

# 用频设备带外多频电磁辐射三阶互调阻塞效应测试与建模评估方法

魏光辉, 杜 雪, 王雅平

(陆军工程大学石家庄校区电磁环境效应重点实验室, 河北石家庄 050003)

**摘 要:** 针对用频设备复杂电磁环境适应性试验评估的技术需求,从场路线性耦合、电路非线性响应机理出发,引入三阶互调阻塞干扰因子,建立了三阶互调阻塞效应模型.理论推导与实验测定相结合,给出了模型参数的确定方法、三阶互调阻塞效应建模评估流程,以通信电台作为受试设备进行了实验验证.结果表明:利用在特定工作频率下测试确定的用频设备三阶互调阻塞干扰因子,假定其不随辐射干扰频偏变化,依据用频设备单频电磁辐射阻塞临界干扰场强变化曲线和环境电磁场频谱分布参数,能够准确评估用频设备的三阶互调阻塞效应,误差小于1dB.

**关键词:** 三阶互调; 阻塞效应; 电磁辐射; 建模评估; 多频干扰; 用频设备

**中图分类号:** O453, TN97      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2021)06-1094-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20200568

## Testing and Modeling Evaluation Method of Third-Order Intermodulation Blocking Effect by Outband Multifrequency Electromagnetic Radiation for Spectrum-Dependent Equipment

WEI Guang-hui, DU Xue, WANG Ya-ping

(National Key Laboratory on Electromagnetic Environment Effects, Shijiazhuang Campus,  
Army Engineering University, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

**Abstract:** Aiming at the technical requirements of the complex electromagnetic environment adaptability test and evaluation for the spectrum-dependent equipment, starting from the linear coupling of field with circuit and the nonlinear response mechanism of circuit, the third-order intermodulation blocking effect model is established by introducing the third-order intermodulation blocking interference factor. Combining theoretical derivation and experimental measurement, the method of determining model parameters and the process of modeling and evaluation of third-order intermodulation blocking effect are given, and the experimental verification is carried out using the communication radio as the equipment under test. The results show that, using the third-order intermodulation blocking interference factor of the spectrum-dependent equipment tested at a specific working frequency, assuming that it does not change with the frequency offset of the radiated interference, according to the variation curve of the critical interference field strength of the single frequency electromagnetic radiation blocking for the spectrum-dependent equipment and the distribution parameters of environmental electromagnetic field spectrum, the third-order intermodulation blocking effect of the spectrum-dependent equipment can be accurately evaluated, and the tested error is less than 1dB.

**Key words:** third-order intermodulation; blocking effect; electromagnetic radiation; modeling evaluation; multifrequency interference; spectrum-dependent equipment

### 1 引言

信息技术高速发展离不开用频设备的广泛应用,

为追求更远的作用距离、更大的空域覆盖范围,用频设备持续增加、发射功率不断增大,加剧了电磁环境的复杂性,电磁干扰日益严重.为保证设备、系统间的电磁兼

容性,国内外相继发布了一系列电磁兼容标准<sup>[1-3]</sup>,不断更新电磁兼容设计理念<sup>[4]</sup>,但均未涉及多频、噪声等复杂电磁环境对受试设备(EUT)的效应增强问题,特别是带外多频电磁辐射互调导致的用频设备阻塞、虚警等效应未能引起足够的重视.英国电磁兼容资深专家 Keith Armstrong 认为,传统电磁兼容试验采用的单源电磁辐射已不能满足 EUT 电磁兼容性与安全性试验的要求,多源电磁辐射对 EUT 的影响不容忽视<sup>[5]</sup>.Duffy 等人分别研究了同时出现的多源、多频电磁干扰的联合效应及互调问题<sup>[6-9]</sup>,但后续研究进展未见报道.国内学者从电磁干扰环境动态模拟<sup>[10]</sup>、试验技术与分析方法<sup>[11-13]</sup>等方面进行了系列研究,采用实装或半实物模拟系统构建复杂电磁环境对 EUT 进行试验评估或通过电磁仿真软件建立模型对电磁防护效果予以验证.但是,电磁环境错综复杂、模拟难以穷尽,“仿真如真”从根本上难以实现,对受试设备可能面临的任意多源、多频的电磁辐射组合情况,不可能全部通过电磁环境模拟和效应试验的方法一一进行效应测试和评价<sup>[14]</sup>,必须另辟蹊径,探索复杂电磁环境效应试验评估方法.

为解决 EUT 复杂电磁环境适应性的评估问题,国内外学者从电磁环境复杂度(客观角度)、威胁度(环境效应)两个层面进行了深入探索<sup>[15-19]</sup>,构建了评估指标体系与指标描述模型<sup>[20]</sup>.但是,由于在复杂电磁环境中用频设备不仅受到带内电磁辐射的严重威胁<sup>[21,22]</sup>,带外强场干扰<sup>[23]</sup>、互调阻塞干扰<sup>[9]</sup>也不容忽视,在缺乏 EUT 多频电磁辐射响应特性的前提下,难以准确评估 EUT 的复杂电磁环境适应性.针对上述问题,李伟等人探索了一种理论建模与典型参数测试相结合的复杂电磁环境适应性试验评估方法,建立了用频设备非互调多频阻塞效应模型,借助通信电台进行了试验验证<sup>[24-28]</sup>.对带外电磁辐射,虽然耦合效率降低,但不同频率的干扰信号会互相调制,若互调频率落入 EUT 的敏感工作频带内,使 EUT 产生互调阻塞干扰的辐射场强将远低于单频阻塞临界干扰场强,必须引起足够的重视.

