

复杂电磁环境下通信装备干扰预测方法

李伟^① 魏光辉^① 潘晓东^① 王雅平^① 万浩江^① 孙梳清^②

^①(军械工程学院电磁环境效应国家级重点实验室 石家庄 050003)

^②(中国人民解放军61469部队 石家庄 050000)

摘要: 该文通过通信装备带内电磁干扰效应机理研究,分别以峰值场强敏感和平均功率敏感为基础,建立了两种用频装备带内多频电磁干扰预测模型,提出一种电磁干扰预测方法。首先通过单频和调幅波试验确定受试装备的敏感参量,然后根据不同敏感参量模型对某电磁环境下受试装备是否会受到干扰进行预测。该文以不同制式通用通信装备为试验对象,通过带内双频、带内三频电磁辐射效应试验对预测方法进行了验证。试验结果表明:通过单频和调幅连续波电磁辐射敏感度之间的差别能够区分受试设备符合哪种带内多频电磁干扰预测模型,对干扰峰值场强敏感的EUT1预测模型效应指数都略大于1,对干扰平均功率敏感的EUT2预测模型效应指数都在1左右。以此为基础提出了通信装备带内多频电磁干扰预测方法,能够有效解决通信装备带内多频电磁干扰预测问题。

关键词: 复杂电磁环境; 效应预测; 电磁干扰; 带内; 多频

中图分类号: TM937

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)11-2782-08

DOI: 10.11999/JEIT170107

Interference Prediction Method of Communication Equipment Under Complex Electromagnetic Environment

LI Wei^① WEI Guanghui^① PAN Xiaodong^① WANG Yaping^①

WAN Haojiang^① SUN Shuqing^②

^①(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment Effects, College of Ordnance Engineering, Shijiazhuang 050003, China)

^②(Unit 61469 of the PLA, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The communication equipment effect mechanism under in-band electromagnetic interference is studied in this paper. Two electromagnetic interference prediction models are established. One model is based on the assumption that in-band interference is sensitive to the amplitude of field strength, and the other is based on the assumption that in-band interference is sensitive to the average power. The sensitive parameter can be distinguished by sine and AM test, and the Equipment Under Test (EUT) interference is predicted according to different models. The sine and AM continuous wave test, in-band dual-frequency test, in-band triple-frequency test are conducted with two typical VHF radios as test objects. Experiment results show that EUT1 is sensitive to the amplitude of field strength, and the model results are slightly greater than 1, and EUT2 is sensitive to the average power. The model results are all approximate 1. The prediction method of in-band multi-frequency electromagnetic interference is modified and improved by the test results. The proposed prediction method is able to forecast the communication equipment interference effectively under the in-band multi-frequency electromagnetic environment.

Key words: Complex electromagnetic environment; Effect prediction; Electromagnetic interference; In-band; Multi-frequency

1 引言

随着科学技术的飞速发展,大功率用频设备不断增多,电磁频谱作为重要的战略资源日益拥挤。在一个集团军的作战区域内,敌我双方的无线电通

信设备达万余部^[1],通信装备在这种复杂电磁环境下面临严峻考验。GJB151B-2013^[2]中给出的电磁干扰标准与极限都是在设备面临单源单频辐射下得到的,但是战场电磁环境下用频装备往往在单源辐射评估的安全范围内就会受到干扰。目前国内外学者都指出了这个问题^[3-5],但是还没有具体的解决方法。常用的复杂环境电磁干扰评估预测方法有层次分析法^[6]、模糊理论^[7]、灰色理论^[8]、神经网络^[9]、支持向量机等^[10,11]数理统计方法。虽然简化了对复杂

收稿日期: 2017-02-10; 改回日期: 2017-04-24; 网络出版: 2017-09-15

*通信作者: 李伟 liwei_oec@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61372040)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61372040)

电子系统的分析,但是往往需要人为参与和一定的试验数据支持,而多频辐射源任意组合的情况下,不可能通过环境模拟和试验的方法一一获取评估需要的样本数据,导致评估结果不可靠。因此本文以两种通用的通信装备为试验对象,从干扰机理出发,建立带内多频电磁干扰预测模型,弥补单源单频干扰阈值和基于统计分析的评估预测方法等方面的不足。

