

基于定向耦合装置的宽频带差模电流注入试验技术

潘晓东, 魏光辉, 卢新福, 李新峰

(军械工程学院电磁环境效应国家级重点实验室, 河北石家庄 050003)

摘 要: 本文对一种新型的宽频带差模电流注入试验技术进行了研究. 以设备端口的响应电压相等作为等效依据, 建立了差模电流注入与辐照响应的分析模型和强场条件下注入电压源外推模型, 确定了差模电流注入与强场辐照等效效应满足的条件. 研究了工程上差模电流注入的实现技术, 确定了辅助试验设备的功能、结构设计方案, 推导了注入电压与辐照场强之间的等效对应关系, 提出了基于定向耦合装置的宽频带差模电流注入试验新方法. 通过对典型射频前端系统进行辐照与注入试验研究, 验证了该试验方法的有效性.

关键词: 高强度辐射场; 差模电流注入; 线性外推; 定向耦合装置; 等效电源波

中图分类号: TM15; TN97 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014) 06-1103-07

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.06.011

Wideband Differential-Mode Current Injection Testing Technology Based on Directional Coupling Device

PAN Xiao-dong, WEI Guang-hui, LU Xin-fu, LI Xin-feng

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

Abstract: This paper presents a kind of differential-mode current injection testing technology. The equal response voltage on the equipment port was regarded as equivalent principle. The injection and radiation response analysis model and the injection voltage source extrapolation model were established. The conditions of using injection as a substitute for radiation were determined. Moreover, this paper discussed the implementation technology of differential-mode current injection. The function and structure design scheme of the auxiliary test equipment was proposed. The equivalent relation between injected voltage and radiated field was derived. On the basis of the above, the differential-mode current injection test method was summarized. Finally, the test results of typical RF front-end system verify the validity of the proposed method.

Key words: HIRF; differential-mode current injection; linear extrapolation; directional coupling device; equivalent source wave

1 引言

随着大功率用频设备的不断增多以及电子战系统、电磁脉冲弹和高功率微波武器的出现, 有限空间内的电磁环境将日趋恶劣, 高强度辐射场(HIRF, High Intensity Radiated Field)已经成为武器装备和部分民用电子设备所面临的新挑战^[1,2]. GJB1389A-2005“系统电磁兼容性要求”给出了部分系统所面临的外部电磁环境, 在大部分频段, 电场强度远高于 200V/m, 在 2.7 ~ 3.6GHz 频段内, 舰船上发射机主波束下或陆军直升机外部电磁环境峰值场强甚至高达 27460V/m, 而这样的电场强度在目前实验室条件下难以通过模拟的方法来实现^[3,4]. 因

此, 单纯的辐照试验方法已经难以满足系统级电磁辐射敏感度及安全裕度试验的要求. 大电流注入法(BCI, Bulk Current Injection)是将电流直接注入到设备的电缆上来替代辐射场照射的效应试验方法, 其实质是把高场强辐射敏感度试验采用电流传导敏感度试验来替代^[5]. 虽然传统的 BCI 技术已提出了近半个世纪, 但将其应用于全频段的 HIRF 替代性试验仍存在应用频率范围受限、非线性响应系统试验精度低和无法模拟差模干扰信号对受试设备的影响等问题^[6,7]. 因此, 有必要探索一种新型的宽频带差模电流注入试验方法(DMCI, Differential-Mode Current Injection), 弥补单一辐照试验方法在测试场地及辐射强度等方面的不足.

2 理论研究

从严格意义上来说,注入和辐照过程不能完全等效,但是对于一些干扰耦合通道十分明确的受试系统,比如互联系统、天馈系统等,电磁能量主要以传导干扰的形式经线缆(天线)端口作用于受试系统的内部电路,由于试验考核的是线缆两端所连接设备的电磁敏感性,因此,此种条件下可以采用差模电流注入的方法来等效替代辐照效应试验^[8].对于互联系统而言,注入与辐照试验严格等效的依据是两者对受试系统的响应相等,工程上等效的依据是两者产生的效应相同.基于这一考虑,若能够保证作用于设备电缆(天线)端口的响应电压或注入电流信号相同就可以保证两者试验方法的等效性^[9].

