

通信电台电磁辐射2阶互调低频阻塞效应与作用机理

魏光辉 赵凯* 任仕召

(陆军工程大学石家庄校区电磁环境效应国家级重点实验室 石家庄 050003)

摘要: 为揭示通信电台复杂电磁环境效应机理, 该文采用全电平辐照法实验研究了某型超短波数字通信电台的单频和带外双频电磁辐射阻塞效应, 确定了其单频电磁辐射效应规律和敏感带宽, 实验数据表明受试电台对带外双频3阶互调阻塞较单频电磁辐射阻塞干扰敏感9~23 dB。实验过程中发现了一种既不能用双频非互调迭加机理解释、也不能用3阶交互调机理解释的双频电磁辐射敏感现象。

关键词: 通信电台; 电磁辐射; 2阶互调; 阻塞效应; 机理

中图分类号: TN924; TM937

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)08-2059-06

DOI: 10.11999/JEIT190574

Second-order Intermodulation Low Frequency Blocking Effect and Mechanism for Communication Radio under Electromagnetic Radiation

WEI Guanghui ZHAO Kai REN Shizhao

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

Abstract: In order to reveal the complex electromagnetic environment effects mechanism of communication radio, the blocking effect of single-frequency and out-of-band dual-frequency electromagnetic radiation for the ultra-short wave digital communication radio is experimentally studied by irradiation method. The rule of single-frequency electromagnetic radiation effect and the susceptible bandwidth are determined. The experimental data show that the tested radio is 9~23 dB more susceptible to out-of-band dual-frequency third-order intermodulation blocking than single-frequency electromagnetic radiation blocking. A sensitive phenomenon of dual-frequency electromagnetic radiation which can neither be explained by the dual-frequency non-intermodulation superposition mechanism nor by the third-order intermodulation mechanism has been found in the experiment.

Key words: Communication radio; Electromagnetic radiation; Second-order intermodulation; Blocking effect; Mechanism

1 引言

未来信息化战争中, 电子信息装备和新型电磁武器广泛使用, 电磁环境日趋复杂、恶劣, 对武器装备正常发挥战技性能将产生严重影响^[1,2]。通信电台作为信息传递和指挥畅通的纽带, 接收灵敏度高, 对电磁环境依赖性强, 电磁辐射干扰将成为其战技性能正常发挥的制约因素^[3,4]。为提高通信装备的抗电磁干扰能力, 笔者前期深入研究了通信装备电磁辐射效应规律, 确定了通信电台带内单频电磁辐射效应规律和作用机理^[4,5], 建立了复杂电磁环境下双频、多频及其复合噪声非互调电磁辐射阻

塞效应预测模型^[6-10], 研究了通信电台强场电磁辐射效应规律^[11], 提出了带外强场电磁辐射效应预测方法^[12], 能够基本满足非互调条件下通信电台复杂电磁环境适应性试验评估的技术需求。但是, 复杂电磁环境与单频、单源电磁环境的重大区别在于互调效应的存在, 由于互调产生新的频率分量, 使多频电磁辐射共同作用下的受试设备较单频电磁辐射更加敏感、更易受到电磁干扰。一般认为: 用频装备带内接收灵敏度高、对信号频率具有较强的选择性, 当干扰信号频率偏离受试装备工作频率较远时, 难以对受试装备造成有效干扰; 同理, 对带外电磁辐射干扰, 一般仅考虑3阶互调增强效应, 而忽略2阶互调的影响。但是, 通过通信电台带外双频阻塞干扰效应试验发现, 在带外电磁辐射干扰信

号频率差别不大、3阶互调频率处于受试装备敏感工作频带之外的情况下,带外双频电磁辐射临界干扰场强远低于其中任一频率的单频电磁辐射临界干扰场强,甚至比3阶互调临界干扰场强更低,这一现象必须引起足够的重视。为此,通过场路耦合与互调机理分析,揭示了带外电磁辐射2阶互调低频阻塞干扰效应机理,为科学评价用频装备的复杂电磁环境适应性提供了技术支撑。