2 理论研究

引起用频装备带内连续波干扰的主要因素是射频前端的阻塞干扰,而阻塞干扰的机理一般认为是线性不良和动态范围不足^[12,13]。线性不良主要是由于电路的非线性造成的,而带内干扰不会产生交调、互调等情况,都属于大信号阻塞,通过对大信号阻塞的机理分析可以知道电子设备的干扰与干扰信号的平均功率是相关的^[14]。而动态范围不足是由于信号过强使系统工作在截止、饱和甚至击穿区,这种突变非线性与线性不良的连续非线性机理不同,通过分析可以知道此时电子设备的干扰是与干扰信号的峰值电压相关的。

2.1 干扰敏感参数

那么如何判断一个黑箱或灰箱电子系统适用于何种干扰机理、对什么干扰参量敏感?可以通过单频、调幅波的电磁辐射敏感度试验进行判断。

考虑装备受到一个正弦连续波的干扰,即

$$E_{\sin}(t) = E_{\sin p} \cos \omega t \quad (1)$$

其中, $E_{\sin p}$ 为干扰信号的峰值场强, ω 为信号的角频率。则正弦连续波的有效值场强为 $E_{\sin e} = E_{\sin p} / \sqrt{2}$ 。

当装备受到调幅连续波的干扰时,即

$$E_{\text{am}}(t) = E_{\text{am}} (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t \quad (2)$$

式中, $0 \leq m \leq 1$ 为调制深度, Ω 为调制角频率, ω 为载波角频率。利用三角公式对进行展开得到

$$E_{\text{am}}(t) = E_{\text{am}} \cos \omega t + \frac{1}{2} m E_{\text{am}} \cos(\omega + \Omega)t + \frac{1}{2} m E_{\text{am}} \cos(\omega - \Omega)t \quad (3)$$

则调幅波的峰值场强为 $E_{\text{amp}} = (1 + m)E_{\text{am}}$, 有效值场强为 $E_{\text{ame}} = \sqrt{1 + (m/2)^2} (E_{\text{am}} / \sqrt{2})$ 。

假设通信装备对电磁辐射场的峰值场强(峰值功率)敏感,即对于某一频率的干扰信号峰值场强达到临界干扰阈值就会对通信装备造成有效干扰。分别对通信装备进行正弦和调幅连续波电磁辐射试验,根据调幅波电磁辐射试验的要求对调幅波参数进行设置,令调制频率设置为 1 kHz,调制深度为

100%,载波频率与正弦连续波干扰频率相同。正弦连续波与调幅连续波分别达到临界干扰时,峰值场强达到临界干扰阈值 E_{0p} , 即

$$E_{\sin p} = E_{\text{amp}} = (1 + m)E_{\text{am}} = 2E_{\text{am}} = E_{0p} \quad (4)$$

有效值场强之间的关系是

$$E_{\text{ame}} = \sqrt{1 + \frac{m^2}{2}} \cdot \frac{E_{\text{am}}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{3}E_{\text{am}}}{2} = \frac{\sqrt{3}E_{\sin p}}{4} = \frac{\sqrt{6}}{4} E_{\sin e} \quad (5)$$

假设通信装备对电磁辐射场的有效值场强(平均功率)敏感,即对于某一频率的干扰信号有效值场强达到临界干扰阈值就会对通信装备造成有效干扰。则正弦与调幅连续波分别达到临界干扰时,有效值场强达到临界干扰阈值 E_{0e} , 即

$$E_{\sin e} = E_{\text{ame}} = \frac{E_{\sin p}}{\sqrt{2}} = \sqrt{1 + \frac{m^2}{2}} \cdot \frac{E_{\text{am}}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{3}E_{\text{am}}}{2} = E_{0e} \quad (6)$$

此时正弦连续波与调幅连续波的峰值场强之间的关系是

$$E_{\sin p} = \frac{\sqrt{6}E_{\text{am}}}{2} = \frac{\sqrt{6}}{4} E_{\text{amp}} \approx 0.61E_{\text{amp}} \quad (7)$$

因此若单频连续波与调幅连续波的临界干扰场强(有效值检波)之比约为 1,则通信装备对电磁辐射场强有效值(平均功率)敏感,若调幅连续波与单频连续波场强(有效值检波)之比约为 0.61,则受试通信装备对电磁辐射场强峰值敏感。若以峰值场强作为评价标准,峰值敏感的受试设备单频与调幅连续波的临界干扰场强基本相等,而场强有效值(平均功率)敏感的受试设备单频与调幅连续波的临界干扰峰值场强之比约为 0.61。