2.1 注入与辐照响应分析模型

本文以互联系统为研究对象,其典型构成如图1所示.假设 B 为受试设备, A 可以是互联设备也可以是接收天线.互联系统在外界电磁场辐照条件下,可以简化成如图2所示的传输网络,其中 Z_A 为设备 A 的等效阻抗, Z_B 为受试设备 B 的等效阻抗, Z_C 为传输线的特性阻抗.

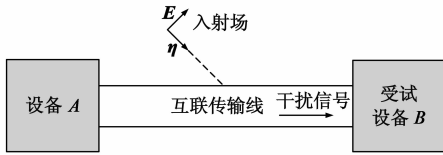


图1 典型互联系统示意图

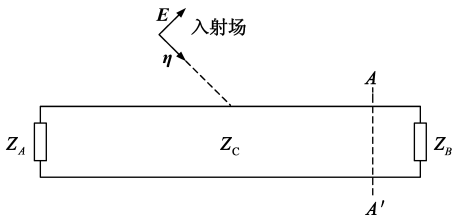


图2 互联系统简化的传输网络

为求得等效阻抗 Z_B 上的响应电压,在电路分析时,将互联系统从受试设备 B 的输入端口 $A-A'$ 处断开, $A-A'$ 左侧的分支可以等效为戴维南等效电路,如图3所示.这种方法把受试设备外部端口的干扰等效为阻抗 Z_{SR} 和等效电压源 U_{SR} , Z_{SR} 即为从 $A-A'$ 端口向左看过去的传输线输出阻抗, U_{SR} 即为等效电路的开路电压.

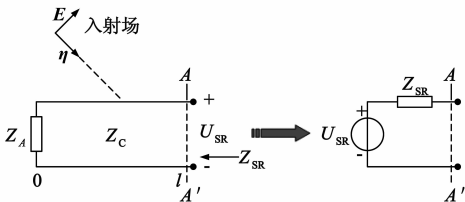


图3 左侧分支戴维南等效电路模型

将 $A-A'$ 端口左侧的戴维南等效电路与右侧受试设备 B 的等效阻抗 Z_B 结合起来,得到受试设备 B 辐照响应等效电路如图4(a)所示.令 $A-A'$ 端口与等效阻抗 Z_A 之间的传输线长度为 l ,设备 A 的反射系数为 Γ_A ,则戴维南等效电路中的源阻抗 Z_{SR} 为:

$$Z_{SR} = Z_C \frac{1 + \Gamma_{A-A'}}{1 - \Gamma_{A-A'}} = Z_C \frac{1 + \Gamma_A e^{-2\gamma l}}{1 - \Gamma_A e^{-2\gamma l}} \quad (1)$$

电磁辐照条件下,由互联传输线耦合得到的等效电路开路电压 U_{SR} 可应用BLT方程进行求解^[10].令 $A-A'$ 端口开路,即 $\Gamma_B = 1$,可求得 $x = l$ 处的开路电压为:

$$U'_{SR} = \frac{2}{1 - \Gamma_A e^{-2\gamma l}} (e^{-\gamma l} S_1 + \Gamma_A e^{-2\gamma l} S_2) \quad (2)$$

其中, x 为距离等效阻抗 Z_A 的传输线长度, γ 为传输线的传播常数.若系统 A 为接收天线,则可以将其看作在 $x = 0$ 处形成了集总电压源 U_0 ,根据BLT方程计算集总电压源 U_0 作用下的等效电路的开路电压为:

$$U''_{SR} = U_0 (1 - \Gamma_A e^{-2\gamma l})^{-1} e^{-\gamma l} (1 - \Gamma_A) \quad (3)$$

根据叠加原理,戴维南等效电路的开路电压 U_{SR} 应该是传输线耦合形成的开路电压 U'_{SR} 与集总电压源 U_0 形成的开路电压 U''_{SR} 之和,即 $U_{SR} = U'_{SR} + U''_{SR}$.

