

# 有意电磁干扰辐照下电子设备响应的 $\infty$ 范数上确界评定方法

梁涛<sup>1,2</sup>, 谢彦召<sup>1,2</sup>, 席志豪<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 为量化表征有意电磁干扰(IEMI)辐照对电子设备的电磁损伤能力,本文围绕 IEMI 辐照下设备响应波形 $\infty$ 范数的上确界评定,通过构建关于时域波形变量的泛函优化问题,求解了能最大化斜率峰值及冲击峰值两类 $\infty$ 范数的 IEMI 辐射场波形,获得了范数上确界关于设备电磁耦合效率函数的解析解。研究发现,能最大化斜率峰值、冲击峰值范数的 IEMI 均为具有宽带脉冲波形特征,且范数上确界分别由耦合效率函数的高频、低频分量强度决定。选取了 Vivaldi 及对数周期两类超宽带天线作为受扰设备,通过对比分析了不同 $\infty$ 范数目标最优 IEMI 波形的时、频域特征,验证了范数定界方法具备准确性及全局最优性。研究解决了 IEMI 辐射波形复杂多变条件下的设备辐射抗扰度量化评估问题,完善了极端条件下的电磁安全评估理论,对于创新 IEMI 抗扰度试验技术及防护加固技术具有指导意义。

**关键词:** 有意电磁干扰;辐射抗扰度;范数定界;泛函优化;超宽带天线

**中图分类号:** O441.4 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202209017 **文章编号:** 0253-987X(2022)09-0160-09



OSID 码

## Assessing Upper Bound of $\infty$ -Norm for Induced Load Response Across Electronic Devices Load Under the Illumination of Intentional Electromagnetic Interferences

LIANG Tao<sup>1,2</sup>, XIE Yanzhao<sup>1,2</sup>, XI Zhihao<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To quantify the radiated susceptibility of electronic devices under illumination of intentional electromagnetic interference (IEMI), the IEMI radiation field waveforms that can maximize both sharpness peak and impulse peak norms are identified, and the analytical solution of the efficiency function of electromagnetic coupling is obtained by assessing the upper bound of  $\infty$ -norm for induced load response across electronic devices load under illumination of IEMI and solving the functional optimization problem about time-domain waveform variables. It is found that the IEMI waveforms maximizing both sharpness peak and impulse peak norms share similar wideband pulsed characteristics, the associated upper bounds are determined by the magnitude of high-frequency and low-frequency components of coupling efficiency, respectively. In addition, ultra-wideband Vivaldi antenna and ultra-wideband log-periodic antenna are used as devices under

收稿日期: 2022-03-26。 作者简介: 梁涛(1991—),男,助理教授。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFF0700101);中国博士后基金资助项目(2020M673396)。

网络出版时间: 2022-05-17

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220517.1447.004.html>

test. The time-domain and frequency-domain characteristics of the optimal IEMI waveform are compared and analyzed for different  $\infty$ -norm targets, and the accuracy and global optimality of the proposed method are verified. The proposed method can be used to assess and quantify the radiated susceptibility of the devices in complicated and varying IEMI radiation conditions, improve the theory of electromagnetic safety assessment under extreme conditions and provide guidance for innovating IEMI radiated susceptibility testing/protection techniques.

**Keywords:** intentional electromagnetic interference; radiated susceptibility; electromagnetic norm delimitation; functional optimization; ultra-wideband antenna

有意电磁干扰(intentional electromagnetic interference, IEMI)是以干扰、毁伤电子设备为目的,人为恶意制造的电磁环境,对设备的电磁安全构成了巨大威胁<sup>[1-4]</sup>。随着脉冲功率、辐射天线等技术的迅速发展, IEMI 干扰源的设计门槛不断降低,相关犯罪案件、恐怖活动、军事应用时有报导,引发了学界对关键设备 IEMI 抗扰度的广泛关注<sup>[5-8]</sup>。

为量化评价受扰设备在辐射电磁环境下的损伤性,前人基于对大量效应试验的总结归纳,发现了电子设备电磁损伤程度同其响应波形范数间的强相关性,由此发展了基于范数的设备抗扰度量化表征评价体系<sup>[9-12]</sup>。具体而言,针对响应波形  $f$  的  $p$  范数定义为

$$\tilde{N}_p^f = \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^p dt \right]^{1/p} \tag{1}$$

式中:根据设备电磁损伤机理的不同,  $f$  可表示电压、电流、电场、磁场等物理量。同设备损伤相关的典型范数如表 1 所示,其中,针对  $\infty$  范数,  $p \rightarrow \infty$  时有  $\tilde{N}_\infty^f = \max\{f(t)\}$ ,同设备损伤相关的  $\infty$  范数包括:①峰值范数  $\tilde{N}_\infty^f$ ,同逻辑翻转、间隙击穿等效应相关,常见敏感设备包括各类模拟电路、数字电路等<sup>[13]</sup>;②斜率峰值范数  $\tilde{N}_\infty^f$ ,同感性元件击穿相关,敏感设备包括变压器、互感器、电感等系线圈类设备<sup>[14]</sup>;③冲击峰值范数  $\tilde{N}_\infty^{intf}$ ,同容性元件击穿相关,敏感设备包括各类电容元件等<sup>[15]</sup>。由此,对电磁环境作用下系统响应范数的评定成为了抗扰度评价的核心,国内外学者针对不同损伤机理的设备,已经开展了大量研究。Nitsch 等以微处理器集成芯片为对象,通过横电磁波(TEM)小室测试了其电磁脉冲(HEMP)、超宽带(UWB)及高功率微波(HPM)下的响应波形,分析了能引发损伤效应的范数阈值<sup>[16]</sup>;Mansson 等通过开阔场测试,监测了卫星定位接收器在 HPM、UWB 作用下的响应,观测到了系统重启、功能丧失等效应现象<sup>[17]</sup>;谢彦召等对某型矿山火工品、电话通信系统、静态随机存储器 3 类

系统开展了 HEMP 效应实验,发现了其损伤机理分别同响应波形的 2 范数、1 范数、 $\infty$  范数呈相关性,进一步证实了范数对广泛类别电子系统电磁损伤程度的表征能力<sup>[12]</sup>。