2 受试电台单频阻塞临界干扰特性

选择某型超短波数字通信电台作为受试设备,采用全电平整体辐照法^[13]研究其误码率随电磁辐射场强的变化规律,以误码率10%作为敏感判据^[14],确定特定干扰频率对应的临界干扰场强。试验配置如图1所示,在发射电台主机与发射天线之间连接40 dB的衰减器,用来模拟远距离通信状态,受试电台处于定频接收状态,辅助电台处于定频发射状态,监视探头偏离电磁辐射干扰主波束且聚焦于受试电台的前面板,监视试验过程中是否出现通信中断(完全阻塞)等现象。在连续波电磁辐射持续过程中,操作辅助电台进行链路测试,确定受试电台接收信号的误码率。采用变步长升降法^[5]调节射频信号源的输出功率,测定10%误码率对应的临界干扰场强。

测试结果如图2所示:受试超短波通信电台的单频电磁辐射敏感频点处于其工作频率 $f_0 \pm 30$ kHz的范围内;辐射频偏(电磁辐射干扰频率 f 与电台工作频率 f_0 的差值)处于 $\pm 25 \sim 35$ 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 $\pm 35 \sim 75$ kHz及大于80 kHz范围时,临界干扰场强出现两个明显的台阶,分别比带内电磁辐射临界干扰场强度高40 dB, 60 dB以上。由此可见:受试通信电台具有较强的抗单频电磁辐射干扰能力,电磁辐射频率偏离其工作频率30 kHz以上时,临界干扰场强迅速上升40~60 dB,单频阻塞干扰的防护重点是带内干扰防护。

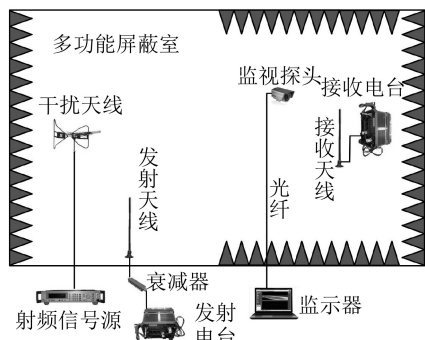


图1 通信电台单频电磁辐射效应试验配置

3 带外双频电磁辐射敏感现象

为试验评估上述数字超短波通信电台的复杂电磁环境适应性,对其进行了双频电磁辐射阻塞效应研究。试验配置如图3所示,为尽量降低射频电磁辐射效应试验系统^[15]自身产生互调频率分量,采用两套效应试验系统分别激发不同频率的电磁辐射场,且在每套效应试验系统的双定向耦合器与干扰辐射天线之间串接隔离器,阻止干扰辐射天线接收的电磁信号反向进入宽带射频功率放大器,最大程度降低干扰源的互调。试验过程中同一频率的单频临界干扰场强 E_{i0} 与双频效应试验时的干扰场强 E_i 由同一套效应试验系统激发,通过馈入干扰辐射天线的功率换算得到^[5],以降低辐射天线主波束偏移对测试结果的影响。

3.1 带外双频3阶互调阻塞效应

表1所列受试通信电台工作频率取60 MHz时带外双频3阶互调阻塞临界干扰场强的典型试验结果,为体现双频3阶互调阻塞与单频电磁辐射阻塞临界干扰场强的差异,双频3阶互调阻塞临界干扰场强组合用出现临界干扰时两个频率分量各自场强 E_i 与其单频临界干扰场强 E_{i0} 比值的组合(E_i/E_{i0} ,

