

阻塞干扰双频钝感效应规律与作用机理

赵凯 魏光辉*

(陆军工程大学石家庄校区电磁环境效应国家重点实验室 石家庄 050003)

摘要: 该文通过引入幂级数展开式的5阶项对双频干扰下系统非线性失真进行分析, 揭示了阻塞干扰产生双频钝感现象的本质原因, 并进行了试验验证。理论分析与试验结果表明, 当干扰信号强度较弱、系统非线性失真程度较低时, 可用精确到3阶项的幂级数展开式描述其传递函数, 此时受试装备对双频干扰场强的有效值敏感; 随着干扰信号增强, 系统非线性失真程度上升, 幂级数展开式中的5阶项不可忽略, 受试装备对双频干扰出现阻塞效应减弱现象; 阻塞程度越高, 双频阻塞减弱现象越严重。

关键词: 非线性失真; 阻塞干扰; 双频; 钝感效应; 幂级数展开式

中图分类号: TN972; TN956; O441.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)02-0754-06

DOI: 10.11999/JEIT210037

Laws and Mechanism of Dual-frequency Insensitive Effect of Blocking Interference

ZHAO Kai WEI Guanghui

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

Abstract: By introducing the 5th-order term of power series expansion, the nonlinear distortion of the system under dual-frequency interference is analyzed, and the essential reason of dual-frequency insensitive effect caused by blocking interference is revealed, which is verified by experiments. Theoretical analysis and experimental results show that when the interference signal strength is weak and the nonlinear distortion of the system is low, the transfer function can be described by the power series expansion accurate to the 3rd-order term, and the test equipment is sensitive to the effective value of the dual-frequency interference field strength; with the increase of the interference signal, the nonlinear distortion of the system increases, and the 5th-order term in the power series expansion cannot be ignored, and the higher the blocking degree is, the more serious the dual-frequency insensitive effect is.

Key words: Nonlinear distortion; Blocking interference; Dual-frequency; Insensitive effect; Power series expansion

1 引言

随着信息技术的飞速发展和电子设备的广泛应用, 各种电磁信号在空域、时域、频域密集重叠, 电磁环境更加恶劣, 装备工作的可靠性以及生存能力受到严重威胁。当干扰信号进入接收机时, 会使有用信号增益降低, 导致装备性能降级甚至受损。准确预测装备在复杂电磁环境中的生存能力是提高其电磁防护性能的基础工作。

现行的抗扰度测试标准几乎都以单源、单频为背景, 这与实际电磁环境有所出入^[1-3]。有研究指出, 通过单辐射源抗扰度试验后, 装备可能会在强

度较低的多辐射源环境中受到干扰, 包括不同射频频干扰和互调干扰的贡献^[4-6]。在非互调干扰效应方面, 根据阻塞干扰的机理, 可将用频装备分为场强有效值敏感型和场强幅值敏感型两类, 其中场强幅值敏感型对双频干扰更为敏感, 针对这两种类型分别建立了干扰预测模型并进行试验验证^[7-11]。然而, 通过试验中发现, 场强有效值敏感型装备在某些情形下对双频干扰表现出钝感, 导致预测模型误差增大。

本文首先通过电路非线性失真分析, 从理论上探索了场强有效值敏感型装备双频钝感效应规律与作用机理, 而后以某型Ku波段频率步进雷达为受试装备进行试验验证, 对提高用频装备电磁防护能力提供了技术支撑。

收稿日期: 2021-01-11; 改回日期: 2021-04-14; 网络出版: 2021-04-27

*通信作者: 魏光辉 wei-guanghui@sohu.com

2 理论分析

受试装备非线性较弱时, 可使用幂级数表示其传递函数^[10]

$$u_o(t) = a_0 + a_1 u_i(t) + a_2 u_i^2(t) + a_3 u_i^3(t) + a_4 u_i^4(t) + a_5 u_i^5(t) \quad (1)$$

其中, $a_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 是非线性系数, 与电路转移特性相关。一般认为, $a_1, a_5 > 0, a_3 < 0$ ^[12]。