表 1 响应波形  $f$  的  $p$  范数、对应的物理含义及效应现象

Table 1  $p$ -norm of measurement  $f$ , the associated physical quantity and possible susceptibility effect

| $p$ 范数      | 定义                                                                                  | 物理含义 | 效应现象    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|---------|
| 1 范数        | $\tilde{N}_1^f = \int_{-\infty}^{+\infty}  f  dt$                                   | 整流冲击 | 电介质击穿   |
| 2 范数        | $\tilde{N}_2^f = \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty}  f ^2 dt \right\}^{-1/2}$         | 能量开方 | 器件过热、烧毁 |
|             | $\tilde{N}_\infty^f = \max\{ f(t) \}$                                               | 波形峰值 | 逻辑翻转、击穿 |
| $\infty$ 范数 | $\tilde{N}_\infty^f = \max\{ df/dt \}$                                              | 斜率峰值 | 感性元件击穿  |
|             | $\tilde{N}_\infty^{intf} = \max\left\{\left  \int_{-\infty}^t f dt \right \right\}$ | 冲击峰值 | 容性元件击穿  |

上述针对 HEMP、UWB、HPM 等电磁环境的典型设备抗扰度研究建立在明确辐射场时域波形的基础之上,然而, IEMI 人为制造的特点决定了其波形更为随机、智能,设计者可利用多种技术,产生不同波形的 IEMI(例如,不同频段窄带脉冲、双指数脉冲、高斯脉冲、正弦衰减波等)<sup>[18]</sup>。不同辐射 IEMI 波形作用于电子设备的耦合效率差异巨大,难以通过穷举所有可能波形的方法评定系统的响应范数。

为克服辐射波形随机多变给设备 IEMI 抗扰度评定带来的挑战。作者在前序研究中提出了在约束 IEMI 辐射能量密度的条件下,视其波形为连续随机变量,优化研究任意可能波形 IEMI 作用下受扰设备响应范数的上确界(损伤程度最大的情况),以此表征设备 IEMI 抗扰度。该思路体现了对设备受 IEMI 辐照最极端情况的分析,适用于对电磁安全

性具有较高要求的电子设备。依照该思路,前期对整流冲击(1范数)、能量(2范数)及峰值( $\infty$ 范数)的范数定界问题进行了研究<sup>[19-22]</sup>,发现 IEMI 辐照下系统响应的 1 范数不存在上确界,窄带脉冲作用下会发散至无穷;2 范数上确界在 IEMI 为调谐窄带波形时可获得,其大小由系统耦合效率函数谐振峰值决定;波形峰值范数( $\infty$ 范数)在 IEMI 频谱同系统耦合效率函数共轭匹配时达到最大,表现为复杂的时域宽带波形。对比表 1 可知,尚缺失针对斜率峰值、冲击峰值的范数定界分析,对 $\infty$ 范数敏感型目标设备的 IEMI 抗扰度评定有待深入研究。

由此,为完善 IEMI 辐照下的设备响应范数定界方法理论体系,本文进一步研究了针对斜率峰值、冲击峰值的上确界评定问题,通过构建泛函优化问题,研究对设备最具毁伤能力的入射场波形特征,补全了面向 $\infty$ 范数敏感型设备的 IEMI 抗扰度评估方法。建立了 IEMI 辐照设备模型,通过构建并求解等效最优优化问题,获得了 $\infty$ 范数上确界解析解;将方法应用于 Vivaldi 天线及对数周期天线(LPDA)两类超宽带天线,对比分析了最大化斜率峰值、冲击峰值的 IEMI 波形特征,研究了范数上确界评定方法的准确性。

## 1 IEMI 辐照下设备 $\infty$ 范数定界方法

### 1.1 IEMI 辐照电子设备模型

考虑到 IEMI 干扰源通常位于受扰设备的远场范围,可假设其辐射场为线性极化的平面电磁波,电场分量为  $\hat{E}_i$ ,磁场分量为  $\hat{H}_i = Z_0^{-1} \mathbf{k} \times \hat{E}_i$ ,其中  $\mathbf{k}$  为电磁场传播向量, $Z_0 = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \approx 377 \Omega$  为空间波阻抗, $\epsilon_0$ 、 $\mu_0$  分别为自由空间的介电常数及磁导率。“ $\wedge$ ”表示变量为频变相量<sup>[23]</sup>。

IEMI 入射及极化角定义如图 1 所示,考虑在球坐标系下定义 IEMI 的入射方向及极化方向,电场可分解为  $\mathbf{u}_\theta$  及  $\mathbf{u}_\phi$  方向分量的矢量和, $\hat{E}_i =$

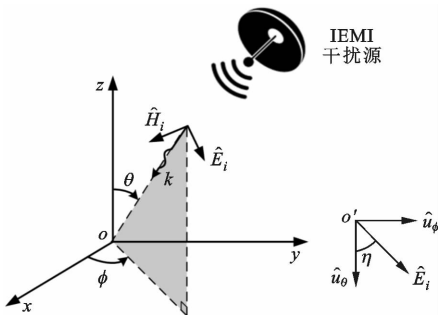


图 1 IEMI 入射及极化角定义

Fig. 1 Incidence and polarization angles of IEMI

$\hat{E}(\cos \eta \cdot \mathbf{u}_\theta + \sin \eta \cdot \mathbf{u}_\phi)$ ,其中  $\eta$  为入射波极化角。假设受扰设备的敏感负载  $\hat{Z}_L$  位于坐标系原点,IE-MI 辐照下,负载感应电压  $\hat{V}_L$  的 $\infty$ 范数过高可导致负载失效,进而引发设备效应现象。定义电磁场同受扰设备的频域耦合效率函数  $\hat{L} = \hat{V}_L / \hat{E}$ 。

通过全波电磁仿真软件仿真或试验测量等方法,可在频域内获得受扰设备在任意(入射方向、极化角)IEMI 辐照下的耦合效率  $\hat{L}(\omega)$ <sup>[24]</sup>。再利用逆傅里叶变换,可计算任意 IEMI 激励下的负载感应电压波形为

$$V_L(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{L}(\omega, \theta, \phi, \eta) \hat{E}(\omega, \theta, \phi, \eta) e^{j\omega t} d\omega \quad (2)$$