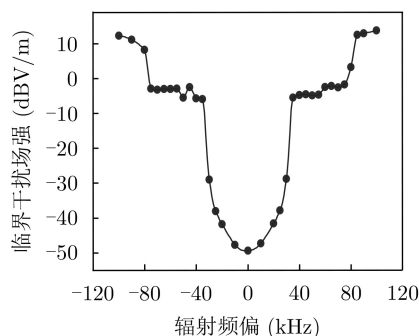


图2 受试通信电台单频阻塞临界干扰场强

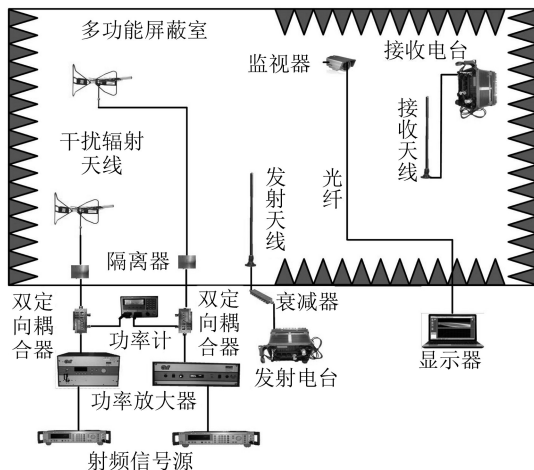


图3 通信电台双频电磁辐射效应试验配置

表 1 通信电台双频3阶互调阻塞临界干扰场强

频率组合(kHz)	$\Delta f_1=f_1-f_0$	36	48	72	96	144
	$\Delta f_2=f_2-f_0$	72	96	144	192	288
临界干扰场强比	E_1/E_{10}	-11.7	-12.3	-13.3	-17.9	-18.2
	E_2/E_{20}	-13.2	-22.5	-24.8	-32.3	-27.1
频率组合(kHz)	$\Delta f_1=f_1-f_0$	36	48	72	96	144
	$\Delta f_2=f_2-f_0$	48	86	154	212	268
临界干扰场强比	E_1/E_{10}	-8.7	-13.3	-13.6	-19.5	-19.8
	E_2/E_{20}	-10.8	-17.0	-24.1	-19.9	-22.9

E_2/E_{20})表示, 频率组合用电磁辐射频偏($\Delta f_i=f_i-f_0$)表示。

表1上半部分双频3阶互调频率与受试电台工作频率相同($2f_1-f_2=f_0$), 而下半部分双频3阶互调频率虽然偏离受试电台工作频率, 但偏差处于(-20~24 kHz之间, 由图2所示受试电台单频阻塞临界干扰场强曲线可知, 3阶互调频率仍处于受试电台敏感频带内。

若电磁干扰辐射场强分别为 $E_1(f_1)$ 和 $E_2(f_2)$, 则3阶互调信号强度

$$\varphi_3(2f_1-f_2)=D(f_0)S_1^2(f_1)S_2(f_2) \quad (1)$$

其中, D 是与受试用频装备工作频率 f_0 有关的3阶互调非线性系数。

由式(1)可知: 3阶互调干扰强度取决于 $(E_1/E_{10})^2$ (E_2/E_{20}), 据此由表1所列数据可知: 相对于单频电磁辐射干扰, 受试电台对带外双频3阶互调电磁辐射干扰敏感9~23 dB。

3.2 一种新型的带外双频阻塞敏感现象

在进行带外双频3阶互调阻塞效应试验的过程中发现: 在较宽的频率范围内, 即使带外双频电磁辐射信号的3阶互调频率不能进入受试通信电台的敏感频带范围内, 受试通信电台对带外双频电磁辐射仍比单频电磁辐射敏感得多, 临界干扰场强甚至相差30 dB以上, 比3阶互调还要敏感, 试验结果如表2所列。