针对用频设备带外多频电磁辐射三阶互调阻塞效应量化评估的技术需求,首先通过电路非线性响应互调机理分析,建立互调阻塞效应模型,给出实验测定模型参数的方法;然后以超短波军用通信电台作为 EUT,试验研究带外多频三阶互调阻塞效应规律,确定三阶互调阻塞效应模型参数,实验验证建模评估方法的科学性和效应模型的准确性;最后给出三阶互调阻塞效应建模评估流程,为科学评价用频设备的复杂电磁环境适应性提供理论和技术支撑.

## 2 三阶互调阻塞干扰效应建模方法

三阶互调源于 EUT 信号处理电路对多频信号的非

线性响应,当带外双频或三频信号的三阶互调新频率进入 EUT 的敏感工作频带时,该信号与带内单频信号一样,能够导致 EUT 出现阻塞干扰.

### 2.1 三阶互调阻塞干扰效应模型

设空间电磁辐射场强为  $E_i(f_i)$ 、信号场路耦合及到达非线性器件前的传递函数为  $A_i(f_i)$ ,则信号到达非线性器件时的电平为:

$$S_i(f_i) = A_i(f_i)E_i(f_i) \quad (1)$$

其中: $i=0$  表示与受试用频设备工作频率相同的信号, $i$  为其它值分别代表带内、带外干扰信号.

若工作频率  $f_0$  时受试设备的敏感系数为  $B_i(f_i)$ 、单频电磁辐射临界干扰场强为  $E_{0i}(f_i)$ 、敏感元件处的临界干扰电平为  $C_0$ , $C_0$  仅与  $f_0$  有关,与干扰频率  $f$  相关的变化因素均包含在敏感系数  $B_i(f_i)$  中,则:

$$A_1 B_1 E_{10} = A_2 B_2 E_{20} = \dots = A_0 B_0 E_{00} = C_0 \quad (2)$$

考虑到受试用频设备选频特性强、敏感工作频带宽度有限,带外干扰信号  $f_1$ 、 $f_2$  产生的三阶互调信号落入受试用频设备敏感工作频带内并导致阻塞效应主要有二种组合,即  $2f_1 - f_2$  或  $2f_2 - f_1$ .  $2f_1 + f_2$ 、 $2f_2 + f_1$  或  $3f_1$ 、 $3f_2$  落入受试用频设备敏感工作频带内导致阻塞效应的概率比二阶互调信号还要小很多,不予考虑.

不失一般性,设  $2f_1 - f_2$  落入受试用频设备敏感工作频带内,带外信号  $f_1$ 、 $f_2$  的三阶互调信号可表示为:

$$\varphi_3(2f_1 - f_2) = D(f_0)S_1^2(f_1)S_2(f_2) \quad (3)$$

其中  $D(f_0)$  是与受试用频设备工作频率  $f_0$  有关的三阶互调非线性系数.

只有三阶互调干扰信号大于等于受试设备单频临界干扰电平时才能出现三阶互调阻塞干扰.一般情况下,将三阶互调干扰电平值与单频临界干扰电平值  $C_0$  的比值定义为三阶互调阻塞效应指数  $R_3$ ,当  $R_3 \geq 1$  时出现三阶互调阻塞干扰.令  $f = 2f_1 - f_2$  代表三阶互调频率,联立式(1)~式(3)求解可得:

$$\begin{aligned} R_3(2f_1 - f_2) &= \frac{B_f(2f_1 - f_2)\varphi_3(2f_1 - f_2)}{C_0} \\ &= B_f \frac{C_0^2 D}{B_1^2 B_2} \left(\frac{E_1}{E_{10}}\right)^2 \left(\frac{E_2}{E_{20}}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

考虑到用频设备敏感工作频带很窄,忽略带内信号传递函数  $A_i(f_i)$  的差异,由式(2)可得:

$$B_0 E_{00} = B_f E_{f_0} \quad (5)$$

引入三阶互调阻塞干扰因子  $\alpha$ ,综合描述 EUT 信号处理电路的非线性和阻塞效应敏感性, $\alpha$  取值越大,EUT 在相应频点产生的非线性失真越严重、与其它频点联合产生三阶互调阻塞效应的概率越大.令:

$$\alpha_i = (C_0^2 B_0 D)^{\frac{1}{3}} / B_i \quad (6)$$

联立求解式(4)~(6),则三阶互调阻塞效应指数

$R_3$ 可表示为:

$$R_3(2f_1 - f_2) = \alpha_1^2 \alpha_2 \frac{E_{00}}{E_{f_0}} \left( \frac{E_1}{E_{10}} \right)^2 \left( \frac{E_2}{E_{20}} \right) \quad (7)$$

