 装备环境工程,2007,4(1):1-3.
- [6] 邵涛,胡以华,石亮,等. 战场电磁环境复杂度定量评估方法研讨[J]. 电光与控制,2010,17(1):81-84.
- [7] 王继详,韩慧. 通信对抗干扰效果客观评估[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- [8] 黄兴东,申功勋. 复杂电磁环境仿真试验体系的模型验证方法研究[J]. 系统仿真学报,2012,24(12):2562-2566.