表2所列试验数据, 干扰频率偏离受试电台工作频率127~390 kHz, 3阶互调频率至少偏离受试电台工作频率50~250 kHz, 由图2所示受试电台单频阻塞临界干扰场强曲线可知, 无论是2个干扰频率还是其3阶互调频率均远离受试电台的敏感频带, 这一双频阻塞敏感现象不能用3阶互调解释; 即使受试电台工作信号参与非线性调制, 3阶交调频率除了一组试验落在受试电台敏感频带内(偏离10 kHz)之外, 其它9组试验偏离受试电台工作频率50~160 kHz, 这一敏感现象也不能用3阶交调解释; 若双频电磁辐射不产生互调效应, 无论受试电

表 2 通信电台新型双频阻塞临界干扰场强

频率组合(kHz)	$\Delta f_1=f_1-f_0$	100	150	200	250	300
	$\Delta f_2=f_2-f_0$	150	200	250	300	350
临界干扰场强比	E_1/E_{10}	-25.6	-26.3	-28.7	-28.4	-30.6
	E_2/E_{20}	-26.7	-29.5	-29.2	-30.5	-28.5
频率组合(kHz)	$\Delta f_1=f_1-f_0$	127	150	220	240	230
	$\Delta f_2=f_2-f_0$	177	160	330	360	390
临界干扰场强比	E_1/E_{10}	-26.5	-17.5	-30.6	-34.4	-4.0
	E_2/E_{20}	-27.7	-17.7	-30.5	-34.4	-4.1

台对多频电磁辐射干扰场强有效值敏感还是幅值敏感, 其临界干扰场强组合中必须有一个频率的干扰场强与其单频临界干扰场强之比不小于-6 dB^[8,10], 即 E_1/E_{10} 或 E_2/E_{20} 不能同时小于-6 dB, 显然表2试验结果不满足该条件, 说明试验过程中产生了非线性效应。

由此可见, 表2所示的带外双频电磁辐射敏感现象既不能用3阶互调机理解释, 也不能用双频非互调迭加机理解释。同理分析, 这一电磁辐射敏感现象也不能用3阶交调机理解释, 因为若受试通信电台对双频干扰信号与工作信号产生的3阶交调带外信号敏感, 势必对单频干扰信号与工作信号产生的更强的3阶交调带外信号敏感, 导致单频辐射干扰场强大幅度降低, 反而不会出现双频干扰比单频干扰敏感的现象。因此, 必须从3阶交互调之外探寻这种双频干扰敏感效应的本质原因。

4 2阶互调低频阻塞效应机理

对表2所列试验数据进行深入分析并进一步试验发现: 出现上述双频辐射敏感现象的条件是双频频差既不能太大、也不能太小, 似乎应在10~130 kHz之间, 结合受试电台的工作原理进一步分析, 阐明了2阶互调低频阻塞效应机理, 解释了上述敏感现象。

受试电台原理结构如图4所示(一般通信电台原理框图基本相同), 天线接收射频信号经一级放大后与一本振混频进行上变频, 将电台工作频率中心由设定值 f_0 变频到恒定值 F_m 和 F_m+2f_0 的频率分量, 该信号经次级放大和中心频率为 F_m 的窄带晶体带通滤波器选频后, 将天线接收的射频信号由设定的电台工作频率上变频对称迁移到 F_m 附近, 便于信号后续处理。通过晶体带通滤波器的射频信号被三级放大器进一步放大, 与二本振混频进行下变频, 变频输出信号经低通(带通)滤波后, 将电台工作频率下变频平移至 F_L , 经可变增益放大与检波, 检出通信语音或数码信息, 实现通信功能。

