

通信电台带外 双频干扰预测模型与试验

王雅平¹, 魏光辉¹, 潘晓东¹, 万浩江¹, 李 伟¹, 尚在飞²

(1. 陆军工程大学石家庄校区电磁环境效应国家重点实验室, 河北石家庄 050003; 2. 陆军炮兵训练基地, 河北张家口 075000)

摘 要: 当电台处于外界复杂电磁环境中, 会有多种频率的干扰信号同时作用, 如果信号强度足够, 即便落于带外也有可能造成电台阻塞, 使其接收不到有用信号而失去作战效能. 带外信号造成接收机阻塞所需的能量高, 利用矢量法将有用信号和干扰信号进行矢量叠加, 通过推导得到相应的干扰预测模型. 利用两套独立的干扰发射系统进行双频干扰试验, 试验前要对试验系统进行调整, 之后再分别以误码率 0.1 和受试电台接收不到链路测试作为临界干扰判别标准进行两次试验, 试验结果表明以上模型能够预测受试设备是否达到临界干扰状态, 预测误差在 2dB 以内, 同时以上两种临界干扰标准均适用.

关键词: 通信电台; 带外干扰; 阻塞效应; 建模

中图分类号: O441 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)04-0826-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.04.009

Out-of-Band Dual Frequency Jamming Prediction Model and Experiment for Communication Stations

WANG Ya-ping¹, WEI Guang-hui¹, PAN Xiao-dong¹, WAN Hao-jiang¹, LI Wei¹, SHANG Zai-fei²

(1. Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Shijiazhuang Campus of

Army Engineering University, Shijiazhuang, Hebei 050003, China;

2. 9th General Training Base of Artillery Army, Zhangjiakou, Hebei 075000, China)

Abstract: The communication station will be affected by interference signals of multiple frequency in complex electromagnetic environment. Assuming the interference signal is strong enough, the communication station will be blocked even if the interference signal is out of band, which makes it unable to receive useful signal and lose combat effectiveness. The out-of-band signal needs significant energy to block receiver; so we can use vector superposition method to analyze useful signal and interference signal, from which the interference prediction model can be derived. Conducting dual-frequency interference test by two independent interference transmission system, and the system should be adjusted before the test. Taking error rate to be 0.1 and no link test as the critical interference criterion respectively, and then two independent tests are conducted. The test result shows that the presented model is able to predict whether or not the equipment under test reaches critical interference state, and the prediction error is within 2dB. This model applies to both critical interference criteria.

Key words: communication station; out-of-band interference; blocking effect; modeling

1 引言

随着战场信息化条件日益完善, 越来越多的电子信息装备应用于战斗, 造成电磁空间日趋拥挤. 通信装

备作为现代战场的信息枢纽, 极易受到敌方的有意干扰和己方的无意干扰, 因而十分有必要研究其战场生存能力^[1]. 目前存在的电磁效应试验方法是在单频干扰条件下进行的^[2], 但是空间电磁环境在频域上密集

交叠,受试设备往往受到多种形式的干扰,此时以受试装备在单一信号干扰下出现的效应作为评判标准就不够全面^[3,4]. 因为当多个干扰信号同时作用于受试设备时,在现有标准确定的安全区域内,也可能造成设备失效影响战斗进程.

对于用频装备的干扰效应问题,文献[5]对通信装备在复杂电磁环境下的适应能力,进行了相应的研究和评估. 文献[6]指出了通信电台电磁辐射效应机理及作用规律. 受试设备在多频干扰条件下生存能力的问题,文献[7,8]对无线电引信双源辐射干扰效应进行研究并给出了相应的预测方法. 现有的电磁兼容预测方法主要有机理建模法和人工智能算法^[9,10],但人工智能预测方法往往需要大量的样本数据对模型进行训练. 但电磁干扰频率可以任意组合,要穷尽所有可能的组合方式工作量巨大. 文献[11]对通信电台带内干扰建模及预测方法进行了研究,从用频装备的工作机理出发建立相应的预测模型并通过试验进行验证. 对于现有的用频装备,通信电台的频率选择特性较好,但是受滤波器边沿的陡度不佳,放大器动态范围不足等因素的影响,使得一部分带外信号仍能够通过天线耦合到接收机的射频前端,并能够通过滤波器、限幅器等对敏感器件造成影响. 如果这些信号能量足够强,能够进入信号处理电路部分,也会造成接收机阻塞,使有用信号湮没于干扰信号. 因此,有必要研究带外干扰信号对通信电台的干扰效应,并给出相对应的预测方法.