式(2)、(3)中, S_1 和 S_2 为BLT方程的源矢量, U_0 为天线接收形成的集总电压源, S_1 、 S_2 、 U_0 与辐照电场强度 E 均成线性变化关系^[10].为简化表述方式,令等效开路电压 U_{SR} 与电场 E 之间的线性传递函数为 f ,则等效电路开路电压 U_{SR} 可简化表示为:

$$U_{SR} = f(E) \quad (4)$$

通过求得 Z_{SR} 和 U_{SR} ,根据图4(a)的等效电路,可以计算得出 Z_B 的辐照响应 U_{BR} 为:

$$U_{BR} = \frac{Z_B}{Z_{SR} + Z_B} U_{SR} = \frac{Z_B}{Z_{SR} + Z_B} f(E) \quad (5)$$

参照上述过程,受试设备 B 在注入试验条件下的等效电路如图4(b)所示,其中: U_{SI} 为注入电压源, Z_{SI} 为注入源阻抗, U_{BI} 为注入试验条件下的响应.

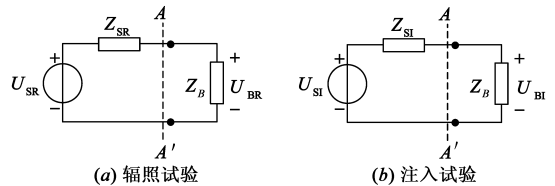


图4 受试设备 B 辐照(注入)响应等效电路模型

根据图4(b)所示的等效电路,受试设备 B 在注入试验条件下的响应 U_{BI} 可表示为:

$$U_{BI} = \frac{Z_B}{Z_{SI} + Z_B} U_{SI} \quad (6)$$

根据本文提出的注入与辐照两种试验方法等效的

依据,即受试设备的响应相同 $U_{BI} = U_{BR}$,可得:

$$U_{SI} = \frac{Z_{SI} + Z_B}{Z_{SR} + Z_B} U_{SR} = \frac{Z_{SI} + Z_B}{Z_{SR} + Z_B} f(E) \quad (7)$$

通过式(7)确定了理论上等效的注入电压源 U_{SI} 与辐照场强 E (辐照等效电压源 U_{SR})之间的对应关系,保证了注入与辐照试验的等效性。

2.2 强场条件下注入电压源外推模型

新型宽频带差模电流注入试验技术(DMCI),主要用于替代(模拟)HIRF效应试验,而关键在于如何获取替代强场辐照试验的等效注入电压源,根据前面的分析过程,拟通过对替代弱场辐照试验的等效注入电压源外推得到。一般来说,强场辐照试验条件下多数系统为非线性响应系统,即由于模块、器件工作状态的变化以及材料性能、寄生参数的变化等因素的影响,导致受试系统的端口响应已经不再与输入信号成线性比例变化。因此,注入电压源如何外推是确保注入与强场辐照试验等效的关键问题。

为此,在对典型非线性响应系统进行理论分析和试验研究的基础上,我们将互联系统受外界电磁辐照并出现干扰(降级、失效、毁伤等)效应的情况分为两个过程:即场线耦合过程(对于天馈系统,则为天线接收过程)和模块、器件的电路响应过程,如图5所示。

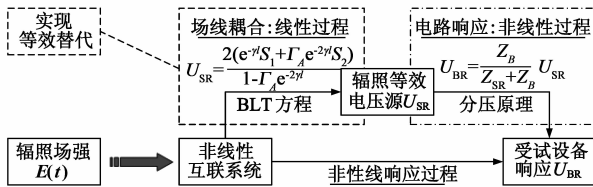


图5 典型互联系统辐照响应过程

由电磁场理论可知:场线耦合过程为线性过程,模块、器件的电路响应过程为非线性过程。若能够保证注入电压源与辐照等效的集总电压源在模块、器件的输入前端激励效果相同,则注入试验同样会出现与辐照试验相同的非线性电路响应。由于辐照等效的集总电压源是在场线耦合的线性过程中得到的,因此由低场强到高场强试验的等效注入电压源可以采用线性外推。