若三个带外干扰信号  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  产生的三阶互调信号落入受试用频设备敏感工作频带内频点  $f$ , 同理可得三阶互调阻塞效应指数  $R_3$  的表示式为:

$$R_3(f) = 2\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{E_{00}}{E_{f_0}} \frac{E_1}{E_{10}} \frac{E_2}{E_{20}} \frac{E_3}{E_{30}} \quad (8)$$

式(7)、式(8)分别称为带外双频、三频信号产生的三阶互调阻塞效应模型。从推导过程可以看出:三阶互调阻塞干扰因子  $\alpha_i$  与受试设备工作频率  $f_0$  和干扰频率  $f_i$  有关。由于用频设备输入信号经本振混频后均移频至中频进行信号处理, 作为工程近似, 可认为三阶互调阻塞干扰因子  $\alpha_i$  仅随辐射频偏  $\Delta f_i = f_i - f_0$  变化。

## 2.2 三阶互调阻塞干扰因子的确定方法

三阶互调阻塞干扰因子  $\alpha_i$  是 EUT 的基本属性, 理论计算或仿真分析需要用到相关元器件的非线性参数、EUT 的电磁辐射敏感参数, 客观上难以实现; 但是, 基于 EUT 的临界电磁辐射阻塞效应试验数据, 依据三阶互调阻塞效应模型式(7), 能够方便的计算确定  $\alpha_i$ 。

由于式(7)中涉及 2 个未知数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ , 而每增加 1 个干扰频点增加 1 个未知数, 因此, 应至少选择三个带外干扰频点作为基础频点, 使其两两组合的三阶互调信号频率落入受试用频设备敏感工作频带内, 通过 3 组临界阻塞效应试验, 才能同时确定 3 个基础频点的辐射频偏对应的三阶互调阻塞干扰因子。

设带外基础频点  $f_1 = f_0 \pm \Delta$ ,  $f_2 = f_0 \pm x\Delta$ ,  $f_3 = f_0 \pm 2\Delta$ , 三个等式中同时取“+”号或“-”号, 则  $2f_1 - f_2 = f_0 \pm (2-x)\Delta$ ,  $2f_1 - f_3 = f_0 \pm 2(x-1)\Delta$ , 为尽量减少未知量, 取  $x = 4/3$ , 则三阶互调信号频率分别为  $f_0 \pm 2\Delta/3$ 、 $f_0$ 、 $f_0 \pm 2\Delta/3$ 。

选择上述任意 2 个带外基础频点组合, 分别调节各自的单频电磁辐射干扰场强使受试用频设备出现临界阻塞干扰。双频阻塞临界干扰场强组合分别为:  $E_1(f_1, f_2)$ 、 $E_2(f_1, f_2)$ ;  $E_1(f_1, f_3)$ 、 $E_3(f_1, f_3)$ ;  $E_2(f_2, f_3)$ 、 $E_3(f_2, f_3)$ ; 由式(7)可得:

$$\alpha_1^2 \alpha_2 \frac{E_{00}}{E_{f_0}} \left[ \frac{E_1(f_1, f_2)}{E_{10}} \right]^2 \frac{E_2(f_1, f_2)}{E_{20}} = 1 \quad (9)$$

$$\alpha_1^2 \alpha_3 \left[ \frac{E_1(f_1, f_3)}{E_{10}} \right]^2 \frac{E_3(f_1, f_3)}{E_{30}} = 1 \quad (10)$$

$$\alpha_2^2 \alpha_3 \frac{E_{00}}{E_{f_0}} \left[ \frac{E_2(f_2, f_3)}{E_{20}} \right]^2 \frac{E_3(f_2, f_3)}{E_{30}} = 1 \quad (11)$$

其中,  $E_{00}$ 、 $E_{f_0}$ 、 $E_{10}$ 、 $E_{20}$ 、 $E_{30}$  分别代表干扰频率  $f_0$ 、 $f = f_0 \pm 2\Delta/3$ 、 $f_1 = f_0 \pm \Delta$ 、 $f_2 = f_0 \pm 4\Delta/3$ 、 $f_3 = f_0 \pm 2\Delta$  对应的单频阻塞临界干扰场强。

联立求解式(9)~(11)即可求出 3 个基础频点辐射频

偏  $\pm\Delta$ 、 $\pm 4\Delta/3$ 、 $\pm 2\Delta$  对应的三阶互调阻塞干扰因子  $\alpha_i$ 。

利用基础频点  $f_3$  (或  $f_2$ ) 与其它带外干扰频率  $f_4$  组合, 使  $f = 2f_3 - f_4$  落入受试用频设备的敏感工作频带内, 分别调节 2 个干扰信号的辐射场强使受试设备出现临界阻塞干扰, 此时, 干扰场强组合为  $E_3(f_3, f_4)$ 、 $E_4(f_3, f_4)$ , 由式(7)可得:

$$\alpha_3^2 \alpha_4 \frac{E_{00}}{E_{f_0}} \left[ \frac{E_3(f_3, f_4)}{E_{30}} \right]^2 \frac{E_4(f_3, f_4)}{E_{40}} = 1 \quad (12)$$