2 干扰预测模型推导

对于通信电台来说,当其受到带外信号干扰时,干扰信号经过滤波器、限幅器等一系列非线性器件后,信号强度会大幅度衰减. 如果干扰信号距离电台工作频段很近且干扰信号强度足够,而滤波器对其衰减能力有限,此时带外的干扰信号就可能进入接收机,造成阻塞干扰效应. 而能够造成阻塞干扰的信号比较大,此时接收机中的非线性元件工作于饱和、截止等特殊区域,这种强非线性称为突变非线性^[12]. 此时,按照矢量法来分析电台的阻塞效应.

假设有用信号: $u_s = U_s \cos \omega_s t$, 干扰信号为: $u_i = U_i \cos \omega_i t$. 由于其经过接收机射频前端时的增益是不同的,所以到达敏感器件的和信号可以写为:

$$u(t) = A_s U_s \cos \omega_s t + A_i U_i \cos \omega_i t \quad (1)$$

此时,按照矢量法可以将以上信号绘制于图中,如图 1 所示.

图中, $\omega_d = \omega_s - \omega_i$, 由于带外干扰信号距离工作频段较近, ω_d 与 ω_s, ω_i 一般相差三个数量级,且一般情况下干扰信号的幅度要远远大于有用信号的幅度,则 $u(t)$ 可写为

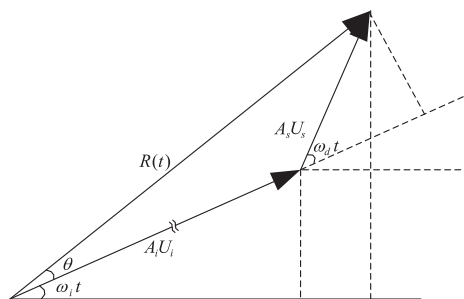


图 1 有用信号与干扰信号矢量叠加图

$$u(t) = R(t) \cos(\omega_i t + \theta) \quad (2)$$

其中:

$$R(t) = [(A_s U_s \sin \omega_s t + A_i U_i \sin \omega_i t)^2 + (A_s U_s \cos \omega_s t + A_i U_i \cos \omega_i t)^2]^{1/2} = \sqrt{A_s^2 U_s^2 + A_i^2 U_i^2 + 2A_s U_s A_i U_i \cos \omega_d t} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan \frac{A_s U_s \sin \omega_d t}{A_i U_i + A_s U_s \cos \omega_d t} \approx \frac{A_s U_s \sin \omega_d t}{A_i U_i + A_s U_s \cos \omega_d t} \approx \frac{A_s U_s \sin \omega_d t}{A_i U_i} \quad (4)$$

若接收机的限幅值为 U_m 、增益为 K , 当 $A_s U_s + A_i U_i < U_m$ 时,理想状态下输出信号幅值为 $KR(t)$, 当 $A_s U_s + A_i U_i \geq U_m$ 时,输出信号幅值为 U_m , 则此时输出信号为:

$$u(t) = U_m \cos\left(\omega_i t + \frac{A_s U_s}{A_i U_i} \sin \omega_d t\right) = \text{Re} [U_m e^{j\omega_i t} e^{j\frac{A_s U_s}{A_i U_i} \sin \omega_d t}] \quad (5)$$