至此,可获得 IEMI 辐照电子设备的耦合模型,耦合效率函数  $\hat{L}$  包含了对电子设备的认知信息,将用做范数定界研究的输入。

### 1.2 峰值范数上确界评定结论

以下简要回顾针对峰值 $\infty$ 范数定界研究结论。令测量  $f(t) = V_L(t)$ ,将式(2)同表 1 中峰值范数表达式联立,可给出任意波形 IEMI 辐照下设备响应的峰值范数。考虑到实际 IEMI 辐射源的带宽及辐射场能量密度有限, IEMI 应满足带宽约束条件  $\hat{E}(\omega) = 0, \omega \notin [\omega_1, \omega_2]$ ,以及能量密度约束条件

$$\frac{1}{2\pi Z_0} \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{E}|^2 d\omega = W_E \quad (3)$$

以波形峰值 $\infty$ 范数为最大化目标,可将 IEMI 最优波形辨识等价于以下优化问题

$$\begin{cases} \max & \tilde{N}_{\infty}^{V_L} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{L} \hat{E} e^{j\omega t_p} d\omega \\ \text{s. t.} & \frac{1}{2\pi Z_0} \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{E}|^2 d\omega = W_E \end{cases} \quad (4)$$

式中  $t_p$  为波形达到峰值的时刻。文献[5]利用拉格朗日乘法获得了该问题的最优解析解,即

$$\hat{E}(\omega) = -j\hat{L}^* \sqrt{\frac{\pi Z_0 W_E}{\int_0^{+\infty} |\hat{L}|^2 d\omega}} e^{-j\omega t_p} \quad (5)$$

可见,当 IEMI 的频谱同耦合效率函数  $\hat{L}$  共轭匹配时,可使感应电压的峰值范数达到理论最大值

$$\tilde{N}_{\infty}^{V_L} = \sqrt{\frac{Z_0 W_E}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{L}|^2 d\omega} \quad (6)$$

### 1.3 斜率峰值( $\tilde{N}_{\infty}^f$ )范数上确界评定

类似 1.2 节中等效优化问题的构建方法,以斜率峰值 $\infty$ 范数( $\tilde{N}_{\infty}^f$ )为最大化目标,假设  $t = t_d$  时,电压波形的斜率达到其最大值,即  $dV_L/dt|_{t=t_d} = \max(|dV_L/dt|)$ ,可得斜率峰值关于耦合效率函数

的表达式为

$$\tilde{N}_{\infty}^{V_L} = dV_L/dt|_{t=t_d} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F[dV_L/dt] e^{j\omega t_d} d\omega \quad (7)$$

式中  $F(\cdot)$  表示傅里叶变换。利用傅里叶变换的微分性质  $F[dV_L/dt] = j\omega F[V_L] = j\omega \hat{L} \hat{E}$ , 结合约束条件, 可将  $\tilde{N}_{\infty}^{V_L}$  敏感型设备的 IEMI 最优波形辨识问题等价求解以下最优化方程

$$\begin{cases} \max \tilde{N}_{\infty}^{V_L} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} j\omega \hat{L} \hat{E} e^{j\omega t_d} d\omega \\ \text{s. t. } \frac{1}{2\pi Z_0} \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{E}|^2 d\omega = W_E \end{cases} \quad (8)$$

其中, 目标函数可视为 Hilbert 空间中的内积形式, 即  $\tilde{N}_{\infty}^{V_L} = (2\pi)^{-1} \cdot \langle j\omega \hat{L} e^{j\omega t_d}, \hat{E}^* \rangle$ , 由 Cauchy-Schwarz 不等式可知

$$\tilde{N}_{\infty}^{V_L} \leq \frac{1}{2\pi} \|j\omega \hat{L} e^{j\omega t_d}\| \cdot \|\hat{E}^*\| \quad (9)$$

式中  $\|x\| = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} |x(\omega)|^2 d\omega}$  是频域向量  $x$  的模。同理, 由约束条件可知

$$\|\hat{E}^*\| = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{E}(\omega)|^2 d\omega} = \sqrt{2\pi Z_0 W_E} \quad (10)$$

式(9)中等号成立的条件是存在常数  $C_1$ , 使得

$$\hat{E}^* = j\omega \hat{L} e^{j\omega t_d} C_1 \quad (11)$$

联立式(10)和(11), 可求得常数为

$$C_1 = \sqrt{\frac{\pi Z_0 W_E}{\int_{-\infty}^{+\infty} |\omega \hat{L}|^2 d\omega}} \quad (12)$$

由此, 可求得问题式(8)的最优解析解为

$$\hat{E}(\omega) = -j\omega \hat{L}^* \sqrt{\frac{\pi Z_0 W_E}{\int_{-\infty}^{+\infty} |\omega \hat{L}|^2 d\omega}} e^{-j\omega t_d} \quad (13)$$

可见, 当 IEMI 电场的频谱同  $j\omega \hat{L}$  呈共轭匹配时, 可最大化负载电压响应波形的  $\tilde{N}_{\infty}^{V_L}$  范数, 实现对敏感型设备毁伤性的最大化。将式(13)中 IEMI 作为受扰设备的激励场, 可得到负载感应电压波形为

$$V_L(t) = \sqrt{\frac{\pi^{-1} Z_0 W_E}{\int_{-\infty}^{+\infty} |\omega \hat{L}|^2 d\omega}} \int_0^{+\infty} \omega |\hat{L}|^2 \sin[\omega(t - t_d)] d\omega \quad (14)$$

通过变量替换可知  $V_L(t) = -V_L(2t_d - t)$ , 最优波形式(13)辐照下的设备感应电压波形相对于最大值时刻( $t = t_d$ )奇对称, 且斜率峰值时刻的感应电压波形过零  $V_L(t_d) = 0$ 。理论最大斜率峰值仅由受扰

设备的耦合效率  $\hat{L}$  决定

$$\tilde{N}_{\infty}^{V_L} = \sqrt{\frac{Z_0 W_E}{\pi}} \int_0^{+\infty} |\omega \hat{L}|^2 d\omega \quad (15)$$

同式(6)相比, 波形峰值  $\tilde{N}_{\infty}^{V_L}$  同波形斜率峰值  $\tilde{N}_{\infty}^{V_L}$  对应的 IEMI 最优波形在形式上非常相似, 区别仅在于被积分函数的形式, 前者由  $|\hat{L}|^2$  积分决定, 所考虑频段内的耦合效率贡献相当, 而后者同  $|\omega \hat{L}|^2$  积分相关, 显然高频段的耦合效率对斜率贡献更大, 结论符合常识预期。