利用式(12)即可求出辐射频偏  $f_4 - f_0$  对应的三阶互调阻塞干扰因子  $\alpha_4$ 。以此类推, 利用已确定三阶互调阻塞干扰因子的带外频点与其它频点组合, 借助三阶互调临界阻塞效应测试, 即可求出待测频点辐射频偏对应的三阶互调阻塞干扰因子。

## 3 通信电台三阶互调阻塞干扰因子测定

为准确测试通信电台的电磁辐射效应, 尽量降低测试环境背景噪声对测验结果的影响, 在多功能屏蔽室内营造试验所需的电磁环境。受试电台置于干扰天线主波束内, 使受试电台主机及其接收天线范围内的电场均匀性优于 3dB<sup>[3]</sup>, 电视监视设备聚焦受试电台显示屏且偏离辐射主波束, 用于监视受试电台接收链路测试情况, 辅助电台天线置于多功能屏蔽室内, 其余试验设备置于多功能屏蔽室外便于试验操作, 如图 1 所示, 为尽量降低电磁干扰辐射场中的互调分量, 双频干扰信号分别由两套独立的电磁辐射系统产生, 且在每套系统的功率放大器与干扰天线之间均串接隔离器 (图中未画出); 单频电磁辐射效应试验时, 闲置电磁辐射系统的射频信号源处于输出关闭状态。为模拟通信电台信号强度随距离衰减情况, 试验过程中, 在辅助电台输出端口接 40dB 衰减器, 再馈入发射天线 (相当于通信距离 500m 左右), 辐射过程中完成链路测试, 误码率和阻塞率在发射电台显示屏上读出。

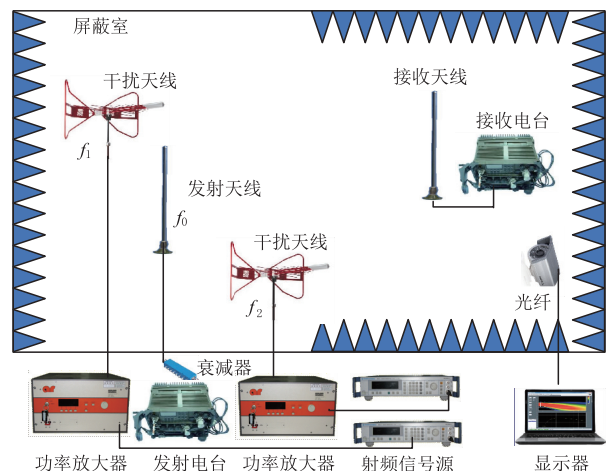


图1 电磁辐射效应试验配置

效应试验过程中,以电台发射链路测试所得误码率大于等于 10% 作为受试电台出现阻塞效应的判据<sup>[29]</sup>,采用变步长效应试验方法确定受试电台的临界干扰辐射场强<sup>[14]</sup>. 由于光纤场强计在 1V/m 以下测试误差急剧增大,为保证环境场强测量的准确性,当环境场强高于 5V/m 时,直接利用场强计测量试验区域内的电场强度. 当环境场强低于 5V/m 时,采用线性内推方法测量. 首先测量与 10V/m 左右辐射场强  $E_0$  对应的辐射功率  $P_0$ ,在不改变测试系统与受试对象相对位置的情况下,调节测试系统辐射功率  $P$ ,测试环境辐射场强  $E$  与系统辐射功率  $P$  的对应关系为:

$$E = E_0 + P - P_0 \quad (13)$$

式中: $E$ 、 $E_0$  和  $P$ 、 $P_0$  分别以 dBV/m、dBm 为单位.

### 3.1 单频电磁辐射阻塞临界干扰场强

受试超短波通信电台以  $f_0 = 60\text{MHz}$  工作时的单频阻塞临界干扰场强随辐射频偏( $f_i - f_0$ )的变化曲线如图 2 所示,电磁辐射敏感频点处于  $f_0 \pm 30\text{kHz}$  的范围内,辐射频偏处于  $\pm(25 \sim 35)\text{kHz}$  范围时,临界干扰场强随辐射频偏剧烈变化;辐射频偏处于  $\pm(35 \sim 80)\text{kHz}$  及大于  $80\text{kHz}$  范围时,临界干扰场强出现两个明显的台阶,这是由受试电台滤波器、检波器的选频特性决定的.