2.2 峰值场强敏感模型

若通信装备对电磁辐射的峰值场强(峰值功率)敏感,电磁波经过天线耦合进入接收机的射频前端都会先经过限幅器或者带通滤波器,对输入信号进行选择抑制,考虑接收机受到一个正弦连续波干扰信号的干扰,经过限幅器或者带通滤波器后:

$$u_i(t) = A_i E_i' \cos \omega_i t \quad (8)$$

式中, A_i 为天线和射频前端对角频率为 ω_i 信号的幅频系数,接收机在真实的电磁环境中绝大多数情况都工作在线性区域,所以这里认为 A_i 都是常数。 E_i' 为干扰信号的峰值场强。

根据假设条件,干扰信号经过天线和射频前端的选频滤波后,峰值场强达到阈值电压 U_0 ,此时干扰频率 f_i 单独作用下临界干扰峰值场强为 E_i' 。

$$A_i E_i' = U_0 \quad (9)$$

若受试装备在带内受到多个频率干扰信号的辐射作用，根据叠加定理，多个频率干扰信号叠加之后的峰值场强达到阈值电压 U_0 ，即

$$\sum_{i=1}^n A_i E_i = U_0 \tag{10}$$

式中， E_i 即 (E_1, E_2, \dots, E_n) 为不同干扰频率 f_1, f_2, \dots, f_n 共同作用下通信装备的临界干扰峰值场强组合。

式(9)与式(10)相等，则

$$\frac{E_1}{E'_1} + \frac{E_2}{E'_2} + \dots + \frac{E_n}{E'_n} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E'_i} = 1 \tag{11}$$

当通信装备对电磁辐射的峰值场强(峰值功率)敏感时，带内不同频率分量的临界干扰场强峰值 E_i 分别与各自干扰频率单独作用下的临界干扰场强峰值 E'_i 的比值代表各自频率对通信电台的干扰效能的权重，这些比值(权重)之和定义为“效应指数”。当效应指数达到 1，通信电台就会被干扰，生存能力受到威胁从而不能正常工作。必须注意的是，干扰信号之间的频率不能相同，这是因为相同频率的正弦波叠加后，可以看作为一个正弦波信号，而这个和信号的幅值和功率的大小与相位有关。

2.3 平均功率敏感模型

若通信装备对电磁辐射的平均功率(有效值场强)敏感，电磁波经过天线耦合进入接收机射频前端的限幅器或滤波器后输出信号同式(8)，干扰信号经过天线和射频前端的选频滤波后，平均功率达到阈值功率 P_0 ，此时干扰频率 f_i 单独作用下的临界干扰平均功率为 P'_i 。

$$B_i P'_i = P_0 \tag{12}$$

式中， B_i 为天线和射频前端滤波器对角频率为 ω_i 信号功率的选择系数。

当通信电台受到带内多个频率的正弦连续波干扰，多个频率干扰信号叠加之后的平均功率之和达到阈值 P_0 ，即

$$\sum_{i=1}^n B_i P_i = P_0 \tag{13}$$

式中， P_i 即 (P_1, P_2, \dots, P_n) 为不同干扰频率 (f_1, f_2, \dots, f_n) 共同作用下通信装备的临界干扰平均功率组合。

式(12)与式(13)相等，则

$$\frac{P_1}{P'_1} + \frac{P_2}{P'_2} + \dots + \frac{P_n}{P'_n} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{P'_i} = 1 \tag{14}$$

当通信装备对电磁辐射的平均功率(有效值场强)敏感时，带内不同频率分量的临界干扰平均功率 P_i 分别与各自干扰频率单独作用下的临界干扰平均功率 P'_i 的比值代表各自频率对通信电台的干扰效能的权重，这些比值(权重)之和依旧定义为“效应

指数”。同样当效应指数达到 1，通信电台就会被干扰，生存能力受到威胁从而不能正常工作。

3 试验验证

为了验证本文提出的预测方法的正确性，分别以两种典型超短波通信电台为试验对象，依次对受试装备进行了正弦/调幅连续波、带内双频、带内三频连续波电磁辐射效应试验。受试电台 1(EUT1)为模拟通信，选择工作破坏级(即失去接收功能，无法通信)作为敏感度判据；受试电台 2(EUT2)为数字电台，评价数字通信质量一般采用误码率作为干扰判据，选择误码率等于 10%作为敏感度判据^[5]。