#### 1.4 冲击峰值( $\tilde{N}_{\infty}^{int}$ )上确界评定

类似以上方法, 考虑冲击峰值敏感型受扰设备的 IEMI 极端耦合情况时, 需将  $\tilde{N}_{\infty}^{int V_L}$  作为最大化目标。假设  $t = t_i$  时, 感应电压波形的冲击达到其最大值, 即  $\int_{-\infty}^{t_i} V_L dt = \max\left(\left|\int_{-\infty}^{t_i} V_L dt\right|\right)$ , 则有

$$\begin{aligned} \tilde{N}_{\infty}^{int V_L} &= \int_{-\infty}^{t_i} V_L dt|_{t=t_i} = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F\left[\int_{-\infty}^{t_i} V_L dt\right] e^{j\omega t_i} d\omega \end{aligned} \quad (16)$$

由傅里叶变换性质可知

$$F\left[\int_{-\infty}^{t_i} V_L dt\right] = \frac{1}{j\omega} \hat{V}_L(\omega) + \pi \hat{V}_L(0) \delta(\omega) \quad (17)$$

式中  $\delta(\omega)$  是冲击函数。由于电磁场直流成分无法辐射, 可知式(17)中  $\hat{V}_L(0) = 0$ , 因此, 可简化  $\tilde{N}_{\infty}^{int V_L}$  敏感型设备的 IEMI 最优波形辨识问题为

$$\begin{cases} \max \tilde{N}_{\infty}^{int V_L} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{j\omega} \hat{L} \hat{E} e^{j\omega t_i} d\omega \\ \text{s. t. } \frac{1}{2\pi Z_0} \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{E}|^2 d\omega = W_E \end{cases} \quad (18)$$

Hilbert 空间中, 由 Cauchy-Schwarz 不等式可知, 电压波形的冲击峰值满足

$$\tilde{N}_{\infty}^{int V_L} \leq \frac{1}{2\pi} \left\| \frac{\hat{L} e^{j\omega t_i}}{j\omega} \right\| \|\hat{E}^*\| \quad (19)$$

式(19)中等号成立的条件是存在常数  $C_2$ , 使得

$$\hat{E}^* = C_2 \frac{\hat{L} e^{j\omega t_i}}{j\omega} \quad (20)$$

式(20)同约束条件式(10)联立, 可得常数  $C_2$  应满足

$$C_2 = \sqrt{\frac{\pi Z_0 W_E}{\int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{L}/\omega|^2 d\omega}} \quad (21)$$

代入式(20)可得所辨识的 IEMI 最优波形频谱及其负载响应电压波形分别为

$$\begin{aligned} \hat{E}(\omega) &= -\frac{\hat{L}^*}{j\omega} \sqrt{\frac{\pi Z_0 W_E}{\int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{L}/\omega|^2 d\omega}} e^{-j\omega t_i} \\ V_L(t) &= \end{aligned} \quad (22)$$

$$-\sqrt{\frac{\pi^{-1}Z_0W_E}{\int_0^{+\infty}|\hat{L}/\omega|^2d\omega}}\int_0^{+\infty}\frac{|\hat{L}|^2}{\omega}\sin[\omega(t-t_i)]d\omega \quad (23)$$

IEMI 最优电场波形频谱及负载电压响应波形在形式上分别同式(13)和式(14)相似,电场的频谱分布应同  $\hat{L}/(j\omega)$  共轭匹配,低频分量对冲击峰值的贡献更为显著。对应的感应电压波形同样关于  $t = t_i$  时刻呈奇对称,且冲击峰值时刻恰为响应电压的过零点,即  $V_L(t_i) = 0$ 。此外,将式(23)代入  $\tilde{N}_{\infty}^{\text{int}V_L}$  范数的定义中,可获得冲击峰值的理论上确界为

$$\tilde{N}_{\infty}^{\text{int}V_L} = \sqrt{\frac{Z_0W_E}{\pi}\int_0^{+\infty}\left|\frac{\hat{L}}{\omega}\right|^2d\omega} \quad (24)$$

可见,  $\tilde{N}_{\infty}^{\text{int}V_L}$  同样仅由耦合效率  $\hat{L}$  决定,同具体选择的峰值时刻  $t_i$  不相关。至此,通过严格分析,已经证明了 IEMI 辐照下设备感应电压的斜率峰值  $\tilde{N}_{\infty}^f$ 、冲击峰值  $\tilde{N}_{\infty}^{\text{int}f}$  均存在理论上限,且 IEMI 最优电场波形是同系统耦合函数相关的宽带电磁脉冲波形,斜率峰值及冲击峰值的最大值即可作为评估相应系统 IEMI 抗扰度的特征指标。综合前期针对波形峰值  $\tilde{N}_{\infty}^f$  的研究结论,已构建并求解了覆盖表 1 中 3 类常见  $\infty$  范数的等价优化问题,完善了面向  $\infty$  范数敏感型设备的 IEMI 抗扰度评估方法。

## 2 针对超宽带天线目标的 $\infty$ 范数定界问题

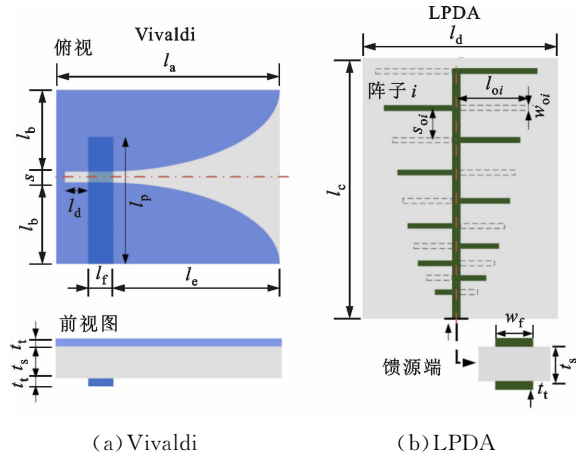
本节选取了 Vivaldi 及 LPDA 两类超宽带天线作为受扰电子设备<sup>[25-26]</sup>,利用所提范数定界方法,分析了 IEMI 辐照受扰天线的极端情况,对比讨论了不同范数目标下 IEMI 最优波形的时频域特征。