若空间不同频率的电磁辐射场强分别为 $E_i(f_i)$ 、

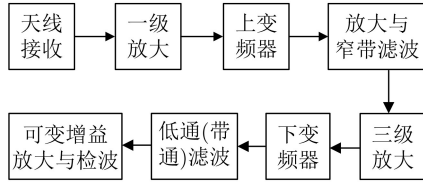


图4 通信电台原理结构框图

信号场路耦合系数为 $A_i(f_i)$ ，则各路信号到达一级放大器时的等效电平为

$$S_i(f_i) = A_i(f_i)E_i(f_i) \quad (2)$$

其中， $i=0$ 表示受试电台工作信号， $i=1, 2$ 分别代表带外干扰信号。

上述信号进入一级放大及其后续电路，由于非线性效应必然会因交互调而产生新的频率分量。对用频装备，带外干扰信号强度远大于工作信号强度，交调信号一般远小于互调信号强度。因此，仅从互调信号出发，分析双频辐射敏感现象。假设天线接收双频电磁辐射干扰信号的频率为 f_1, f_2 ，干扰信号进入受试电台各结构后输出信号各分量的频率如表3所示。其中，窄带滤波部分的中心频率为 F_m ，若干扰信号频率偏离受试电台工作频率不远且二者差别不大，才能输出表中所示的频率分量。上述双频干扰信号的2阶互调分量仅 $f_2-f_1, 2(f_2-f_1), 3(f_2-f_1)$ 可与有用信号一起进入可变增益放大与检波器，对有用信号增益进行压制，形成阻塞干扰。

根据以上分析可知： f_2-f_1 频率分量、 $2(f_2-f_1)$ 频率分量和 $3(f_2-f_1)$ 频率分量强度依次降低，若 f_2-f_1 频率分量能够落在低通(带通)滤波器的通带内，即可对有用信号增益进行压制，形成阻塞干扰。由于该信号来源于双频干扰信号的2阶互调，对有用信号增益的压制出现在低通(带通)滤波以后，故称为2阶互调低频阻塞效应。

5 低频阻塞效应机理实验验证

效应机理分析的正确性需要通过实验来验证。

为此，从式(2)出发，给出带外信号 f_1, f_2 产生的2阶互调干扰信号

$$\varphi_2(\Delta f) = GS_1(f_1)S_2(f_2) \quad (3)$$

其中， G 为与 f_0 有关的2阶互调非线性系数， $\Delta f = |f_1 - f_2|$ 。

假设受试电台的低频干扰电平为 $L(f)$ ，定义2阶互调低频阻塞效应指数 R_s 为2阶互调干扰信号电平与相同低频干扰电平的比值。显然，当 $R_s \geq 1$ 时出现2阶互调低频阻塞干扰，而 $R_s < 1$ 时受试电台能够正常工作。

$$R_s(\Delta f) = \frac{GS_1(f_1)S_2(f_2)}{L(\Delta f)} \quad (4)$$

假设受试电台工作频率为 f_0 时干扰频率 f_i 对应的敏感系数为 $B_i(f_i)$ ，单频电磁辐射临界干扰场强为 $E_{i0}(f_i)$ ，受试用频装备在敏感端口处的临界干扰电平为 C_0 (C_0 为与 f_0 相关的常数，与干扰频率 f_i 相关的变化因素均包含在敏感系数 $B_i(f_i)$ 中)，则有

$$A_1B_1E_{10} = A_2B_2E_{20} = A_3B_3E_{30} = \dots = C_0 \quad (5)$$

结合式(3)~式(5)可得

$$R_s(\Delta f) = \frac{C_0^2 G}{L(\Delta f)B_1(f_1)B_2(f_2)} \frac{E_1(f_1)}{E_{10}(f_1)} \frac{E_2(f_2)}{E_{20}(f_2)} \quad (6)$$

引入 f_0 和 f_i 有关的新参数——2阶互调低频阻塞干扰因子 β_i ，其形式为

$$\beta_i = \frac{C_0 \sqrt{G/L_{\min}}}{B_i} \quad (7)$$

其中， $L_{\min}$ 为低频干扰电平的最小值。

另外，引入低频干扰相对电平 $L_r(\Delta f) = L(\Delta f)/L_{\min}$ ，则2阶互调低频阻塞效应指数 R_s 可表示为

$$R_s(\Delta f) = \frac{\beta_1(f_1)\beta_2(f_2)}{L_r(\Delta f)} \frac{E_1(f_1)}{E_{10}(f_1)} \frac{E_2(f_2)}{E_{20}(f_2)} \quad (8)$$