3.1 正弦/调幅连续波电磁辐射试验

按图 1 所示的试验配置，分别对受试装备进行正弦/调幅连续波试验，发射电台与辐射天线之间连接衰减器来模拟远距离通信，信号发生器分别产生正弦连续波和调幅波的干扰信号经过对数周期天线产生辐射场，对接收电台进行干扰，用频谱分析仪对进入到接收电台的频率分量进行监测，由于场强计对弱场的场强监测存在较大的误差，所以这里用示波器记录产生的干扰信号的峰值。试验结果如图 2 所示，对试验数据进行处理结果如表 1、表 2 所示。

可以看出，两种受试电台带内正弦和调幅波辐射临界干扰峰值场强随辐射(载波)频率的变化规律基本相同。其中 EUT1 带内正弦与调幅连续波电磁辐射临界干扰峰值电压之比为 0.85 倍，这与理论值 1 比较接近，误差都在 2 dB 以内；EUT2 的带内正弦与调幅连续波电磁辐射临界干扰峰值电压之比为 0.65 倍，这与理论值 0.61 十分接近，误差都在 1 dB 以内。因此可以得出结论，EUT1 对电磁干扰的峰值场强(峰值功率)敏感，EUT2 对电磁干扰的平均功率(有效值场强)敏感。

EUT1 带内正弦与调幅波临界干扰峰值电压的比值误差稍大的原因有：(1)人耳主观判断带来的误差；(2)当调幅波的载波频率与正弦波频率相同时，

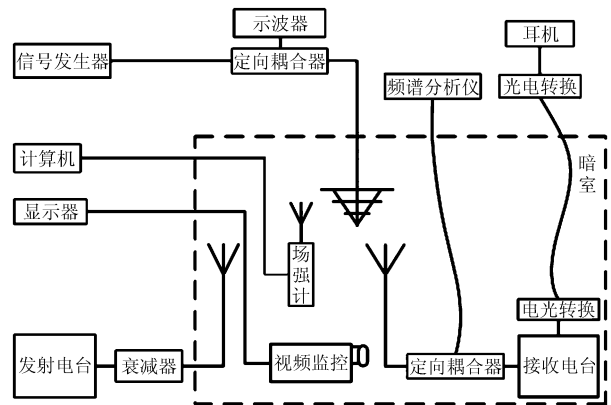


图 1 通信装备正弦/调幅连续波电磁辐射试验配置图

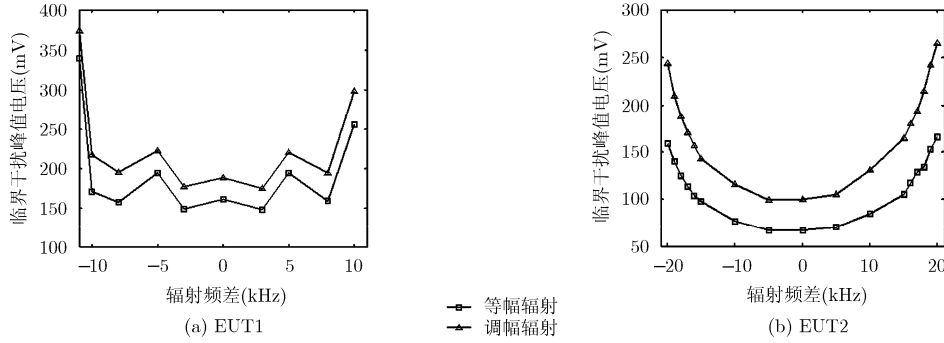


图 2 正弦/调幅电磁辐射临界干扰峰值电压

调幅波相比于正弦波来说需要经过很长时间才能迎来下一个峰值，考虑到受试电台的响应时间，调幅

波的临界干扰峰值电压会略高于正弦波。所以带内正弦波与调幅波的临界干扰峰值电压的比值会略小于 1。

表 1 EUT1 正弦和调幅电磁辐射临界干扰峰值电压比较

频差 (kHz)	$V_{\text{simp}}(\text{mV})$	$V_{\text{amp}}(\text{mV})$	$V_{\text{simp}}/V_{\text{amp}}$	误差 (dB)
-11	339	374	0.90	-0.85
-10	176	217	0.81	-1.82
-8	157	195	0.81	-1.88
-5	194	222	0.87	-1.17
-3	149	177	0.84	-1.50
0	161	188	0.86	-1.35
3	148	175	0.85	-1.46
5	194	220	0.88	-1.09
8	159	194	0.82	-1.73
10	256	298	0.86	-1.32
		均值	0.85	-1.41