### 2.1 受扰天线宽带耦合效率

Vivaldi、LPDA 天线均为典型的超宽带天线,基于 PCB 技术设计的两类受扰超宽带天线结构如图 2 所示。选用 FR-4 环氧玻璃布层压板(相对介电常数为 4.3,介质损耗角正切为 0.025)作为 PCB 基板材料,基材厚度  $t_s = 2$  mm,天线贴片及微带馈线分别位于基板两侧,材质均为厚度  $t_t = 38$   $\mu\text{m}$ 、电导率为 58 MS/m 的退火纯铜。

如图 2(a)所示, Vivaldi 天线总长度  $l_a = 41$  mm,宽度  $2l_b + s = 30$  mm。天线开口按照指数函数变化规律延伸至基板末端,贴片层关于  $y$  轴对称,其中  $l_b = 14.5$  mm,  $l_c = 31$  mm。其他微带馈线结构参数为  $l_f = 5$  mm,  $l_d = 3$  mm,  $l_p = 20$  mm。LPDA 天线由 10 根上下两层交错布放的阵子组成,结构如图

2(b)所示,由馈源端至远端,将阵子由 1~10 编号,则阵子长度  $l_{o1} \sim l_{o10}$  分别为  $[3.34, 4.08, 4.98, 6.08, 7.41, 9.04, 11.02, 13.45, 16.40, 20.00]$  mm;宽度  $w_{o1} \sim w_{o10}$  分别为  $[0.57, 0.69, 0.84, 1.03, 1.26, 1.54, 1.87, 2.29, 2.79, 3.40]$  mm;间距分别为  $[11.97, 2.05, 2.50, 3.05, 3.71, 4.53, 5.53, 6.74, 8.19, 10.03]$  mm。天线长度  $l_c = 70$  mm,总宽度  $l_d = 50$  mm;  $w_f = 1$  mm。



(a) Vivaldi

(b) LPDA

图 2 受扰超宽带天线

Fig. 2 UWB antenna under illumination

不失一般性的条件下,假设天线端口端接负载  $\hat{Z}_L = 50 \Omega$ , IEMI 辐照所感应的负载电压  $V_L$  范数同天线系统毁伤具有相关性。利用有限积分法,可计算受扰天线在宽频带内的耦合效率函数  $\hat{L}$ ,针对 Vivaldi、LPDA 天线,令 IEMI 的入射角、极化角分别为  $\theta = 70^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\eta = 45^\circ$ ; 及  $\theta = 180^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\eta = 45^\circ$ 。图 3 计算了  $[3 \text{ GHz}, 6 \text{ GHz}]$  频段内天线的耦合效率幅值  $|\hat{L}|$ 。计算结果表明, LPDA 天线的耦合效率在全频带内优于 Vivaldi 天线,两类天线均具有宽频带电磁耦合能力,适合作为 IEMI 抗扰度评估的受扰设备。

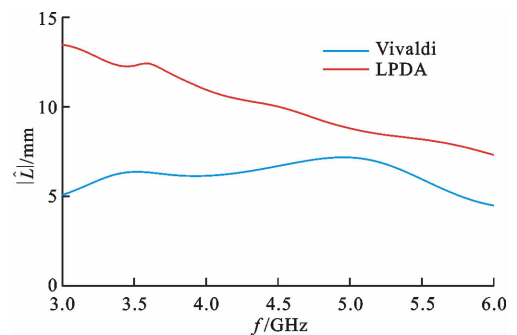


图 3 超宽带受扰天线耦合效率函数曲线

Fig. 3 Coupling coefficient evaluated for UWB antenna

2.2 IEMI 辐射波形及天线端口响应波形的时、频域特征分析

假设 IEMI 是频谱能量分布在 $[3\text{ GHz}, 6\text{ GHz}]$ 内的任意波形平面电磁场干扰,辐射场的能量密度不超过 $W_E=1\text{ mJ/m}^2$ 。考虑最大化负载波形的斜率峰值、冲击峰值两种情况,假设相应范数均在 $t=t_d=t_i=10\text{ ns}$ 时达到最大。由式(13)、式(22)可分别计算两种极端耦合情况下所需施加的 IEMI 最优波形频谱,结果如图 4 所示。

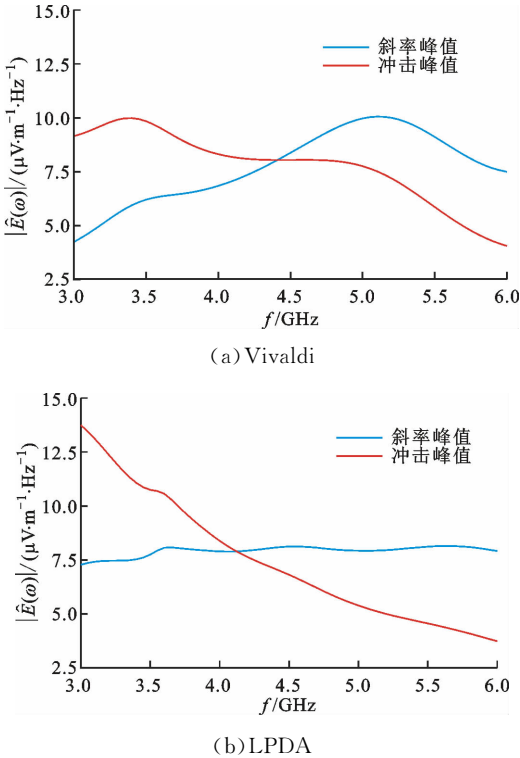


图 4 IEMI 最优波形的频谱  
Fig. 4 Optimized IEMI spectra

图 4 与图 3 中耦合效率幅值 $|\hat{L}|$ 相比,最大化斜率峰值的 IEMI 将更多频谱能量分布在高频段,而最大化冲击峰值的 IEMI 频谱低频能量更为丰富。