经过傅里叶级数展开后,

$$u(t) = U_m \text{Re} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n \left(\frac{A_s U_s}{A_i U_i} \right) e^{j(\omega_i t + n\omega_d t)} \right] = U_m \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n \left(\frac{A_s U_s}{A_i U_i} \right) \cos(\omega_i t + n\omega_d t) \quad (6)$$

式中, J_n 为第一类 n 阶贝塞尔函数, 对上式进行展开, 由于接收机前端元件的频率选择性, 只有与有用信号相近的频率成分才能够通过, 因此 $n = 1$, 则有用信号分量为:

$$U_m J_1 \left(\frac{A_s U_s}{A_i U_i} \right) \cos(\omega_i t + \omega_d t) = \frac{U_m A_s U_s}{2A_i U_i} \cos \omega_s t \quad (7)$$

则,有用信号的增益可写为

$$K = \frac{U_m A_s U_s}{2A_s U_s A_i U_i} = \frac{U_m}{2A_i U_i} \quad (8)$$

此时有用信号的增益与限幅值 U_m 和干扰信号幅值 U_i 有关. 当干扰信号幅值足够大时,有用信号增益接近于 0, 此时即认为接收机无法接收有用信号,接收机被阻塞.

同理,两个干扰信号同时作用于受试系统时,此时,

通过天线到达接收机射频前端的信号为:

$$\mathbf{u}(t) = A_s U_s \cos \omega_s t + A_1 U_1 \cos \omega_1 t + A_2 U_2 \cos \omega_2 t \quad (9)$$

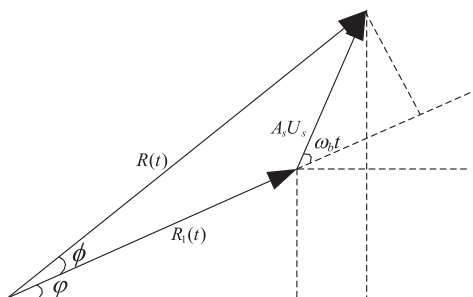


图2 有用信号与多个干扰信号叠加矢量图

依旧按照矢量法进行分析,叠加信号如图2所示。其中,

$$R_1(t) = \sqrt{(A_1 U_1)^2 + (A_2 U_2)^2 + 2A_1 U_1 A_2 U_2 \cos \omega_a t}$$

$$\varphi = \arctan \frac{A_1 U_1 \sin \omega_1 t + A_2 U_2 \sin \omega_2 t}{A_1 U_1 \cos \omega_1 t + A_2 U_2 \cos \omega_2 t} \quad (10)$$

同样, $\omega_a = \omega_1 - \omega_2$, $\omega_b t = \omega_s t - \varphi$, 且 ω_a, ω_b 与 $\omega_s, \omega_1, \omega_2$ 一般相差三个数量级。

到达敏感器件的和信号 $\mathbf{u}(t) = R(t) \cos(\phi + \varphi)$, 其中 $R(t)$ 为信号包络:

$$R(t) = \sqrt{(A_s U_s \sin \omega_b t)^2 + (R_1(t) + A_s U_s \cos \omega_b t)^2}$$

$$= \sqrt{R_1^2(t) (A_s U_s)^2 + 2A_s U_s R_1(t) \cos \omega_b t} \quad (11)$$

同时,

$$\phi = \arctan \frac{A_s U_s \sin \omega_b t \times \{ [(A_1 U_1)^2 + (A_2 U_2)^2 + 2A_1 U_1 A_2 U_2 \cos \omega_a t]^{1/2} + A_s U_s \cos \omega_b t \}^{-1/2}}{A_s U_s \sin \omega_b t \times \{ [(A_1 U_1)^2 + (A_2 U_2)^2 + 2A_1 U_1 A_2 U_2 \cos \omega_a t]^{1/2} + A_s U_s \cos \omega_b t \}^{-1/2}} \approx \frac{A_s U_s}{A_1 U_1 + A_2 U_2} \sin \omega_b t \quad (12)$$