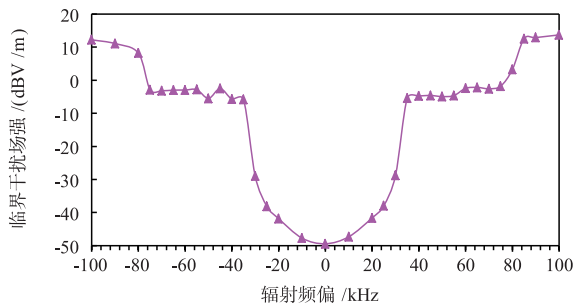


图2 受试通信电台单频阻塞临界干扰场强

### 3.2 基础频点的三阶互调阻塞干扰因子

根据受试超短波通信电台单频阻塞临界干扰场强测试结果,为保证所选基础频点  $f_1 = f_0 + \Delta$ 、 $f_2 = f_0 + 4\Delta/3$ 、 $f_3 = f_0 + 2\Delta$  均处于临界干扰场强变化曲线的带外平坦区域,且它们两两作用产生的三阶互调频率均落于临界干扰场强变化曲线带内相对平坦的区域,以降低受试设备稳定性对测试误差的影响,取  $\Delta = 36\text{kHz}$ ,基础频点辐射频偏  $f_i - f_0$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 分别等于  $36\text{kHz}$ 、 $48\text{kHz}$  和  $72\text{kHz}$ ,均处于单频阻塞临界干扰场强变化曲线的第一个平坦台阶内;而三阶互调频率分别为  $f_0 + 24\text{kHz}$ 、 $f_0$ 、 $f_0 + 24\text{kHz}$ ,对应频点附近的单频阻塞干扰临界场强变化相对平缓,满足频点选择要求.

三阶互调阻塞效应测试时,首先采用其中一套电磁辐射系统测试确定受试通信电台工作频率  $f_0$  和拟产生的三阶互调新频率  $f$  对应的单频阻塞临界干扰场强

之比  $E_{00}/E_{f_0}$ ;然后,分别采用两套电磁辐射系统产生相应的电磁辐射信号,调节干扰信号输出强度组合使受试通信电台处于临界阻塞干扰状态,记录临界干扰场强(辐射功率)组合( $E_1, E_2$ );保持试验状态不变,分别用互调阻塞效应测试时所用的电磁辐射系统测试确定受试通信电台的单频阻塞临界干扰场强( $E_{10}, E_{20}$ );最后,按式(9)~(11)给出的方法计算基础频点的三阶互调阻塞干扰因子. 通信电台工作频率  $60\text{MHz}$  时,基础频点双频三阶互调阻塞临界干扰场强组合测试结果如表 1 所示,三阶互调阻塞干扰因子计算结果如表 2 所示,三次测试结果的一致性很好,误差在 1% 左右.

表 1 基础频点三阶互调阻塞临界干扰测试结果

$E_{00}/E_{f_0}$ (dB)	分组 $\Delta f_i/\text{kHz}$	$E_i/E_{i0}$ (dB)		
		1	2	3
-10.2	$\Delta f_2 = 48$	-10.84	-12.96	-10.00
	$\Delta f_1 = 36$	-8.66	-7.65	-8.26
0	$\Delta f_3 = 72$	-13.22	-15.32	-11.92
	$\Delta f_1 = 36$	-11.68	-10.67	-7.42
-10.2	$\Delta f_3 = 72$	-10.00	-17.32	-14.24
	$\Delta f_2 = 48$	-8.26	-9.67	-6.23

表 2 三阶互调阻塞干扰因子计算结果

$\Delta f_i/\text{kHz}$	36	48	72
1	4.35	4.38	3.57
2	4.35	4.43	3.60
3	4.31	4.37	3.66
平均值	4.34	4.39	3.61

### 3.3 外推频点的三阶互调阻塞干扰因子

为尽量降低外推过程中的累积误差,首先选择频偏为基础频点二倍频偏对应的频点进行试验,使三阶互调频率正好落在工作频点上,确定频偏  $96\text{kHz}$ 、 $144\text{kHz}$  对应的三阶互调阻塞干扰因子. 然后,根据测试数据变化情况,以上述 5 个频偏对应的三阶互调阻塞干扰因子测试结果为基础,与其他频点进行三阶互调阻塞效应测试,确定其他频偏值对应的三阶互调阻塞干扰因子,使干扰因子平缓变化直至接近于 1 终止测试,结果如表 3 所示,表中给出了 3 次测试的均值、最大和最小值,最大误差小于 15%.

表 3 其他频偏三阶互调阻塞干扰因子测试结果

$\Delta f_i/\text{kHz}$	86	96	106	116	124	134	144
均值	10.1	12.2	11.8	14.2	21.0	22.3	29.4
最大值	10.7	12.5	12.0	14.4	21.2	23.7	30.1
最小值	9.6	12.0	11.7	14.1	20.7	21.3	28.6
$\Delta f_i/\text{kHz}$	154	164	182	192	212	268	288
均值	34.9	31.0	20.2	17.8	12.2	3.81	1.74
最大值	36.1	32.9	21.0	19.5	14.4	4.01	1.76
最小值	34.1	27.8	19.6	16.8	11.0	3.69	1.72