假设装备受到双频干扰, 输入接收机的信号为

$$u_i(t) = A_s E_s \cos \omega_s t + A_1 E_1 \cos \omega_1 t + A_2 E_2 \cos \omega_2 t \quad (2)$$

其中, ω_s, ω_1 与 ω_2 分别为有用信号、双频干扰信号两分量的角频率; A_s, A_1 与 A_2 分别为接收机对有用信号和干扰分量的选择系数, 包含天线系数与射频前端滤波器的幅频系数; E_s, E_1 与 E_2 分别表示有用信号与干扰分量场强幅值; 定义 $A_s E_s, A_1 E_1$ 与 $A_2 E_2$ 分别为有用信号、干扰分量的有效电平。

由式(1)、式(2)可知, 在双频干扰下, 有用信号增益为

$$K_{s_2} = a_1 + a_3 \left(\frac{3}{2} A_1^2 E_1^2 + \frac{3}{2} A_2^2 E_2^2 + \frac{3}{4} A_s^2 E_s^2 \right) + a_5 \left(\frac{15}{8} A_1^4 E_1^4 + \frac{15}{8} A_2^4 E_2^4 + \frac{15}{4} A_1^2 A_s^2 E_1^2 E_s^2 + \frac{15}{4} A_2^2 A_s^2 E_2^2 E_s^2 + \frac{15}{2} A_1^2 A_2^2 E_1^2 E_2^2 + \frac{5}{8} A_s^4 E_s^4 \right) \quad (3)$$

当干扰信号较小时, 一般可忽略式(3)中的 a_5 项。由此可知, 假设系统受到双频干扰信号同时作用, 场强幅值分别为 E_1, E_2 ; 而各干扰分量单独作用时场强幅值为 E_{10}, E_{20} , 若单频、双频干扰对有用信号压制效果相同, 则有式(4)和式(5)成立

$$\begin{aligned} & a_1 + \frac{3}{4} a_3 (2A_1^2 E_1^2 + 2A_2^2 E_2^2 + A_s^2 E_s^2) \\ &= a_1 + \frac{3}{4} a_3 (2A_1^2 E_{10}^2 + A_s^2 E_s^2) \\ &= a_1 + \frac{3}{4} a_3 (2A_2^2 E_{20}^2 + A_s^2 E_s^2) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sqrt{A_1^2 E_1^2 + A_2^2 E_2^2} = A_1 E_{10} = A_2 E_{20} = U_0 \quad (5)$$

$$A_2^2 E_2^2 \geq \sqrt{-\frac{4a_3}{5a_5} - 2A_s^2 E_s^2 - 4A_1^2 E_1^2},$$

$$A_2 E_2 \geq 0,$$

由式(8)、式(9)可知, 当 $-\frac{4a_3}{5a_5} - 2A_s^2 E_s^2 - 4A_1^2 E_1^2 \geq 0$ 时, 随着干扰分量2的增强, 有用信号增益先下降而后上升; 当 $-\frac{4a_3}{5a_5} - 2A_s^2 E_s^2 - 4A_1^2 E_1^2 < 0$

其中, $\sqrt{A_1^2 E_1^2 + A_2^2 E_2^2}$ 表示双频干扰信号的有效电平。

由式(5)可知, 当单频、双频干扰信号有效电平相等时, 两者对有用信号的压制效果相等, 此时系统对干扰信号的场强有效值更为敏感。将式(5)做进一步推导, 可得到如式(6)所示的场强有效值敏感双频电磁辐射效应模型式^[9]

$$R = \left(\frac{E_1}{E_{10}} \right)^2 + \left(\frac{E_2}{E_{20}} \right)^2 = 1 \quad (6)$$