同理,当叠加信号的幅值小于门限值 U_m 时,接收系统同时对其进行放大,放大后的信号幅值为 $KR(t)$ 。当叠加信号的幅值尤其是干扰信号的幅值远大于门限值 U_m 时,输出信号为

$$\mathbf{u}(t) = U_m \cos(\varphi + \frac{A_s U_s}{A_1 U_1 + A_2 U_2} \sin \omega_b t)$$

$$= \text{Re}[U_m e^{j\varphi} e^{\frac{jA_s U_s}{A_1 U_1 + A_2 U_2} \sin \omega_b t}] \quad (13)$$

经傅里叶级数展开后得有用信号为:

$$\frac{U_m A_s U_s}{2(A_1 U_1 + A_2 U_2)} \cos \omega_s t \quad (14)$$

则有用信号的增益为:

$$K = \frac{U_m A_s U_s}{2(A_1 U_1 + A_2 U_2) A_s U_s} = \frac{U_m}{2(A_1 U_1 + A_2 U_2)} \quad (15)$$

一般认为,用频装备的临界干扰阈值是其自身的特性,与干扰频率无关。当信号进入到接收机,对敏感元件造成影响时的阈值是一致的。因此用频装备受到不同频率的连续波干扰时,达到临界干扰状态的阈值均相等。假设两个带外干扰信号分别作用时,造成阻塞干扰所需的幅值为 U'_1, U'_2 , 而这两个信号同时作用造成接收机阻塞所需的干扰幅值为 U_1, U_2 , 则

$$A_1 U'_1 = A_2 U'_2 = A_1 U_1 + A_2 U_2 = \frac{U_m}{2K} \quad (16)$$

进一步整理可得

$$\frac{U_1}{U'_1} + \frac{U_2}{U'_2} = 1 \quad (17)$$

同理,当两个以上干扰信号同时作用于受试设备时,可将上式推广为:

$$\frac{U_1}{U'_1} + \frac{U_2}{U'_2} + \dots + \frac{U_n}{U'_n} = 1 \quad (18)$$

由此可得带外阻塞干扰预测模型:

$$S = \frac{U_1}{U'_1} + \frac{U_2}{U'_2} + \dots + \frac{U_n}{U'_n} = \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{U'_i} = 1 \quad (19)$$

通过推导以上干扰预测模型,称 S 为干扰效应预测指数。当 $S \geq 1$ 时,认为受试设备达到临界干扰状态;如果 $S < 1$,则认为受试设备虽受到一定程度的干扰但仍未被完全阻塞。

3 试验验证

3.1 试验设置

对于以上推导所得干扰预测模型,通过通信电台带外干扰试验进行验证。试验在电波暗室内进行,以排除环境中其他干扰的影响。试验采用两套独立的辐射效应试验系统,分别由信号发生器、功率放大器、定向耦合器、隔离器和辐射天线组成。信号源产生干扰信号经过功放放大后由天线辐射出去,在电波暗室内形成稳定的干扰场。功放的输出功率经定向耦合器引出由功率计读出,并且为了防止两副天线间能量互相接收反射回发射系统,在功放与定向耦合器之间隔离器。调整两副天线辐射方向,使得在接收电台处的场均匀性优于3dB。两套干扰辐射天线以及电台的发射天线、接收天线均置于电波暗室内,接收电台作为受试设备也置于电波暗室内,其工作状态由摄像头监测,并通过光纤传至电波暗室外的监视器。为了操作方便并尽可能减少人为干扰,辅助电台即发射电台、信号源、功放、隔离器、功率计、定向耦合器和监视器均置于电波暗室外工作台上。为了模拟电台远距离信号传输,在辅助电台的输出端接可调衰减器,并且将电台调整至小功率发射工作模式。试验配置如图3所示。