严格来讲，2阶互调低频阻塞效应因子与干扰信号频率和工作频率有关，准确描绘其变化图谱工作量巨大。分析受试电台工作原理可发现，改变其工作频率的实质是改变一本振的频率，因此，从工

表3 干扰信号进入通信电台各结构后输出分量频率

结构	频率
天线接收	f_1, f_2 (设 $f_1 < f_2$)
一级放大	$f_1, f_2, f_2 \pm f_1, 2f_1 \pm f_2$ 和 $2f_2 \pm f_1, 3f_1$ 和 $3f_2$ (忽略高阶互调分量)
上变频	$F_m + f_0 - f_1, F_m + f_0 - f_2, F_m + f_0 - f_2 \pm f_1, F_m + f_0 - 2f_1 \pm f_2, F_m + f_0 - 2f_2 \pm f_1, F_m + f_0 - 3f_1, F_m + f_0 - 3f_2$ 和 $F_m + f_0 + f_1, F_m + f_0 + f_2, F_m + f_0 + f_2 \pm f_1, F_m + f_0 + 2f_1 \pm f_2, F_m + f_0 + 2f_2 \pm f_1, F_m + f_0 + 3f_1, F_m + f_0 + 3f_2$
窄带滤波	$F_m + f_0 - f_1, F_m + f_0 - f_2, F_m + f_0 - 2f_1 + f_2$ 和 $F_m + f_0 - 2f_2 + f_1$
三级放大	$F_m + f_0 - f_1, F_m + f_0 - f_2, F_m + f_0 - 2f_1 + f_2, F_m + f_0 - 2f_2 + f_1$ 和 $f_2 - f_1, 2(f_2 - f_1), 3(f_2 - f_1), 2(F_m + f_0) - f_1 - f_2, 2(F_m + f_0 - f_1), 2(F_m + f_0 - f_2), 2(F_m + f_0) - 3f_1 - f_2, 2(F_m + f_0) - 3f_2 - f_1$ (忽略3阶互调)
下变频与低通(带通)滤波	$F_L + f_0 - f_1, F_L + f_0 - f_2, F_L + f_0 - 2f_1 + f_2, F_L + f_0 - 2f_2 + f_1, F_L + (f_2 - f_1), F_L + 2(f_2 - f_1), F_L + 3(f_2 - f_1)$

程上可以认为2阶互调低频阻塞效应因子仅取决于辐射频偏，低频干扰相对电平仅取决于2阶互调频差，简化后的2阶互调低频阻塞效应预测模型为

$$R_s(f_2-f_1)=\frac{\beta(f_1-f_0)\beta(f_2-f_0)}{L_r(f_2-f_1)}\frac{E_1(f_1)}{E_{10}(f_1)}\frac{E_2(f_2)}{E_{20}(f_2)}\tag{9}$$

其中的模型参数需要通过带外双频临界干扰效应试验测定(受论文篇幅限制，不再赘述)。\$R_2\geq 1\$时出现2阶互调低频阻塞干扰，\$R_2< 1\$时用频装备能够正常工作。

5.1 模型参数测试结果

设定受试通信电台的工作频率为60 MHz，试验测定受试通信电台低频干扰电平随互调频差的变化关系、2阶互调低频阻塞干扰因子与辐射频偏的关系分别如图5、图6所示。

由于低频干扰电平是决定受试电台能否出现2阶互调低频阻塞干扰的关键技术指标，干扰电平提高20 dB后，可以不再考虑2阶互调低频阻塞干扰对受试通信电台的影响。根据图5测试结果，可以认为受试通信电台出现2阶互调低频阻塞干扰的敏感互调频差为10~135 kHz。