利用逆傅里叶变换,可进一步获得最优 IEMI 电场分量的时域波形,结果如图 5 所示,为突出波形的细节差异,仅绘制了 $[8, 12]\text{ ns}$ 内的电场波形,可见, IEMI 最优时域波形并非双指数、高斯等常见简单波形,而是不断振荡衰减的双极性复杂波形,针对 Vivaldi 及 LPDA 天线的最优 IEMI 波形十分相似,但是细节上存在差异,大多能量集中于 2~3 个振荡周期内,波形幅值约为 45 kV/m。若考虑不同能量密度约束 $W_E$ ,仅需等比例增减辐射场幅值,无需改变具体时域波形的细节特征。

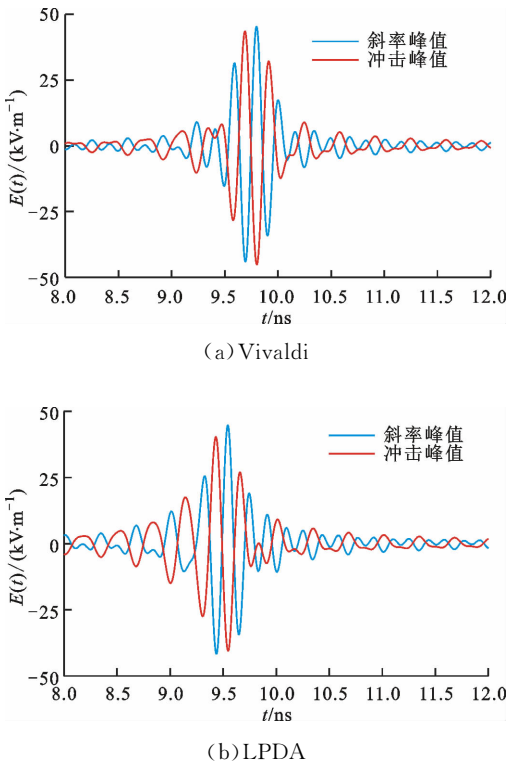
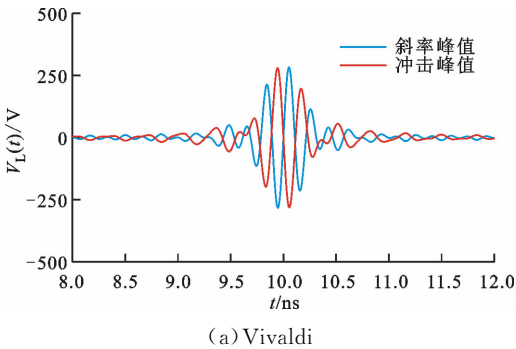


图 5 IEMI 最优时域波形  
Fig. 5 Optimized time-domain waveform of IEMI

将图 4、图 5 中给出的波形作为 IEMI 激励场,辐照受扰 Vivaldi 天线,可得到天线负载上感应电压时域波形如图 6 所示。针对同一天线,斜率峰值/冲击峰值最优波形所感应的响应电压均相对于极值时刻 $t=10\text{ ns}$ 奇对称,且该时刻对应电压波形的过零点。由于 LPDA 耦合效率高于 Vivaldi 天线,可发现响应波形的幅值及对应 $\infty$ 范数也明显增加。

3 范数上确界最优性验证

为验证上述 IEMI 最优波形具备对受扰天线的最强损伤能力,可用于极端条件下的设备 IEMI 辐照抗扰度的量化表征。本节选取了均匀频谱波形、宽带高斯波形、窄带高斯波形 3 种典型 IEMI 环境作为辐射激励场,通过对比典型 IEMI 波形及最优





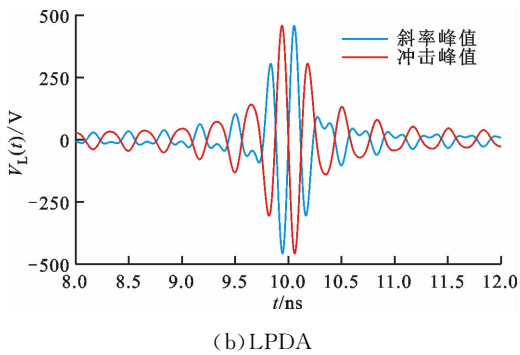


图6 天线负载感应电压时域波形

Fig. 6 The worst-case IEMI induced load voltage waveform for maximizing peak derivative and peak impulse

波形作用下的负载电压响应波形及其范数,验证方法的最优性。选取的3种典型 IEMI 电场频谱分布如图7所示,其能量密度均归一化至约束条件,即  $W_E = 1 \text{ mJ/m}^2$ 。

具体而言,均匀频谱波形在  $[3 \text{ GHz}, 6 \text{ GHz}]$  频段内的幅值完全相同,相位均为0;宽带高斯波形服从文献[24]中定义,为减小频谱泄漏的影响,将90%的能量强制约束在所考虑频段内<sup>[24]</sup>;窄带高斯波形中心频谱为系统谐振点  $f_c = 5 \text{ GHz}$ ,带宽比为1.01,其对应的时域波形为快速上升并衰减的正弦波形。

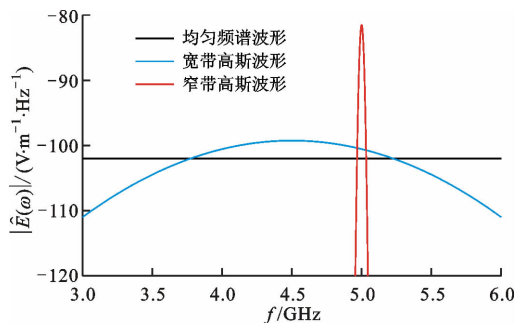


图7 3种典型 IEMI 的频域分布

Fig. 7 Spectra of three canonical IEMI waveforms

为简化起见,仅以 Vivaldi 天线为例,图8及图9分别给出了不同 IEMI 激励下(均匀频谱、高斯两种典型宽带 IEMI 波形及斜率峰值/冲击峰值最优波形式(13)、(22)),受扰天线负载响应电压波形的  $\infty$  范数( $\tilde{N}_{\infty}^{V_L}$  和  $\tilde{N}_{\infty}^{intV_L}$ )随时间变化关系,窄带高斯波形响应在时域内持续时间较长,无法同宽带 IEMI 响应在同一图中清晰标明,因此未包含在图8、图9中。