表 2 EUT2 正弦和调幅电磁辐射临界干扰峰值电压比较

频差 (kHz)	$V_{\text{simp}}(\text{mV})$	$V_{\text{amp}}(\text{mV})$	$V_{\text{simp}}/V_{\text{amp}}$	误差 (dB)
-20	159	244	0.65	0.57
-19	140	210	0.67	0.77
-18	125	188	0.67	0.75
-17	114	171	0.67	0.77
-16	104	157	0.66	0.72
-15	98	143	0.69	1.01
-10	77	116	0.66	0.73
-5	67	99	0.68	0.90
0	67	100	0.67	0.81
5	70	105	0.67	0.77
10	85	131	0.65	0.54
15	105	165	0.64	0.37
16	117	180	0.65	0.55
17	129	194	0.66	0.75
18	134	215	0.62	0.19
19	153	242	0.63	0.31
20	166	265	0.63	0.23
		均值	0.66	0.64

3.2 带内双频电磁辐射试验

通信电台带内双频试验配置与图 1 类似，用两个信号发生器产生两个不同频率的干扰信号，经过功率合成器后通过对数周期天线辐射出去。对两种电台进行了多组试验，其中 4 组试验数据与上述两种预测模型的验证结果如表 3 至表 6 所示。

表 3 工作频率 60 MHz 时 EUT1 双频验证试验

	$\Delta f = -3 \text{ kHz}$	$\Delta f = +4 \text{ kHz}$	场强比	功率比
单频干扰阈值 (dBm)	-11.4	-9.4		
	-13.8	-16.7	1.19	0.76
	-14.6	-15.6	1.18	0.72
双频干扰阈值 (dBm)	-15.4	-14.6	1.18	0.70
	-16.2	-13.7	1.18	0.70
	-17.0	-13.1	1.18	0.70
	-17.8	-12.4	1.19	0.73
		均值	1.18	0.72
		方差	1.97E-5	5.72E-4
		变异系数	3.80E-3	0.03

表 4 工作频率 40 MHz 时 EUT1 双频验证试验

	$\Delta f = -4 \text{ kHz}$	$\Delta f = +3 \text{ kHz}$	场强比	功率比
单频干扰阈值 (dBm)	-9.4	-10.7		
	-11.8	-16.3	1.28	0.85
	-12.6	-17.8	1.13	0.67
双频干扰阈值 (dBm)	-13.4	-16.6	1.14	0.66
	-14.2	-14.5	1.22	0.75
	-15.0	-14.2	1.19	0.72
	-15.8	-13.3	1.22	0.78
		均值	1.20	0.74
		方差	3.20E-3	5.20E-3
		变异系数	0.05	0.10

表 5 工作频率 80 MHz 时 EUT2 双频验证试验

	$\Delta f = -15$ kHz	$\Delta f = +5$ kHz	场强比	功率比
单频 干扰 阈值 (dBm)	-16.4	-18.5		
	-18.0	-23.4	1.40	1.02
双频 干扰 阈值 (dBm)	-19.0	-21.9	1.42	1.01
	-20.0	-20.6	1.45	1.05
	-21.0	-20.4	1.39	0.99
	-22.6	-20.0	1.33	0.95
		均值	1.40	1.00
		方差	1.80E-3	1.50E-3
		变异系数	0.03	0.04

表 6 工作频率 60 MHz 时 EUT2 双频验证试验

	$\Delta f = -20$ kHz	$\Delta f = +10$ kHz	场强比	功率比
单频 干扰 阈值 (dBm)	-18.7	-22.8		
	-20.0	-27.5	1.44	1.08
双频 干扰 阈值 (dBm)	-21.0	-26.1	1.45	1.06
	-22.0	-25.1	1.45	1.06
	-23.0	-24.3	1.45	1.08
	-24.5	-24.0	1.39	1.02
		均值	1.44	1.06
		方差	9.00E-4	6.00E-4
		变异系数	0.02	0.02

可以看出, 两种受试电台在带内双频电磁辐射作用下干扰阈值基本为负相关的关系, 一个干扰阈值随另一个的增大而减小, 两种预测模型得到的效应指数的方差及变异系数的大小相当且较小, 说明了预测结果都比较稳定。由正弦/调幅连续波电磁辐