根据表 2、表 3 测试计算结果,绘制受试通信电台三阶互调阻塞干扰因子随辐射频偏的变化曲线如图 3

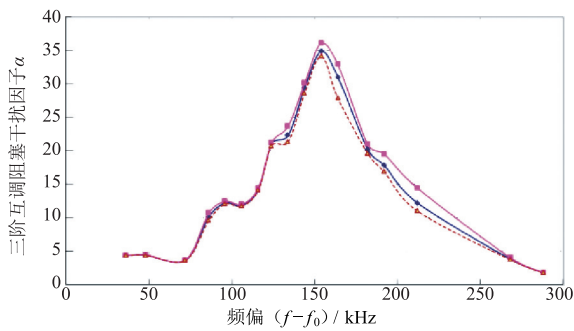


图3 受试电台三阶互调阻塞干扰因子随辐射频偏的变化

所示,随辐射频偏的增加,三阶互调阻塞干扰因子先缓慢变化再迅速增加直至最大值,频偏大于 160kHz 后,三阶互调阻塞干扰因子随辐射频偏增加而单调减小,频偏大于 300kHz 后,三阶互调阻塞干扰因子已接近于 1,可不再考虑三阶互调阻塞效应。

三阶互调阻塞干扰因子随辐射频偏的变化规律综合反映了 EUT 信号处理电路的非线性与阻塞效应敏感属性,从式(6)可以看出,它正比于信号处理电路的三阶互调非线性系数  $D$  的立方根、反比于 EUT 的阻塞效应敏感系数  $B_i(f_i)$ 。用频设备选频特性强,如图 2 所示,在敏感工作频带内 EUT 的阻塞效应敏感系数  $B_i(f_i)$  很大,偏离敏感工作频带后,随辐射频偏增大迅速减小并逐渐达到稳定值,该因素导致三阶互调阻塞干扰因子随辐射频偏增大而增大并逐步达到稳定值;但是,信号处理电路的三阶互调非线性系数  $D$  与 EUT 的滤波特性紧密相关,在带通向带阻过渡的频率范围内,三阶互调非线性系数  $D$  随辐射频偏增大而迅速增大,一旦到达阻带过渡频率范围内,通过的信号幅度迅速下降,以环境辐射场强表征的非线性系数  $D$  则迅速减小,导致三阶互调阻塞干扰因子随辐射频偏增大而迅速减小。EUT 阻塞效应敏感性与信号处理电路非线性共同作用的结果导致 EUT 的三阶互调阻塞干扰因子随辐射频偏增大先迅速上升、到达峰值后再迅速下降。图 3 中频偏 72 ~ 116kHz 的变化台阶与图 2 中的变化台阶对应,反映了 EUT 辐射敏感度的变化。

#### 4 三阶互调阻塞效应评估流程与实验验证

根据上述理论推导建立的三阶互调阻塞效应模型式(7)、式(8)和三阶互调阻塞干扰因子测试过程,总结归纳用频设备三阶互调阻塞效应评估流程并进行试验验证。

##### 4.1 用频设备三阶互调阻塞干扰效应评估流程

首先利用单频电磁辐射效应试验方法测试确定 EUT 的单频阻塞临界干扰场强随辐射频偏  $(f-f_0)$  的变化曲线<sup>[22]</sup>。然后按照 2.2 节给定的规则,从临界干扰场强曲线上选出靠近工作频点的三个带外基础频点,两两组合分别进行双频三阶互调阻塞效应试验,测定临

界干扰场强组合  $[E_1(f_1, f_2), E_2(f_1, f_2)]$ 、 $[E_1(f_1, f_3), E_3(f_1, f_3)]$  和  $[E_2(f_2, f_3), E_3(f_2, f_3)]$ ;按照式(9) ~ (11)联立求解三个基础频点对应频偏的三阶互调阻塞干扰因子。第三,基础频点与其 2 倍频偏的带外频点组合,进行双频三阶互调临界阻塞效应试验,再确定更大频偏的 2 个三阶互调阻塞干扰因子;这 2 个频点与其他带外频点相结合,使其三阶互调频率落入受试用频设备敏感工作频带内,进行双频三阶互调临界阻塞效应试验,确定不同频偏对应的三阶互调阻塞干扰因子,依此类推,确定三阶互调阻塞干扰因子随辐射频偏的变化曲线。最后,根据测定或给定的环境电磁辐射参数(频率、场强)、单频电磁辐射临界干扰场强和三阶互调阻塞干扰因子测试数据,按照式(7)或式(8)给出的三阶互调阻塞效应模型进行复杂电磁环境适应性评估。若效应指数  $R_3 \geq 1$ ,则受试用频设备出现三阶互调阻塞干扰,反之,能够正常工作。

##### 4.2 试验验证

利用受试通信电台在工作频率 60MHz 测试确定的三阶互调阻塞干扰因子,假定其随电磁辐射频偏的变化规律不受电台工作频率影响,改变受试通信电台工作频率为 70MHz,测试其双频三阶互调阻塞干扰临界电场强度组合,按式(7)计算三阶互调阻塞效应指数  $R_3$ ,验证效应评估的准确性,结果如表 4 所示。