由图8、图9可知,所辨识的斜率峰值/冲击峰值最优波形均在预期的  $t = 10 \text{ ns}$  达到对应范数上

确界,即  $\tilde{N}_{\infty}^{f'} = 8.52 \times 10^{12} \text{ V/s}$ ,  $\tilde{N}_{\infty}^{intf} = 1.11 \times 10^{-8} \text{ V} \cdot \text{s}$ 。均匀峰值及高斯波形的 IEMI 所感应的响应范数稍小,且范数最大值的出现时刻约为  $13.6 \text{ ns}$ ,无法如最优波形一样做到精确控制峰值时刻。此外,不考虑幅值的情况下,图8、图9给出的范数随时间变化规律十分相似,其原因可能在于受扰设备具有较为平坦的宽带耦合效率函数。

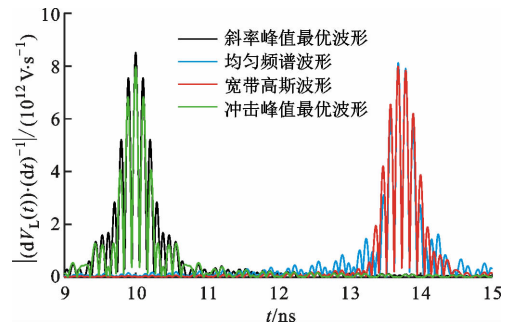


图8 不同 IEMI 激励下 Vivaldi 天线负载电压波形的斜率  
Fig. 8 Derivative of induced voltage waveform across Vivaldi antenna load under illumination of different IEMI environment

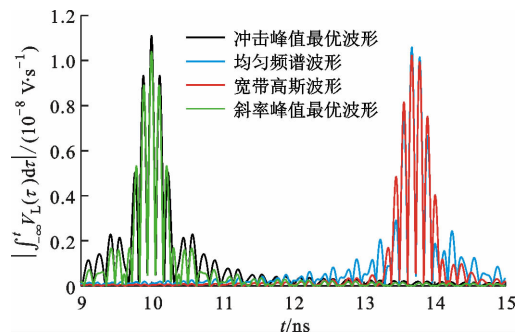


图9 不同 IEMI 激励下 Vivaldi 天线负载响应电压  
波形积分

Fig. 9 Indefinite integral of induced voltage across Vivaldi antenna load under illumination of different IEMI environment

表2给出了包含窄带高斯波形在内 IEMI 所激励的两类 UWB 天线响应  $\infty$  范数。可知,调谐的窄带 IEMI 所能感应的响应范数远小于宽带波形,对于 Vivaldi 天线,  $\tilde{N}_{\infty}^{f'} = 1.43 \times 10^{12} \text{ V/s}$ ,  $\tilde{N}_{\infty}^{intf} = 0.15 \times 10^{-8} \text{ V} \cdot \text{s}$ , 不高于范数上确界的20%;对于 LPDA 天线,  $\tilde{N}_{\infty}^{f'} = 1.76 \times 10^{12} \text{ V/s}$ ,  $\tilde{N}_{\infty}^{intf} = 1.84 \times 10^{-9} \text{ V} \cdot \text{s}$ , 仅为范数上确界的10%左右。均匀脉冲、高斯脉冲等宽带波形所能激励的响应  $\infty$  范数明显更大,但是仍低于所评定范数上确界。通过表2比较,可验证解析所得 IEMI 波形具备最优性,斜率峰值  $\tilde{N}_{\infty}^{f'}$ 、冲击峰值  $\tilde{N}_{\infty}^{intf}$  上确界可作为特征指标,量化表征  $\infty$  范数敏感型设备的 IEMI 辐射抗扰度。

表 2 不同 IEMI 激励下的天线负载电压波形 $\infty$ 范数

Table 2  $\infty$ -norm of voltage waveform across antenna load under illumination of different IEMI environment

| IEMI   | Vivaldi                                                       |                                                                | LPDA                                                          |                                                                |
|--------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|        | $\tilde{N}'_{\infty}/(10^{12} \text{ V} \cdot \text{s}^{-1})$ | $\tilde{N}^{intf}_{\infty}/(10^{-8} \text{ V} \cdot \text{s})$ | $\tilde{N}'_{\infty}/(10^{12} \text{ V} \cdot \text{s}^{-1})$ | $\tilde{N}^{intf}_{\infty}/(10^{-9} \text{ V} \cdot \text{s})$ |
| 斜率峰值最优 | 8.52                                                          | 1.04                                                           | 13.10                                                         | 18.20                                                          |
| 冲击峰值最优 | 7.96                                                          | 1.11                                                           | 10.00                                                         | 19.60                                                          |
| 均匀频谱   | 8.12                                                          | 1.06                                                           | 12.30                                                         | 16.70                                                          |
| 宽带高斯   | 7.98                                                          | 1.02                                                           | 12.00                                                         | 15.80                                                          |
| 窄带高斯   | 1.43                                                          | 0.15                                                           | 1.76                                                          | 1.84                                                           |

4 结 论

本文将 IEMI 辐照电子设备的范数定界问题拓展到斜率峰值、冲击峰值两类 $\infty$ 范数敏感型设备的 IEMI 辐射抗扰度评估中,通过严格求解,获得了能最大化设备相应范数的波形解析解,进一步分析发现以下几点:

(1)峰值、斜率峰值、冲击峰值 3 类 $\infty$ 范数对应的 IEMI 最优波形均由系统电磁耦合效率函数决定,呈现复杂宽带脉冲的波形特征;

(2)最优波形的解析表达式相似,但是在 IEMI 频谱能量的分配上有所区分,最大化峰值范数要求 IEMI 频谱同耦合效率  $\hat{L}$  共轭匹配,而最大化斜率峰值、冲击峰值范数则需分别分配更多能量至高频、低频段,使 IEMI 频谱分别同  $\omega\hat{L}$ 、 $\omega^{-1}\hat{L}$  呈共轭匹配关系;

(3)针对 Vivaldi、LPDA 天线等典型宽带受扰设备,设计的宽带 IEMI 波形较其他常规宽带、窄带波形更具对设备的毁伤能力,范数上确界适合作为表征设备 IEMI 损伤性的量化指标。

综上所述,从底线思维角度出发,解决了 IEMI 波形复杂多变条件下,无穷范数敏感性设备的辐射抗扰度量化评价问题。研究结论可进一步被抗扰度测试、防护效能评估等研究所借鉴,对于提升关键设备的 IEMI 生存能力具有重要基础理论意义。

参考文献:

[1] RADASKY W A, BÄCKSTRÖM M. Brief historical review and bibliography for intentional electromagnetic interference (IEMI) [C] // 2014 31st URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1-4.