射试验可知, EUT1 对电磁干扰的峰值场强(峰值功率)敏感, 根据式(11)模型对其干扰进行预测, 由表 3、表 4 可以看出, 试验数据代入到式(11)的效应指数基本在 1.2 左右, 稍大于理论值 1, 这是因为双频叠加后的周期会远大于单频的周期, 如果将试验数据代入到式(14)的效应指数大概在 0.7 左右。由正弦/调幅连续波电磁辐射试验可知, EUT2 对电磁干扰的平均功率(有效值场强)敏感, 根据式(14)模型对其进行预测, 由表 5、表 6 可以看出, 试验数据代入到式(14)的效应指数基本在 1 左右, 与预测值 1 十分吻合, 而代入到式(11)中的效应指数在 1.4 左右。双频叠加后的周期会远大于单频的周期, 导致峰值场强(峰值功率)敏感受试装备场强比值之和结果稍大于 1, 试验结果验证了带内双频电磁辐射干扰预测模型的正确性。

3.3 带内三频电磁辐射试验

带内三频电磁辐射效应试验配置与图 1 类似, 用 3 个信号发生器产生干扰信号, 经过功率合成后由对数周期天线辐射出去。对两种受试电台进行了多组试验, 其中 4 组试验数据及两种模型的验证结果如表 7 至表 10 所示。

可以看出, 两种预测模型结果的方差和变异系数依然较小且数值相当, 说明两种数据结果都比较稳定。由表 7、表 8 可以看出, 对电磁干扰峰值场强敏感的 EUT1 带内三频试验数据代入到式(11)模型进行预测, 得到的效应指数在 1.34 左右, 基本符合预期, 而代入到式(14)模型得到的效应指数减小到 0.6 左右, 结合带内双频试验数据预测结果, 说明式(11)模型能够有效对 EUT1 的带内多频电磁辐射干扰进行预测。由表 9、表 10 可以看出, 对电磁

表 7 工作频率 40 MHz 时 EUT1 三频验证试验

	$\Delta f = -5$ kHz	$\Delta f = 0$ kHz	$\Delta f = +4$ kHz	场强比	功率比
单频(dBm)	-4.3	-0.7	-0.7		
	-13.1	-6.7	-6.7	1.37	0.63
	-10.3	-8.9	-6.7	1.39	0.65
	-10.3	-6.7	-10.1	1.34	0.62
	-11.0	-7.7	-7.7	1.36	0.61
双频干扰阈值 (dBm)	-11.3	-6.8	-7.7	1.39	0.64
	-11.3	-7.7	-6.8	1.39	0.64
	-9.5	-8.7	-8.7	1.35	0.62
	-12.3	-5.7	-8.7	1.36	0.63
	-12.3	-8.7	-5.6	1.37	0.64
		均值		1.37	0.63
		方差		4.00E-4	2.00E-4
		变异系数		0.01	0.02

表 8 工作频率 60 MHz 时 EUT1 三频验证试验

	$\Delta f = -4$ kHz	$\Delta f = +2$ kHz	$\Delta f = +6$ kHz	场强比	功率比
单频(dBm)	-11.8	-8.7	-9.6		
	-18.8	-15.7	-17.2	1.31	0.57
双频干扰 阈值(dBm)	-18.8	-16.1	-16.6	1.32	0.58
	-18.7	-15.7	-16.6	1.35	0.60
	-19.8	-16.7	-14.9	1.34	0.61
	-19.8	-14.2	-17.6	1.33	0.60
	-16.7	-16.7	-17.6	1.37	0.64
			均值	1.33	0.60
			方差	4.00E-4	6.00E-4
		变异系数	0.01	0.04	

表 9 工作频率 60 MHz 时 EUT2 三频验证试验

	$\Delta f = -20$ kHz	$\Delta f = +10$ kHz	$\Delta f = +20$ kHz	场强比	功率比
单频(dBm)	-20.2	-22.4	-19.6		
	-22.9	-19.4	-26.6	1.63	0.94
双频干扰阈 值(dBm)	-25.2	-27.4	-24.6	1.69	0.95
	-26.2	-28.4	-22.5	1.72	1.02
	-26.2	-25.6	-25.6	1.69	0.98
	-23.1	-28.7	-25.6	1.70	1.00
	-27.1	-29.4	-21.0	1.74	1.12
	-27.1	-24.0	-26.6	1.73	1.09
	-21.8	-29.4	-26.6	1.73	1.09
		均值	1.70	1.02	
		方差	1.30E-3	5.00E-3	
		变异系数	0.02	0.07	