其中, $R = 1$ 表示装备处于临界干扰状态。

由以上讨论可知, 场强有效值敏感双频电磁辐射效应模型实际上是基于3阶非线性失真建立的, 而当干扰信号较强时, 式(4)中的 a_5 项不可忽略。若此时仍沿用该模型, 即以单频、双频干扰信号的有效电平相等为前提, 则两者干扰效果的差异可通过两种干扰情形下有用信号的增益差来分析

$$K_{s_2} - K_{s_1} = \frac{15}{4} a_5 A_1^2 A_2^2 E_1^2 E_2^2 \quad (7)$$

式(7)中, $K_{s_2} - K_{s_1} > 0$, 表明双频干扰下有用信号增益高于单频干扰。另外, 结合式(5)与抛物线方程, 易证当 $A_1 E_1 = A_2 E_2 = U_0 / \sqrt{2}$ 时, $(K_{s_2} - K_{s_1})$ 达到最大值 $15a_5 U_0^4 / 16$, 且 $|A_1 E_1 - A_2 E_2|$ 越小, $(K_{s_2} - K_{s_1})$ 越大。由此可知, 若单频、双频干扰信号有效电平相等, 则双频干扰对有用信号的压制效果一定差于单频干扰, 且两干扰分量有效电平越接近, 效果越差, 装备对双频干扰越钝感; 当双频电磁辐射阻塞效应指数 $R = 1$ 时, 装备并未受到有效干扰。

接下来探究双频干扰中单个分量强度变化对干扰效果的影响。假定系统受到双频干扰, 其中干扰分量1强度保持恒定, 则干扰分量2对有用信号增益的影响可通过下式分析

$$K_{s_2} - K_{s_1} = \frac{3}{2} a_3 A_2^2 E_2^2 + \frac{15}{8} a_5 A_2^2 E_2^2 \cdot (A_2^2 E_2^2 + 2A_s^2 E_s^2 + 4A_1^2 E_1^2) \quad (8)$$

令 $K_{s_2} - K_{s_1} \geq 0$ 时, 可解得

$$\left. \begin{aligned} & -\frac{4a_3}{5a_5} - 2A_s^2 E_s^2 - 4A_1^2 E_1^2 \geq 0 \\ & -\frac{4a_3}{5a_5} - 2A_s^2 E_s^2 - 4A_1^2 E_1^2 < 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

时, 有用信号增益随着该分量的增强而上升。由此可知, 在一定范围内, 双频干扰下有用信号增益与干扰分量2场强幅值 E_2 成正相关, 装备对双频干扰表现出钝感; 在 E_2 相同的情况下, 干扰分量1场强

幅值 E_1 越高, 5阶项的作用效果越明显, $(K_{s_2} - K_{s_1})$ 越高, 即双频干扰中某个分量强度越高, 则随着另一分量的增强, 在上述范围内, 有用信号的增幅越高。

上述对双频钝感效应的规律进行了理论分析, 结合幂级数展开式中非线性系数的特性可知, $a_1, a_5 > 0$ 对有用信号起到了放大作用, 而 $a_3 < 0$ 起到了阻塞作用。由此可认为, 当系统开始出现非线性失真时, 仅需保留幂级数展开式的 a_1 与 a_3 项, 系统对干扰信号的场强有效值敏感, 此时不存在钝感现象; 随着非线性失真程度增加, a_5 项的作用不可忽视, 致使双频钝感现象出现。下面通过开展雷达双频电磁辐射效应试验, 对以上理论分析内容进行验证与完善。

3 试验验证

3.1 试验准备

受试装备为某型0中频体制Ku波段频率步进连续波雷达, 工作频率为 $f_0 \pm 100$ MHz(f_0 为中心频率), 具备静目标测距功能, 并可显示不同目标回波的电平^[13]。具体试验布置如图1所示。使用两台信号发生器产生正弦连续波干扰信号, 辐射天线同时充当雷达的探测目标。频谱仪通过定向耦合器监测干扰功率, 并结合位置替换法与线性外推/内插法获取试验点处实际干扰场强^[14]。