[2] SABATH F. What can be learned from documented intentional electromagnetic interference (IEMI) attacks? [C] // 2011 30th URSI General Assembly and

Scientific Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1-4.

[3] 熊久良,武占成. 超宽带对典型调频引信安全性的影响 [J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1997-2002.

XIONG Jiuliang, WU Zhancheng. Effect of ultra-wide band on security of typical frequency modulation fuze [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1997-2002.

[4] 孙晓颖,王震,杨锦鹏,等. 基于贝叶斯网络的电子节气门电磁敏感度评估 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(1): 281-289.

SUN Xiaoying, WANG Zhen, YANG Jinpeng, et al. Electromagnetic susceptibility assessment of electronic throttle based on Bayesian network [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(1): 281-289.

[5] 柯宏发,杜红梅,赵继广,等. 电子装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.

[6] 张爱民,张蕾,张杭,等. 电子设备电磁敏感性仿真分析及优化设计方法 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(8): 5-9.

ZHANG Aimin, ZHANG Lei, ZHANG Hang, et al. Simulation analysis and optimization for the electromagnetic susceptibility of electronic devices [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(8): 5-9.

[7] 张峻宾,蔡金燕,孟亚峰. 面向复杂电磁环境的容错电路系统设计技术 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(2): 53-59.

ZHANG Junbin, CAI Jinyan, MENG Yafeng. A design technology of fault tolerance circuit systems facing complex electromagnetic environments [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(2): 53-59.

[8] 谢彦召,刘民周,陈宇浩. 国家关键基础设施电磁恢复力 [J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(7): 2-9.

XIE Yanzhao, LIU Minzhou, CHEN Yuhao. Electromagnetic resilience of critical national infrastructure



- [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(7): 2-9.
- [9] GIRI D V, HOAD R, SABATH F. High-power electromagnetic effects on electronic systems [M]. Norwood, MA, USA: Artech House, 2020.
- [10] 谢彦召, 相辉, 翟爱斌, 等. 电磁脉冲效应研究中的范数分析方法及应用 [J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30(10): 1287-1293.
- XIE Yanzhao, XIANG Hui, ZHAI Aibin, et al. Applications of various norms in the field of EMP effects [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, 30(10): 1287-1293.
- [11] BAUM C E. Relationships between time-and frequency-domain norms of scalar functions [EB/OL]. [2021-11-10]. <https://www.ursi.org/proceedings/proc-GA02/papers/p2085.pdf>.
- [12] 谢彦召, 孔旭, 和少寅, 等. 电磁脉冲的范数探测及其应用 [J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1221-1227.
- XIE Yanzhao, KONG Xu, HE Shaoyin, et al. Norm detection and application for its electromagnetic pulse study [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1221-1227.
- [13] 汪海洋, 周翼鸿, 李家胤, 等. 低噪声放大器有意电磁干扰效应 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(11): 2865-2871.
- WANG Haiyang, ZHOU Yihong, LI Jiayin, et al. LNA malfunctions under intentional electromagnetic interference [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(11): 2865-2871.
- [14] 翟守阳, 金宇, 刘晏平, 等. 高空核电磁脉冲对变压器耦合效应的研究 [J]. 电瓷避雷器, 2019(5): 15-20.
- ZHAI Shouyang, JIN Yu, LIU Yanping, et al. The study on coupling effect of high altitude nuclear electromagnetic pulse on transformer [J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5): 15-20.
- [15] 王党树, 栾哲哲, 古东明, 等. 基于电荷等效法的电容短路放电微观特性数值模拟研究 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(13): 2684-2696.
- WANG Dangshu, LUAN Zhezhe, GU Dongming, et al. Numerical simulation research on microscopic characteristics of capacitor short-circuit discharge based on charge equivalent method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(13): 2684-2696.
- [16] NITSCH D, CAMP M, SABATH F, et al. Susceptibility of some electronic equipment to HPEM threats [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 380-389.
- [17] MÅNSSON D, THOTTAPPILLIL R, NILSSON T, et al. Susceptibility of civilian GPS receivers to electromagnetic radiation [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(2): 434-437.
- [18] MANSSON D. Intentional electromagnetic interference (IEMI), susceptibility investigations and classification of civilian systems and equipment [D]. Uppsala, Sweden: Uppsala University, 2008: 11-35.
- [19] SPADACINI G, LIANG Tao, GRASSI F, et al. Worst case and statistics of waveforms involved in wideband intentional electromagnetic attacks [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(5): 1436-1444.
- [20] LIANG Tao, SPADACINI G, GRASSI F, et al. Coupling of wideband radiated IEMI to cables above ground [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(2): 589-597.
- [21] LIANG Tao, SPADACINI G, GRASSI F, et al. Worst-case wideband radiated IEMI for unshielded and shielded cables: a statistical analysis of the main influencing parameters [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(4): 1244-1252.
- [22] PIGNARI S A, LINAG Tao, SPADACINI G, et al. Intentional radiated interference: on the worst-case scenario for wiring in smart buildings [J]. SAFETY & EMC, 2020(3): 16-21.
- [23] PAUL C R. Introduction to electromagnetic compatibility [M]. 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2005.
- [24] LIANG Tao, SPADACINI G, GRASSI F, et al. Worst-case scenarios of radiated-susceptibility effects in a multiport system subject to intentional electromagnetic interference [J]. IEEE Access, 2019, 7: 76500-76512.
- [25] WANG Yawei, WANG Guangming, YU Zhongwu, et al. Ultra-wideband E-plane monopulse antenna using Vivaldi antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(10): 4961-4969.
- [26] 任晓飞, 龚书喜, 何绍林. 水平对数周期天线空域极化 [J]. 电波科学学报, 2018, 33(4): 429-435.
- REN Xiaofei, GONG Shuxi, HE Shaolin. Spatial polarization of horizontal log-periodic antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2018, 33(4): 429-435.

(编辑 武红江 亢列梅)