从图6测试结果可以看出，辐射频频过大或过小均不易产生2阶互调低频阻塞干扰，受试通信电台在辐射频偏处于65~880 kHz范围内时，2阶互调低频阻塞干扰不容忽视。

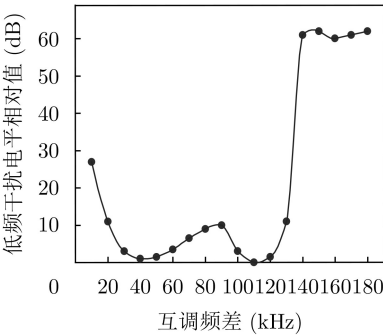


图 5 受试通信电台低频干扰电平随互调频差的变化

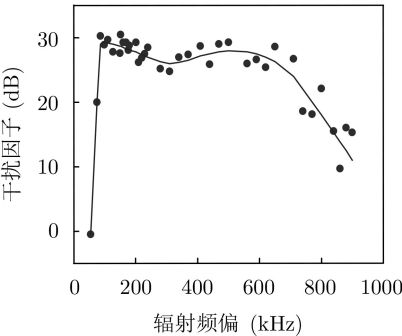


图 6 受试通信电台2阶互调低频阻塞干扰因子随辐射频偏的变化

5.2 低频阻塞干扰效应实验验证

利用受试通信电台在工作频率60 MHz测试确定的2阶互调低频阻塞干扰因子和低频干扰电平相对值，假定其随电磁辐射频偏或互调频差的变化关系不随受试通信电台工作频率变化而变化，改变受试通信电台工作频率，测试不同频偏组合的带外2阶互调低频阻塞干扰临界电场强度组合，按式(4)计算2阶互调低频阻塞干扰效应指数\$R_2\$，验证效应评估的准确性，结果如表4所列。

表 4 2阶互调低频阻塞干扰效应评估准确度							
电台工作频率(MHz)		50	60	70	50	60	70
频率组合(kHz)	f_1-f_0	200	200	200	200	200	230
	f_2-f_0	250	250	250	300	300	330
临界干扰场强比	E_1/E_{10}	-25.0	-28.9	-29.1	-26.3	-30.2	-29.1
	E_2/E_{20}	-23.7	-30.9	-22.0	-28.7	-30.1	-28.9
评估准确度 R_2		4.4	-6.7	2.0	-4.1	-9.4	-7.6

从表4可以看出，虽然受试通信电台的低频干扰电平相对值、2阶互调低频阻塞干扰因子都是在电台工作频率60 MHz的条件下测定的，在试验条件改变后，采用单组2阶互调低频阻塞效应试验验证效应评估的准确度时，电台工作频率60 MHz时的评估误差并不小，说明评估误差源于测试数据的误差，与受试装备工作频率关系不大，从而验证了效应机理分析的正确性。

6 结论

- 本文通信电台单频、双频电磁辐射效应实验表明：
- (1) 受试超短波通信电台电磁辐射敏感带宽约为60 kHz，辐射频偏处于±25~35 kHz范围时，临界干扰场强随辐射频偏增加迅速提高，电磁辐射频偏大于30 kHz时，临界干扰场强较带内提高40~60 dB；
 - (2) 3阶互调敏感属于射频阻塞机理，相对于单频电磁辐射干扰，受试电台对带外双频3阶互调电磁辐射干扰敏感9~23 dB；
 - (3) 当带外双频干扰的2阶、3阶互调频率处于受试电台敏感频带之外时，带外双频电磁辐射敏感机理属于2阶互调低频阻塞机理，即2阶互调频率落入受试装备低频滤波敏感带宽内，导致的低频检波信号阻塞；
 - (4) 受试电台出现2阶互调低频阻塞干扰的敏感条件是：双频互调频差10~135 kHz、辐射频偏65~880 kHz。

参 考 文 献

[1] 孙国至, 刘尚合, 陈京平, 等. 战场电磁环境效应对信息化战争的影响[J]. 军事运筹与系统工程, 2006, 20(3): 43-47. doi:

- 10.3969/j.issn.1672-8211.2006.03.010.
- Guozhi, LIU Shanghe, CHEN Jingping, *et al.* The effects on the information warfare of the electromagnetic environments effectiveness in the battle field[J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2006, 20(3): 43–47. doi: 10.3969/j.issn.1672-8211.2006.03.010.
- [2] 刘尚合, 武占成, 张希军. 电磁环境效应及其发展趋势[J]. 国防科技, 2008, 29(1): 1–6. doi: 10.3969/j.issn.1671-4547.2008.01.001.
- LIU Shanghe, WU Zhancheng, and ZHANG Xijun. Electromagnetic environment effect and its development trends[J]. *National Defense Science & Technology*, 2008, 29(1): 1–6. doi: 10.3969/j.issn.1671-4547.2008.01.001.
- [3] 颜克文. 短波通信设备电磁防护技术研究[D]. [硕士论文], 电子科技大学, 2009: 1–3.
- YAN Kewen. Research on electromagnetic protection technology of short wave communication equipment[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2009: 1–3.
- [4] 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: 87–106.
- WEI Guanghui, PAN Xiaodong, and WAN Haojiang. Feature and Mechanism of Electromagnetic Radiation Effects for Equipment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018: 87–106.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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. doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.20170731032.
- 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. doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.20170731032.
- [8] LI Wei, WEI Guanghui, PAN Xiaodong, *et al.* Electromagnetic compatibility prediction method under the multifrequency in-band interference environment[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 60(2): 520–528. doi: 10.1109/TEMC.2017.2720961.
- [9] 王雅平, 魏光辉, 李伟, 等. 接收机带内双频阻塞干扰机理建模与验证[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(7): 709–714. doi: 10.15918/j.tbit1001-0645.2018.07.008.
- WANG Yaping, WEI Guanghui, LI Wei, *et al.* Mechanism modeling and verification of receiver with in-band dual-frequency blocking jamming[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(7): 709–714. doi: 10.15918/j.tbit1001-0645.2018.07.008.
- [10] 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. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.04.009.
- WANG Yaping, WEI Guanghui, PAN Xiaodong, *et al.* Out-of-band dual frequency jamming prediction model and experiment for communication stations[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(4): 826–831. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.04.009.
- [11] 耿利飞, 魏光辉, 潘晓东, 等. 某型通信电台超宽带辐照效应[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12): 3358–3362. doi: 10.3788/HPLPB20112312.3358.
- GENG Lifei, WEI Guanghui, PAN Xiaodong, *et al.* UWB irradiation effects on communication equipment[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(12): 3358–3362. doi: 10.3788/HPLPB20112312.3358.
- [12] 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动效应分析[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(4): 043201. doi: 10.11884/HPLPB201729.160528.
- WANG Yaping, WEI Guanghui, PAN Xiaodong, *et al.* Analysis on restart effect of communication station under strong field irradiation interference of out-band continuous wave[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29(4): 043201. doi: 10.11884/HPLPB201729.160528.
- [13] 中央军委装备发展部. GJB 8848-2016 系统电磁环境效应试验方法[S]. 2016.
- Equipment development department of the Central Military Commission. GJB 8848-2016 Electromagnetic environmental effects test methods for systems[S]. 2016.
- [14] 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.
- [15] 魏光辉. 射频强场电磁环境试验系统可行性研究[J]. 实验室研究与探索, 2005, 24(6): 21–24. doi: 10.3969/j.issn.1006-7167.2005.06.006.
- WEI Guanghui. Research on the feasibility for constructing a high RF electromagnetic field environment simulation system[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2005, 24(6): 21–24. doi: 10.3969/j.issn.1006-7167.2005.06.006.
- 魏光辉: 男, 1964年生, 教授, 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.
- 赵 凯: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为电磁环境效应试验评估技术.
- 任仕召: 男, 1988年生, 硕士生, 研究方向为电磁环境效应试验评估技术.