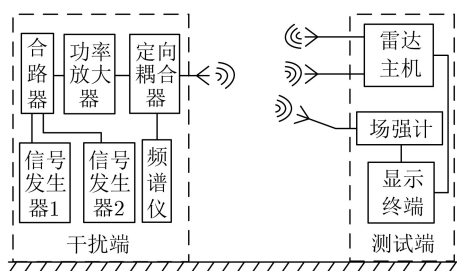


图1 试验配置图

试验中用目标回波峰值电平的压缩量反映有用信号增益的变化。一般来说, 当增益压缩1 dB时, 可认为系统出现了不可忽视的非线性失真^[15]。为比较阻塞程度强弱对双频电磁辐射效应规律的影响, 将峰值电平压缩1.5 dB, 6 dB和12 dB分别作为阻塞干扰敏感判据进行试验研究。

3.2 双频临界干扰特性测试

基于不同的敏感判据与双频干扰频偏, 测定受试雷达的单频、双频临界干扰场强。对于双频干扰频率的选择, 首先要涉及受试雷达工作频带内与带外频率, 以增加验证的可信性; 其次, 要防止双频干扰信号的3阶互调频率落入工作频带内造成额外

干扰^[16]; 另外, 若2阶互调差频频率(即两者频差)小于接收机末级混频器后低通滤波器带宽, 则在某些情形下同样会造成阻塞干扰^[17], 故双频干扰信号的频差要显著高于低通滤波器带宽。结合受试雷达零中频体制的特性, 可选择干扰频偏为0 Hz, 90 MHz与-150 MHz, 150 MHz的双频干扰信号进行试验。

为便于表示, 将双频临界干扰场强组合(E_1, E_2)相对其单频临界干扰场强 E_{10}, E_{20} 进行归一化处理, 并按场强有效值敏感双频电磁辐射效应模型式(6)计算得到双频电磁辐射阻塞效应指数 R , 结果如表1—表3所示。

表1 以峰值电平压缩1.5 dB为敏感判据试验结果

	E_i/E_{i0}			
$\Delta f_1 = 0$ Hz	0.84	0.72	0.66	0.60
$\Delta f_2 = 90$ MHz	0.56	0.72	0.78	0.82
R	1.02	1.03	1.03	1.04
$\Delta f_1 = -150$ MHz	0.88	0.76	0.66	0.53
$\Delta f_2 = 150$ MHz	0.47	0.65	0.78	0.85
R	1.00	1.00	1.04	1.01

表2 以峰值电平压缩6 dB为敏感判据试验结果

	E_i/E_{i0}			
$\Delta f_1 = 0$ Hz	1.09	0.87	0.77	0.68
$\Delta f_2 = 90$ MHz	0.72	0.77	0.83	0.90
R	1.71	1.35	1.29	1.27
$\Delta f_1 = -150$ MHz	0.89	0.80	0.70	0.62
$\Delta f_2 = 150$ MHz	0.66	0.80	0.85	0.89
R	1.24	1.28	1.21	1.18

表3 以峰值电平压缩12 dB为敏感判据试验结果

	E_i/E_{i0}			
$\Delta f_1 = 0$ Hz	1.11	1.06	0.91	0.80
$\Delta f_2 = 90$ MHz	0.99	1.07	1.14	1.16
R	2.22	2.27	2.12	1.98
$\Delta f_1 = -150$ MHz	1.12	0.84	0.70	0.65
$\Delta f_2 = 150$ MHz	0.71	0.91	1.05	1.08
R	1.77	1.52	1.59	1.59

表1是以峰值电平压缩1.5 dB为敏感判据的试验结果, 双频临界干扰归一化场强组合均小于1, 说明双频干扰信号对受试雷达造成有效干扰时, 各干扰分量所需能量小于其单独作用; 双频电磁辐射阻塞效应指数约为1, 说明其符合有效值敏感双频

电磁辐射效应模型, 此时系统可由幂级数展开式1, 3阶项来描述。表2、表3分别是以峰值电平压缩6 dB, 12 dB为敏感判据的试验结果, 出现临界干扰时部分干扰分量归一化场强大于1, 说明双频阻塞效应出现了明显的减弱现象, 双频干扰信号反而削弱了干扰效果; 双频阻塞效应指数均有所上升, 高至1.51, 采用有效值敏感双频电磁辐射效应模型评估其干扰效果误差明显增大。综合以上试验结果可以看出, 当峰值电平压缩6 dB, 12 dB时, 相较于压缩1.5 dB, 系统非线性失真程度增大, 幂级数展开式5阶项的作用不可忽略, 导致出现双频钝感效应; 若此时双频干扰信号场强满足效应指数 $R = 1$, 则受试雷达实际上并未达到临界干扰状态。上述试验结果与第2节理论分析相符。