表 10 工作频率 80 MHz 时 EUT2 三频验证试验

	$\Delta f = -15$ kHz	$\Delta f = +5$ kHz	$\Delta f = +20$ kHz	场强比	功率比
单频(dBm)	-14.8	-14.1	-9.9		
	-16.9	-21.1	-16.9	1.68	1.02
双频干扰 阈值(dBm)	-21.8	-16.0	-16.9	1.70	1.04
	-21.8	-21.1	-11.9	1.69	1.03
	-17.8	-20.1	-15.9	1.71	1.00
	-20.8	-16.6	-15.9	1.75	1.06
	-20.8	-20.1	-12.4	1.75	1.06
	-19.8	-19.1	-13.6	1.78	1.06
	-19.8	-18.3	-14.6	1.74	1.01
-18.4	-19.1	-14.6	1.79	1.07	
		均值	1.73	1.04	
		方差	1.50E-3	6.00E-4	
		变异系数	0.02	0.02	

干扰平均功率敏感的 EUT2 带内三频数据带入到式(14)模型进行预测,得到的效应指数依然在 1 左右,而带入到式(11)得到的效应指数增大到 1.71 左右,结合带内双频试验数据预测结果,说明式(14)能够有效对 EUT2 的带内多频电磁辐射干扰进行预测。

3.4 模型修正

受试装备无论对电磁辐射临界干扰峰值场强敏感还是对辐射场强有效值敏感都具有相对性:对峰值场强敏感需要峰值场强持续一定的时间或达到一定的占空比,这就导致按式(11)计算的效应指数大

于1时才能出现临界干扰情况。EUT1带内单频电磁辐射临界干扰峰值场强是调幅电磁辐射临界干扰峰值场强的0.85倍,用预测模型式(11)对其带内多频电磁辐射效应进行预测时,带内双频和带内三频电磁辐射效应指数分别取1.20和1.35左右时出现临界干扰。所以对峰值场强敏感的带内多频电磁辐射预测模型进行修正:当效应指数小于1时,通信装备能够正常工作,当效应指数大于等于1时,通信装备可能受到干扰。从工程实际上来讲,根据战时电磁频谱管理的原则,短波和超短波通信带宽大约在kHz级别,而舰船、无人机等分米波通信带宽在MHz级别,战场电磁环境中的带内连续波干扰不会超过4,5个,所以预测模型能够满足战场实际情况的要求。

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_1}{E'_1} + \frac{E_2}{E'_2} + \dots + \frac{E_n}{E'_n} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E'_i} < 1, \text{ 能够正常工作} \\ \frac{E_1}{E'_1} + \frac{E_2}{E'_2} + \dots + \frac{E_n}{E'_n} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E'_i} \geq 1, \text{ 可能受到干扰} \end{aligned} \right\} (15)$$

EUT2带内正弦电磁辐射临界干扰峰值电压是调幅电磁辐射临界干扰峰值电压的0.65倍,十分接近理论值0.61,误差都在1dB以内,说明EUT2对带内电磁干扰的平均功率(有效值场强)敏感,可以用预测模型式(14)对其带内多频电磁环境下生存能力进行预测,将带内双频和带内三频电磁辐射试验数据代入到式(14)得到的结果都在1左右,基本符合预测值1。因此,当效应指数小于1时,通信装备能够正常工作,当效应指数大于等于1时,通信装备受到干扰不能正常工作,即

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_1}{P'_1} + \frac{P_2}{P'_2} + \dots + \frac{P_n}{P'_n} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{P'_i} < 1, \text{ 能够正常工作} \\ \frac{P_1}{P'_1} + \frac{P_2}{P'_2} + \dots + \frac{P_n}{P'_n} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{P'_i} \geq 1, \text{ 可能受到干扰} \end{aligned} \right\} (16)$$