为保证高场强条件下,注入电压源与辐照等效的集总电压源激励效果相同,实现注入与辐照试验的等效性,由式(5)、(6)可知,需要满足两个条件:第一,强场试验条件下注入电压源与辐照等效的集总电压源开路电压相同,即 $U_{SI} = U_{SR}$,由于 U_{SR} 是通过场线耦合线性过程当中得到的等效电压源,因此替代强场辐照试验的等效注入电压源可以通过线性外推得到;第二,辐照与注入试验等效电路中(图4)模块、器件响应的分压比相同,即 $Z_{SI} = Z_{SR}$ 。满足这两个条件,理论上就能够保

证注入电压源与辐照等效的集总电压源在设备的输入前端激励效果相同,进而实现差模电流注入(DMCI)与强场辐照试验的等效性。

3 实现技术

3.1 定向耦合装置功能结构设计

定向耦合装置是用于互联系统宽频带差模电流注入试验的辅助设备,其典型连接方式如图6所示,在 A 、 B 构成的系统正常工作的前提下,通过定向耦合装置的注入端口对受试设备 B 开展注入试验。

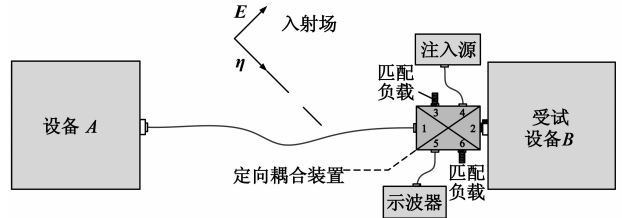


图6 定向耦合装置与受试系统连接方式示意图

为满足差模电流注入替代(模拟)辐照效应试验的需求,定向耦合装置应包含有以下功能端口:(1)直通端口,用于互联设备之间工作信号的传输,本文中要求直通端口之间的插入损耗 $\leq 0.5\text{dB}$; (2)干扰信号的差模注入端口,用于对受试设备 B 进行电流注入试验,要求注入端口具有较宽的频带,同时耦合进入设备 B 的干扰信号不能够失真; (3)互联传输线前向电压信号的监测端口,要求在外界电磁辐照或电流注入试验时,能够对进入设备 B 的前向电压信号进行监测。

根据定向耦合装置的功能要求,定向耦合装置可由两个单定向耦合器级联而成,如图7所示。装置的 1#、2# 为直通端口,用于互联设备之间正常工作信号的传输;4# 为注入端口,用于对受试设备 B 进行差模电流注入试验;5# 为监测端口,用于对互联传输线上的前向电压信号进行监测;3#、6# 分别为两个单定向耦合器的隔离端,使用时接匹配负载。

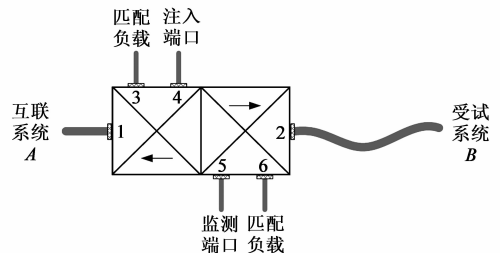


图7 定向耦合装置功能端口的结构示意图

上述 6 端口定向耦合装置可看作互易、无耗网络,其对应散射矩阵 S 应满足对称性及么正性,即 $S^T = S$, $S^T S^* = 1$ 。根据定向耦合装置的技术要求:直通端口的插入损耗应 $\leq 0.5\text{dB}$,即散射矩阵 S 中:

$$S_{21} = S_{12} \geq 0.944 \quad (8)$$

4# 端口作为电磁能量的注入端口,应具有较高的注入效率,这就要求耦合系数尽可能小,但过小的耦合系数又不能保证 1#、2# 直通端口的插入损耗 $\leq 0.5\text{dB}$. 综合考虑,取 4# 端口的耦合系数为 10dB.