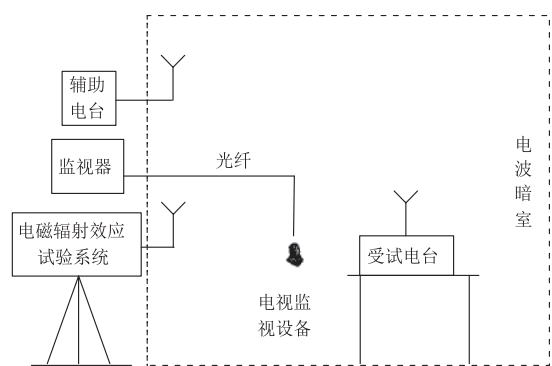


图3 试验配置

3.2 带外双频干扰试验方法

带外辐射干扰试验相比于带内试验,所需的能量大,在试验过程中首先考虑受试设备的安全性。首先需要注意频率选择问题,干扰频率选择时要避免产生三阶互调信号落于工作频带内。因为电台对带内信号灵敏度高,且相对于单纯带外双频干扰信号叠加,三阶互调信号所需的能量要小的多。确定了测试频点,根据第一节阻塞干扰预测模型,需要测试其单频敏感度。根据文献[13],选择误码率为0.1时作为判定电台达到临界干扰状态的标准。值得注意的是,在进行带外干扰试验的过程中发现,不同频点的误码率随着干扰信号的增强其变化规律是不同的。进行带内干扰试验时,随着干扰信号的增强,误码率会从无到有有一个变化过程,从而可以以误码率变化最快点作为判断标准。而带外双频干扰试验时,有的频点不具备误码率随干扰信号增大而逐渐变化的过程,这类频点的误码率会随着干扰信号的增大从无到有,一般在 10^{-3} 数量级,再稍稍增大干扰信号会直接变成接收电台收不到链路测试的状态,因而无法准确的找到误码率是0.1的位置。对于这种情况,直接选用无收链路测试作为临界干扰的标准,同时单频干扰测试和双频干扰测试都应以受试电台无收链路测试作为临界干扰的标准。

确定了临界干扰判定标准后,对试验频点进行单频干扰试验。由于两套试验设备在接收天线处产生的干扰场强不能够完全一致,为了尽量减小试验误差,设定信号源的干扰信号频率与单频试验相同,通过改变功率组合进行双频干扰试验。试验时,先在单频临界干扰阈值的基础上同时降低两个干扰信号的输出功率,之后保持一个信号功率不变,调整另一个信号的输出功率,直至达到临界干扰状态。再调整原本保持不变的信号源输出,重复以上过程,得到多次测试结果。

3.3 带外双频干扰试验

按照以上方法进行试验,选择电台的工作频率是60MHz,已知电台的工作带宽是 ± 35 kHz,为了表示方便,表中给出的双频干扰临界值,均为相对单频干扰阈

值归一化以后的值,单位是dB。选择不同的干扰频率组合进行双源干扰试验,以误码率0.1为临界干扰判别标准得到以下结果。

表1是以误码率0.1作为临界干扰标准进行的三组带外干扰试验所得结果。由表可知,带外双频干扰造成接收机阻塞时,所需能量小于单个干扰频率单独作用。当外界电磁环境复杂时,即使单一频率干扰不能对接收机造成影响,但通过多个干扰频率的共同作用也会造成阻塞效应。通过第一节模型推导可知,当 $S \geq 1$ 时判定电台达到临界干扰状态,而计算所得预测系数 S 均在1附近,预测结果的相对误差在2dB以内。由于试验误差不可避免,另外由于不同频率组合效率的问题,均会导致预测系数偏离1。