3.3 有效电平相同时单频、双频干扰效果对比

当受试雷达分别受到不同频率的单频干扰时, 若干扰效果相同, 则各频率干扰信号的有效电平相同^[1]。由此可知, 系统对频偏为 $\Delta f_1, \Delta f_2$ 的干扰信号的选择系数比为

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{E_{20}}{E_{10}} \quad (10)$$

分别以峰值电平压缩6 dB, 12 dB作为敏感判据, 测定不同频偏干扰信号的单频临界干扰场强, 并结合式(10)计算选择系数比 A_1/A_2 , 结果如表4所示。

表4 单频临界干扰场强与选择系数比

峰值电平压缩量	单频临界干扰场强(dBV/m)		A_1/A_2 均值
	6 dB	12 dB	
$\Delta f_1=0$ Hz	5.43	11.18	1.90
$\Delta f_2=90$ MHz	11.10	16.70	
$\Delta f_1=-150$ MHz	6.13	10.93	2.60
$\Delta f_2=150$ MHz	14.26	19.99	

对受试雷达同时施加双频干扰。选定不同的干扰频偏组合, 结合选择系数比 A_1/A_2 调整两个干扰分量场强 E_1, E_2 , 使双频干扰信号有效电平与表4中单频临界干扰有效电平相等, 测量峰值电平压缩量。按照 $\Delta U_{1,2} = |A_1 E_1 - A_2 E_2|$ 计算双频干扰信号两分量的有效电平差, 由于测试的目的仅在于分析规律, 故可令 $A_2 = 1$ m进行计算。结果如表5、表6所示。

由表5、表6可知, 当单频、双频干扰信号有效电平相等时, 在双频干扰下峰值电平压缩量低于单频情形, 双频干扰效果差于单频; 双频干扰信号两个分量的有效电平越接近, 峰值电平压缩量越小, 干扰效果越差, 受试雷达对双频干扰越钝感, 与第2节理论分析相符。

表5 频偏0 Hz, 90 MHz双频干扰试验结果

	$\Delta f_1=0$ Hz	$\Delta f_2=90$ MHz	有效电平差 (V)	峰值电平压缩量(dB)
干扰场强 (dBV/m)	5.43	/	/	5.99
	/	11.10	/	5.98
	-4.20	10.56	2.20	5.24
	-2.20	10.24	1.78	5.07
	0.60	9.34	0.90	4.78
	4.30	4.81	1.38	4.99
干扰场强 (dBV/m)	11.18	/	/	12.01
	/	16.70	/	11.96
	3.80	15.84	3.25	10.15
	5.80	15.23	2.07	9.58
	6.80	14.74	1.30	9.30
	8.80	12.94	0.80	9.13

表6 频偏-150MHz, 150 MHz双频干扰试验结果

	$\Delta f_1=-150$ MHz	$\Delta f_2=150$ MHz	有效电平差 (V)	峰值电平压缩量(dB)
干扰场强 (dBV/m)	6.13	/	/	6.03
	/	14.26	/	6.00
	-2.20	13.71	2.79	5.21
	0.80	12.85	1.49	5.04
	2.30	11.99	0.52	4.93
	5.30	5.95	2.90	5.08
干扰场强 (dBV/m)	10.93	/	/	11.96
	/	19.99	/	11.95
	3.80	19.06	5.01	9.90
	5.80	18.40	3.39	9.74
	8.40	16.44	0.19	9.56
	10.00	12.83	2.94	9.71