表 4 三阶互调阻塞效应评估模型实验验证

$E_{00}/E_{f0}$ (dB)	分组 $\Delta f_i/\text{kHz}$	$E_i/E_{i0}$ (dB)		
		1	2	3
-10.3	$\Delta f_2 = 48$	-11.11	-15.06	-13.34
	$\Delta f_1 = 36$	-7.39	-5.40	-6.43
	$R_3$	1.28	1.29	1.24
0	$\Delta f_2 = 72$	-18.03	-19.92	-21.82
	$\Delta f_1 = 36$	-8.42	-7.43	-6.41
	$R_3$	1.23	1.24	1.26
0	$\Delta f_2 = 96$	-20.95	-25.17	-27.26
	$\Delta f_1 = 48$	-12.05	-10.09	-9.08
	$R_3$	1.31	1.27	1.26
-1.4	$\Delta f_2 = 154$	-25.47	-27.48	-29.54
	$\Delta f_1 = 72$	-13.96	-13.27	-11.97
	$R_3$	0.83	0.77	0.82
-2.3	$\Delta f_2 = 134$	-24.24	-26.26	-28.08
	$\Delta f_1 = 72$	-11.04	-10.01	-9.04
	$R_3$	1.08	1.08	1.10
-7.6	$\Delta f_2 = 164$	-22.75	-24.68	-26.91
	$\Delta f_1 = 72$	-10.05	-9.05	-8.05
	$R_3$	1.21	1.22	1.19

上述实验验证既包括了基础频点(频偏 36kHz、48kHz 和 72kHz)、干扰因子变化平缓频点(频偏 96kHz),也包括了最大变化频段(频偏 134kHz、154kHz、164kHz),效应指数在 0.77 ~ 1.31 之间、加权平均值

1.15, 评估误差小于 1dB, 验证了三阶互调阻塞效应模型的准确性。

## 5 结论

三阶互调阻塞效应的根源在于用频设备射频信号处理电路的非线性。本文从阻塞干扰效应机理和射频信号处理电路非线性规律出发, 引入三阶互调阻塞干扰因子  $\alpha$ 、三阶互调阻塞效应指数  $R_3$ , 通过理论推导建立了三阶互调阻塞效应模型, 给出了模型参数的实验确定方法和用频设备三阶互调阻塞干扰效应评估流程, 以通信电台作为受试对象, 验证了效应评估方法的准确性。主要研究结论如下:

(1) 三阶互调阻塞干扰因子  $\alpha$  随辐射频偏的变化规律是 EUT 的基本属性, 综合反映了 EUT 射频信号处理电路的非线性与阻塞效应敏感性, 能够通过双频三阶互调临界阻塞效应测试计算确定;

(2) 在特定工作频率下测试确定 EUT 的三阶互调阻塞干扰因子  $\alpha$ , 假定其随辐射频偏的变化规律与 EUT 的工作频率无关, 符合 EUT 的实际情况;

(3) 利用环境电磁辐射参数(频率、场强)、单频电磁辐射临界干扰场强和 EUT 的三阶互调阻塞干扰因子  $\alpha$ , 能够定量评估 EUT 的三阶互调阻塞效应, 误差在 1dB 以内。

## 参考文献

- [1] MIL-STD-461G, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment[S].
- [2] MIL-STD-464C, Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems[S].
- [3] GJB8848-2016, 系统电磁环境效应试验方法[S].
- [4] 赵岐城. 论电磁兼容性设计理念[J]. 电子学报, 2020, 48(2): 238-242.  
ZHAO Qi-cheng. Design concept of electromagnetic compatibility[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(2): 238-242. (in Chinese)
- [5] Armstrong K. EMC for the functional safety of automobiles—Why EMC testing is insufficient, and what is necessary[A]. IEEE International Symposium on EMC [C]. Detroit; IEEE, 2008. Part 1-6.
- [6] Duffy A, Orlandi A, Nisanghi H, et al. Signal integrity testing using multiple out-of-band sources in a reverberation chamber[A]. IEEE International Symposium on EMC [C]. Detroit; IEEE, 2008. Part 1-5.
- [7] Duffy A, Orlandi A, Armstrong K. Preliminary study of a reverberation chamber method for multiple-source testing using intermodulation[J]. IET Science, Measurement and Technology, 2010, 4(1): 21-27.
- [8] Mardiguian M. Combined effects of several simultaneous EMI couplings[A]. IEEE International Symposium on EMC [C]. Washington; IEEE, 2000. 181-184.
- [9] Chang W T, Kuei-jie T, Lai S H. Electromagnetic intermodulation interference using quartz oscillator[A]. Frequency Control Symposium. [C]. Taipei, China; IEEE, 2014. 1-5.
- [10] GUO Shuxia, DONG Zhongyao, HU Zhantao, et al. Simulation of dynamic electromagnetic interference environment for unmanned aerial vehicle data link[J]. China Communication, 2013, 10(7): 19-28.
- [11] 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)
- [12] 陈新来, 刘尚富. 复杂战场电磁环境对通信设备的影响及对策研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(6): 173-175.  
CHEN Xin-lai, LIU Shang-fu. Influence of complex battlefield electromagnetic environment on communication equipment and countermeasures[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(6): 173-175. (in Chinese)
- [13] 路延, 贾翠霞, 唐晓斌. 典型通信装备复杂电磁环境电磁防护技术研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(7): 739-742.  
LU Yan, JIA Cui-xia, TANG Xiao-bin. Research on electromagnetic protection technology of complex electromagnetic environment of typical communication equipment[J]. Journal of CAEIT, 2019, 14(7): 739-742. (in Chinese)
- [14] 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, 2018. 196-198, 61-64.
- [15] 王伦文, 孙伟, 潘高峰. 一种电磁环境复杂度快速评估方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2942-2947.  
WANG Lunwen, SUN Wei, PAN Gaofeng. An evaluating quickly method for electromagnetic environment complexity[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12): 2942-2947. (in Chinese)
- [16] ZHANG H J, WANG Y T, WANG S T, et al. Prediction analysis of electromagnetic interference based on gray prediction theory[J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 44-47: 3731-3735.
- [17] WANG Guosheng, QI Zongfeng. AHP effectiveness evaluation of electronic warfare command and control system under complex electromagnetic[J]. Advanced Materials Research, 2014, 989-994: 3212-3215.