表1 以误码率0.1为临界干扰判别标准时的双频干扰试验结果

| | | 双频干扰归一化后的值 | | | |
|-----|--------------------|------------|-------|---------|-------|
| (a) | $f_1 = 60.065$ MHz | -4.40 | -5.31 | -6.62 | |
| | $f_2 = 60.080$ MHz | -7.51 | -6.51 | -5.48 | |
| | 预测系数 S | 1.02 | 1.02 | 0.999 | |
| | 相对误差 (dB) | 0.204 | 0.131 | -0.0107 | |
| (b) | $f_1 = 60.070$ MHz | -4.62 | -4.93 | -2.33 | -9.29 |
| | $f_2 = 60.075$ MHz | -4.55 | -3.55 | -6.52 | -1.54 |
| | 预测系数 S | 1.18 | 1.23 | 1.24 | 1.18 |
| | 相对误差 (dB) | 1.44 | 1.81 | 1.85 | 1.44 |
| (c) | $f_1 = 60.050$ MHz | -5.82 | -5.01 | -4.62 | -3.20 |
| | $f_2 = 60.055$ MHz | -5.38 | -5.39 | -5.39 | -7.40 |
| | 预测系数 S | 1.05 | 1.20 | 1.13 | 1.12 |
| | 相对误差 (dB) | 0.423 | 0.823 | 1.02 | 0.972 |

之后以无收链路测试为临界干扰判别标准进行双源干扰试验,对试验结果采用相同的处理方法,如表2所示。

表2是以受试电台收不到链路测试作为临界干扰判断标准进行的三组带外干扰试验所得结果。由表可知,经计算干扰预测系数 S 的值在1左右,由于试验误差和频率组合效率的原因,预测系数的相对误差在2dB以内。另外,由于以0.1作为临界干扰判定标准是根据误码率变化最快处这一原则确定,而无收链路测试对应的误码率变化过程更快,因而这两种判定标准在本质上是相同的,在使用过程中可以根据实际情况灵活选择。

表1、表2中对60.050MHz和60.055MHz这一频率组合分别按照两种临界干扰判别标准进行了干扰试验,由试验结果可以看出,无论是以误码率达到0.1为标准还是以受试电台收不到链路测试信号为标准,利

用第一节中所给出的预测方法均适用,并且试验误差在 2dB 以内. 第一节模型经过扩展可以作为任意多个频率组合干扰的预测模型,由于试验条件的限制,仅利用双频干扰试验对模型进行验证.

表 2 以无收链路测试为临界干扰判别标准时的双频干扰试验结果

| | | 双频干扰归一化后的值 | | |
|-----|--------------------------|------------|-------|-------|
| (a) | $f_1 = 60.050\text{MHz}$ | -7.20 | -1.41 | -6.32 |
| | $f_2 = 60.055\text{MHz}$ | -5.18 | -9.19 | -3.22 |
| | 预测系数 S | 0.987 | 1.20 | 1.17 |
| | 相对误差 (dB) | -0.111 | 1.56 | 1.39 |
| (b) | $f_1 = 60.070\text{MHz}$ | -5.13 | -1.51 | -4.12 |
| | $f_2 = 60.060\text{MHz}$ | -7.77 | -10.8 | -4.83 |
| | 预测系数 S | 0.963 | 1.13 | 1.20 |
| | 相对误差 (dB) | -0.329 | 1.05 | 1.55 |
| (c) | $f_1 = 60.075\text{MHz}$ | -5.28 | -4.35 | -2.89 |
| | $f_2 = 60.060\text{MHz}$ | -7.98 | -6.98 | -6.06 |
| | 预测系数 S | 0.944 | 1.05 | 1.21 |
| | 相对误差 (dB) | -0.505 | 0.455 | 1.69 |

4 结论

针对通信电台受到带外干扰时出现的阻塞效应,从其工作机理出发,研究产生阻塞效应的原因是接收机中非线性器件动态范围不足引起的.在此基础上,利用矢量法分析干扰信号与有用信号间的关系,当干扰信号足够大导致有用信号增益为 0 时,认为有用信号湮没于干扰信号中,即接收机被阻塞,从而推导出阻塞效应干扰预测模型.之后,利用两套辐射系统进行双频干扰试验,试验前首先对系统进行调整,分别以误码率 0.1 和受试电台无收链路测试作为临界干扰的判断标准进行试验.试验结果表明,该预测模型能够判断受试设备受干扰后是否到达临界干扰状态,预测误差在 2dB 以内,且对于两种临界干扰判断标准均适用.