3.4 分量强度变化对干扰效果的影响

对受试雷达施加双频干扰。选定敏感判据, 调整干扰分量1的场强 E_1 , 使受试雷达在其单独作用下处于临界干扰状态, 在此基础上调整干扰分量2场强 E_2 , 记录峰值电平压缩量的变化, 结果如图2所示。

从图2可以看出, 当干扰分量1单独作用使峰值电平压缩12 dB时, 随着干扰分量2的增强, 峰值电平压缩量先下降后上升, 即有用信号增益先上升而后下降。增益上升的现象与第2节规律分析相一致, 其机理在于幂级数展开式的5阶项放大了有用信号; 当干扰分量2增强到一定程度后, 干扰分量1的作用可忽略, 此时有用信号增益的变化与单频干扰类似^[12], 随干扰分量2的增强而下降。当干扰分量1单独作用分别使得峰值电平压缩1.5 dB, 6 dB

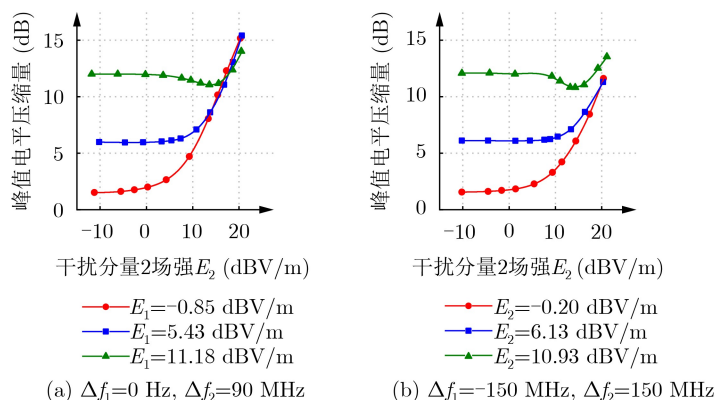


图2 峰值电平压缩量随干扰信号2场强的变化

时,随着干扰分量2的增强,有用信号增益下降。其中,当峰值电平压缩6 dB时,根据前文分析,系统输入输出幂级数展开式的5阶项不可忽略,但是由于此时干扰分量1的强度相对较弱,3阶项仍处于主导地位,钝感现象不明显,有用信号增益的上升过程不明显,被试验误差掩盖。

4 结论

本文通过理论分析与试验验证,对有效值敏感型装备的双频钝感效应规律与作用机理进行了探究,得到结论如下:

(1)场强有效值敏感型装备的双频钝感现象是由幂级数展开式中5阶项引起的。当干扰信号较弱、系统非线性失真程度较低时,非线性系统的传递函数可由精确到3阶项的幂级数展开式来描述,单频、双频干扰信号临界干扰有效电平相等,有用信号增益决定于干扰信号场强有效值,此时不存在双频钝感现象;当干扰信号增强、系统非线性失真程度增加时,幂级数展开式的5阶项不可忽略,出现双频钝感现象。

(2)作为敏感判据的峰值电平压缩量越大,双频信号干扰效率下降越严重,甚至会出现双频临界干扰场强分量高于单频临界干扰场强的情况;当单频、双频干扰信号有效电平相等时,双频干扰效果差于单频,且两个干扰分量有效电平越接近,干扰效果越差。若在单频干扰基础上额外施加单频干扰,随着该单频干扰的增强,有用信号增益先增加后减弱。

(3)对于不同装备而言,需要基于不同敏感现象来选择具体的敏感判据,但敏感现象实质上是由有用信号增益压缩引起的。因此,尽管本文中以峰值电平压缩量作为敏感判据,但据此得到的相关结论完全可向其他情形推广。

参考文献

[1] IEC. CISPR 16-2-2 Specification for radio disturbance and

immunity measuring apparatus and methods-Part 2-2: Methods of measurement of disturbances and immunity- Measurement of disturbance power[S]. IEC, 2010.

[2] 中国人民解放军总装备部. 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.

PLA General Equipment Department. GJB 151B-2013 Electromagnetic emission and susceptibility requirements and measurements for military equipment and subsystems[S]. 2013.