- [18] YAN Liping, ZHAO Xiang, ZHAN Hang, et al. Artificial neural network modeling of electromagnetic interference caused by nonlinear devices inside a metal enclosure[J]. Journal of Electromagnetic Waves & Application, 2015, 29(8): 992 - 1004.
- [19] 付松. 一种基于“四域特征”的复杂电磁环境多层次评估方法[J]. 电讯技术, 2020. kns.cnki.net/kcms/detail/51.1267.TN.20200608.1542.002.html, 2020-07-15.
- [20] 柯宏发, 杜红梅, 赵继广, 等. 电子设备复杂电磁环境适应性试验与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015. KE Hongfa, DU Hongmei, ZHAO Jiguang, et al. Test and Evaluation on Adaptability of Electronic Equipment to Complex Electromagnetic Environment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [21] Teneng S K, Robert R Z. Empirical investigation of wireless sensor network performance in noisy environments[J]. Journal of Engineering, Design and Technology, 2014, 12(1): 29 - 38.
- [22] 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 Guanghui, GENG Lifei, PAN Xiaodong. Mechanism of electromagnetic radiation effects for communication radio[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2685 - 2692. (in Chinese)
- [23] 王雅平, 魏光辉, 潘晓东, 等. 通信电台带外连续波强场辐照重启效应分析[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(4): 043201. WANG Yaping, WEI Guanghui, PAN Xiaodong, et al. Analysis on restart effect of communication radio under strong field irradiation interference of out-band continuous wave[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(4): 043201. (in Chinese)
- [24] 李伟, 魏光辉, 王雅平, 等. 某型通信装备带内多频电磁环境生存能力预测[J]. 高电压技术, 2017, 43(8): 2680 - 2688. LI Wei, WEI Guanghui, WANG Yaping, et al. Survivability forecasting method for typical communication equipment under the in-band multi-frequency electromagnetic environment[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2680 - 2688. (in Chinese)
- [25] 李伟, 魏光辉, 潘晓东, 等. 复杂电磁环境下通信装备干扰预测方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(11): 2782 - 2789. LI Wei, WEI Guanghui, PAN Xiaodong, et al. Interference prediction method of communication equipment under complex electromagnetic environment[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(11): 2782 - 2789. (in Chinese)
- [26] 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.
- [27] 王雅平, 魏光辉, 潘晓东, 等. 通信电台带外双频干扰预测模型与试验[J]. 电子学报, 2019, 47(4): 826 - 831. WANG Ya-ping, WEI Guan-ghui, PAN Xiao-dong, et al. Out-of-band dual frequency jamming prediction model and experiment for communication stations[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(4): 826 - 831. (in Chinese)
- [28] 李伟, 魏光辉, 孙梳清, 等. 通信设备随机噪声电磁辐射效应预测方法[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(11): 1167 - 1172. LI Wei, WEI Guanghui, SUN Shuqing, et al. Electromagnetic radiation effect prediction of random noise for communication equipment[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(11): 1167 - 1172. (in Chinese)
- [29] 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 Guanghui, PAN Xiaodong, et al. Research on electromagnetic susceptibility criterion for typical communication radio[J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(6): 70 - 75. (in Chinese)

#### 作者简介



**魏光辉** 男, 1964 年生于河北宁晋, 1987 年毕业于南开大学, 获理学硕士学位, 现为陆军工程大学石家庄校区教授、博士生导师, 主要研究方向为静电与电磁防护技术、电磁环境效应试验评估技术。  
E-mail: wei-guanghui@sohu.com



**杜雪** 女, 1991 年生于河北邯郸, 博士研究生, 主要研究方向为电磁环境效应试验评估技术。  
E-mail: duxue\_xdd@163.com



**王雅平** 女, 1989 年生于山东莱阳, 博士, 讲师, 主要研究方向为电磁环境效应试验评估技术。  
E-mail: wangxiaowang@163.com