参考文献

- [1] 魏光辉,潘晓东,万浩江. 装备电磁辐射效应规律与作用机理[M]. 北京:国防工业出版社. 2017.
Wei Guang-hui, Pan Xiao-dong, Wan Hao-jiang. Electromagnetic Radiation Effect and Mechanism of Equipment [M]. Beijing: National Defense Industry Press. 2017. (in Chinese)
- [2] GJB 151B-2013. 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S]. 2013.
GJB 151B-2013. Electromagnetic Emission and Susceptibility Requirements and Measurements for Military and Sub-

- systems[S]. 2013. (in Chinese)
- [3] Keith Armstrong. EMC for the functional safety of automobiles-why EMC testing is insufficient, and what is necessary [A]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility [C]. Detroit: IEEE, 2008. 1-6.
- [4] Mardiguian M. Combined effects of several simultaneous EMI couplings [A]. IEEE International Symposium on EMC [C]. US: IEEE, 2000. 181-184.
- [5] 荣辉,王满喜. 通信装备复杂电磁环境适应性试验评估技术[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(1): 46-47.
Rong Hui, Wang Man-xi. Test and evaluation technology of complex electromagnetic environment adaptability for communication equipment [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2017, 33(1): 46-47. (in Chinese)
- [6] 魏光辉,耿利飞,潘晓东. 通信电台电磁辐射效应机理[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2685-2692.
Wei Guang-hui, Geng Li-fei, Pan Xiao-dong. Mechanism of electromagnetic radiation effects for communication equipment [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2685-2692. (in Chinese)
- [7] 程二威,陈亚洲,田庆民,等. 无线电引信双源辐射效应研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(7): 228-232.
Cheng E W, Chen Y Z, Tian Q M, et al. Effect of dual sources irradiation on a radio fuze [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(7): 228-232. (in Chinese)
- [8] 赵国梁,魏光辉,卢新福,等. 双源正弦波对某无线电引信的辐照效应预测方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28(5): 53-56.
Zhao Guo-liang, Wei Guang-hui, Lu Xin-fu, et al. Prediction method of irradiation effects of dual Sine waves on certain radio fuze [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2014, 28(5): 53-56. (in Chinese)
- [9] Akira Ikuta, Hisako Orimoto. Static and dynamic methods for fuzzy signal processing of sound and electromagnetic environment based on fuzzy observations [J]. Computational Intelligence, 2016: 171-187.
- [10] Li Yang, Li Yahui, Han Zijiao, et al. Determination of optimal opening scheme for electromagnetic environment loop networks based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: 1-11.
- [11] Wei LI, Guanghui WEI, Xiaodong PAN, et al. Electromagnetic compatibility prediction method under the multifrequency in-band interference environment [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(2): 520-528.
- [12] 赵惠昌,张书宁. 电子对抗理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社. 2010. 127-128.
Zhao Huichang, Zhang Shuning. Electronic Confrontation

Theory and Method[M]. Beijing: National Defense Industry Press. 2010. 127 – 128. (in Chinese)

- [13] 李伟, 魏光辉, 潘晓东, 等. 典型通信装备电磁敏感度判据研究[J]. 微波学报, 2016, 32(6): 70 – 75.

Li Wei, Wei Guang-hui, Pan Xiao-dong, et al. Research on electromagnetic susceptibility criterion for typical communication equipment[J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(6): 70 – 75. (in Chinese)

作者简介



王雅平(通信作者) 女, 1989 出生, 山东莱阳人, 现为陆军工程大学石家庄校区国防科技重点实验室博士研究生, 主要从事电磁环境效应试验评估与防护方面的研究工作.

E-mail: wangxiaowang@163.com



魏光辉 男, 1964 出生, 河北宁晋人, 现为陆军工程大学石家庄校区国防科技重点实验室教授, 博导, 主要从事电磁环境模拟与测试技术、电磁环境效应试验评估技术和电磁防务理论与技术研究.

E-mail: wei-guanghui@sohu.com