[3] IEC. IEC/TS 61000-1-2 Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 1-2: General- Methodology for the achievement of functional safety of electrical and electronic systems including equipment with regard to electromagnetic phenomena[S]. IEC, 2016.

[4] ARMSTRONG K. How to manage risks with regard to electromagnetic disturbances[C]. 2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Ottawa, Canada, 2016. doi: 10.1109/IEMC.2016.7571610.

[5] ARMSTRONG K, PISSOORT D, DEGRAEVE A, *et al.* Risk management of electromagnetic disturbances[C]. 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, Suntec City, Singapore, 2018: 193-198. doi: 10.1109/IEMC.2018.8393765.

[6] RADASKY W A and ARMSTRONG K. Non-standardized immunity test techniques to help manage risks caused by EM disturbances[C]. 2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Ottawa, Canada, 2016: 84-89. doi: 10.1109/IEMC.2016.7571614.

[7] 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.
- [8] 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. doi: [10.11999/JEIT170107](https://doi.org/10.11999/JEIT170107).
- 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. doi: [10.11999/JEIT170107](https://doi.org/10.11999/JEIT170107).
- [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): 709–814. doi: [10.15918/j.tbit1001-0645.2018.07.008](https://doi.org/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): 709–814. doi: [10.15918/j.tbit1001-0645.2018.07.008](https://doi.org/10.15918/j.tbit1001-0645.2018.07.008).
- [10] 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](https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2720961).
- [11] ZHAO Kai, WEI Guanghui, WANG Yaping, *et al.* Prediction model of in-band blocking interference under the electromagnetic radiation of dual-frequency continuous wave[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2020, 2020: 7651389. doi: [10.1155/2020/7651389](https://doi.org/10.1155/2020/7651389).
- [12] DOMINO W, VAKILIAN N, and AGAHI D. Polynomial model of blocker effects on LNA/mixer devices[J]. *Applied Microwave & Wireless*, 2001, 13(6): 30–44.
- [13] 赵凯, 魏光辉, 潘晓东, 等. 单频电磁辐射对雷达的干扰规律[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(2): 363–368. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2021.02.10](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2021.02.10).
- ZHAO Kai, WEI Guanghui, PAN Xiaodong, *et al.* Interference laws of single frequency electromagnetic radiation to radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(2): 363–368. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2021.02.10](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2021.02.10).
- [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: 87–106.
- WEI Guanghui, PAN Xiaodong, and WAN Haojiang. Feature and Mechanism of Electromagnetic Radiation Effects for Equipment[M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2018: 87–106.
- [15] AL-KANAN H, YANG Xianzhen, and LI Fu. Improved estimation for Saleh model and predistortion of power amplifiers using 1-dB compression point[J]. *The Journal of Engineering*, 2020, 2020(1): 13–18. doi: [10.1049/joe.2019.0973](https://doi.org/10.1049/joe.2019.0973).
- [16] 魏光辉, 王雅平, 潘晓东, 等. 带外电磁辐射三阶互调阻塞干扰预测方法及终端设备[P]. 中国专利, 108833039, 2020.
- WEI Guanghui, WANG Yaping, PAN Xiaodong, *et al.* Out-of-band electromagnetic radiation third-order intermodulation barrage jamming prediction method and terminal equipment[P]. China Patent, 108833039, 2020.
- [17] 魏光辉, 赵凯, 任仕召. 通信电台电磁辐射2阶互调低频阻塞效应与作用机理[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(8): 2059–2064. doi: [10.11999/JEIT190574](https://doi.org/10.11999/JEIT190574).
- WEI Guanghui, ZHAO Kai, and REN Shizhao. Second-order intermodulation low frequency blocking effect and mechanism for communication radio under electromagnetic radiation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(8): 2059–2064. doi: [10.11999/JEIT190574](https://doi.org/10.11999/JEIT190574).
- 赵凯: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为装备强电磁场环境效应试验评估.
- 魏光辉: 男, 1964年生, 教授, 研究方向为电磁环境效应试验评估技术、静电与电磁防护技术.

责任编辑: 余蓉