因此,本文提出通信装备带内多频电磁干扰预测方法,如图3所示。

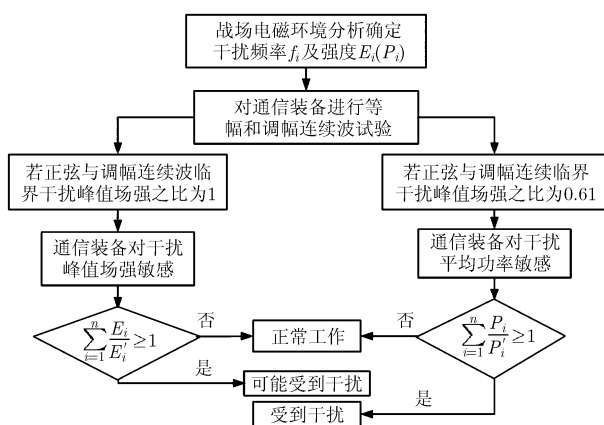


图3 通信装备带内多频电磁干扰预测方法

4 结论

本文对通信装备带内电磁干扰机理进行了深入分析,基于峰值场强敏感和平均功率敏感分别建立了两种带内多频电磁干扰预测模型,提出了通信装备带内多频电磁干扰预测方法。以两种典型通信装备为试验对象,分别对其进行了正弦和调幅连续波电磁辐射试验,EUT1的正弦与调幅连续波临界干扰峰值场强之比为0.85,EUT2的正弦与调幅连续波临界干扰峰值场强之比为0.65,说明EUT1对电磁干扰的峰值场强敏感,而EUT2对电磁干扰的平均功率敏感。进一步进行带内双频和三频电磁辐射试验,EUT1根据式(11)进行预测,试验数据得到效应指数都略大于1,而EUT2根据式(14)进行预测,试验数据得到效应指数都十分接近1,这与文中理论方法的预测结果十分吻合。因此本文提出的预测方法能够有效地对通信装备带内多频电磁干扰进行预测,这对指导通信装备在战场复杂电磁环境下能否发挥作战效能具有重要意义。

参考文献

- [1] 刘培国,覃宇建,周东明,等. 电磁兼容基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 259-261.
- [2] LIU Peigu, QIN Yujian, ZHOU Dongming, et al. Electromagnetic Compatibility Fundamentals[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 259-261.
- [3] 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.
- [4] GJB 151B-2013. Electromagnetic emission and susceptibility requirements and measurements for military equipment and subsystems[S]. 2013.
- [5] MARDIGUIAN M. Combined effects of several simultaneous EMI couplings[C]. IEEE International Symposium on EMC, 2000: 181-184.
- [6] GROMMES W and ARMSTRONG K. Developing immunity testing to cover intermodulation[C]. IEEE International Symposium on EMC, 2011: 999-1004.
- [7] DUFFY A, ORLANDI A, and 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] WANG Guosheng and QI Zongfeng. AHP effectiveness evaluation of electronic warfare command and control system under complex electromagnetic[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 989-994: 3212-3215.
- [9] AI-Badi A H, Ghanian S M, and EL-Saadany E F. Prediction of metallic conductor voltage owing to electromagnetic coupling using neuro fuzzy modeling[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, 24(1): 319-327.

- [8] GUO Shuxia, Dong Zhongyao, HU Zhantao, *et al.* Simulation of dynamic electromagnetic interference environment for unmanned aerial vehicle data link[J]. *China Communications*, 2013, 10(7): 19–28.
- [9] 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.
- [10] CEPERIC V, GIELEN G, and BARIC A. Black-box modeling of conducted electromagnetic immunity by support vector machines[C]. International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), Rome, Italy, 2012, 1–6.
- [11] 张薇玮, 丁文锐, 刘春辉. 复杂环境中无人机数据链干扰效果预测方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(4): 760–766. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.04.06.
ZHANG Weiwei, DING Wenrui, and LIU Chunhui. Prediction of interference effect on UAV data link in complex environment[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(4): 760–766. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.04.06.
- [12] 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. doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.2014.09.011.
WEI Guanghui, GENG Lifei, and PAN Xiaodong. Mechanism of electromagnetic radiation effects for communication equipment[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(9): 2685–2692. doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.2014.09.011.
- [13] OTT W H. *Electromagnetic Compatibility Engineering*[M]. New York, Publishing House of Wiley, 2011.
- [14] 李伟, 魏光辉, 潘晓东, 等. 典型通信装备带内双频连续波电磁辐射效应预测方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(11): 2474–2480. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.11.04.
LI Wei, WEI Guanghui, PAN Xiaodong, *et al.* Electromagnetic radiation effects forecasting method about in-band dual-frequency continuous wave for typical communication equipment[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(11): 2474–2480. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.11.04.
- [15] 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. doi: 10.14183/j.cnki.1005-6122.201606017.
LI Wei, WEI Guanghui, PAN Xiaodong, *et al.* Research on electromagnetic susceptibility criterion for typical communication equipment[J]. *Journal of Microwaves*, 2016, 32(6): 70–75. doi: 10.14183/j.cnki.1005-6122.201606017.
- 李 伟: 女, 1988 年生, 博士生, 研究方向为电磁环境效应试验、评估和预测技术、电磁兼容.
- 魏光辉: 男, 1964 年生, 教授, 主要研究方向为电磁防护、电磁环境效应试验、评估和预测技术、电磁兼容.
- 潘晓东: 男, 1980 年生, 讲师, 博士, 主要研究方向为电磁环境效应试验、评估和预测技术、电磁兼容.