根据对称定向耦合器的传输特性:耦合端输出信号与主通道传输信号相位突变 90° ,若主通道传输脉冲信号,则 5# 监测端口输出信号的波形将发生改变^[11,12]. 因此,本文采用反对称定向耦合器设计方案,令 4# 端口为 2# 端口的正向耦合端,5# 端口为 1# 端口的正向耦合端,令 S_{21} 为正实数,则 S_{31} 为负实数,由 3#、4# 端口耦合系数为 10dB,得:

$$S_{31} = -\sqrt{0.1} \quad (9)$$

根据散射矩阵 S 的么正性,即 $S^T S^* = 1$,考虑到插入损耗要求 $S_{21} \geq 0.944$,则得出:

$$|S_{51}| \leq 0.094 \quad (10)$$

根据反对称定向耦合器正向耦合端与主通道同相位原则,以及 3# 端口的能量耦合作用,则:

$$S_{51} = \sqrt{(1-0.1)10^{-y/10}} \quad (11)$$

式中 y 为 5#、6# 端口的耦合系数,考虑定向耦合装置的加工工艺以及使用过程中的方便程度,5# 和 6# 端口的耦合系数取 20dB. 最终得到 6 端口定向耦合装置的散射矩阵 S (并非唯一解)为:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0.944 & -0.316 & 0 & 0.095 & 0 \\ 0.944 & 0 & 0 & 0.315 & 0 & -0.1 \\ -0.316 & 0 & 0 & 0.949 & 0 & 0 \\ 0 & 0.315 & 0.949 & 0 & 0.032 & 0 \\ 0.095 & 0 & 0 & 0.032 & 0 & 0.995 \\ 0 & -0.1 & 0 & 0 & 0.995 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

3.2 定向耦合装置引入后等效条件分析

将定向耦合装置等效为已知 S 参数的 6 端口黑箱网络,则互联系统的等效电路模型如图 8 所示. Z_3 和 Z_6 为匹配负载, Z_5 为监测端口示波器输入阻抗, U_{S1} 为注入电压源开路电压, Z_4 为注入电压源内阻.

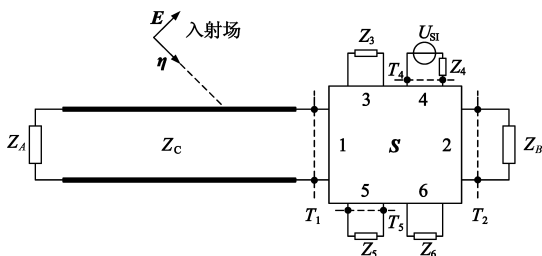


图8 互联系统连接定向耦合装置的等效电路模型

辐照试验时,将参考面 T_1 左侧部分等效为电源波

\hat{a}_{1R} 和反射系数 Γ_1 (或等效为源电压 U_{SR} 和源阻抗 Z_1); 注入试验时,将参考面 T_4 向源端看去的部分等效为电源波 \hat{a}_{4I} 和反射系数 Γ_4 (或等效为源电压 U_{S1} 和源阻抗 Z_4). 因此,辐照和注入试验受试系统的等效电路模型如图 9 所示. 可以看出,辐照和注入试验的无源网络模型是相同的,只是等效源位于 S 网络的不同端口.

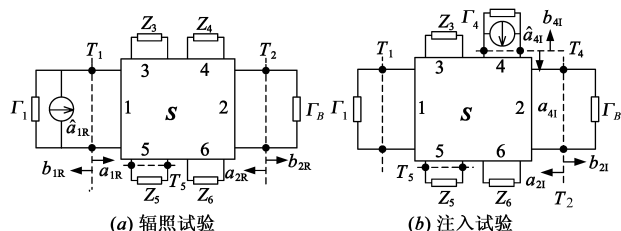


图9 定向耦合装置引入后辐照(注入)响应等效电路模型

根据微波工程中的电源波理论,辐照和注入试验条件下,等效电源波和等效电压源之间的关系为:

$$\hat{a}_{1R} = \frac{U_{SR}}{2\sqrt{Z_C}}(1 - \Gamma_1) \quad (13)$$

$$a_{4I} = \frac{U_{S1}}{2\sqrt{Z_C}}(1 - \Gamma_4) = \frac{U_{S1}}{2\sqrt{Z_C}} \quad (14)$$

采用等效电源波定理^[12],将参考面 T_2 左侧部分进一步等效,如图 10 所示. 从 T_2 向左侧看去的等效电源波分别为 \hat{b}_{2R} 和 \hat{b}_{2I} ,反射系数分别为 Γ'_{2R} 和 Γ'_{2I} .

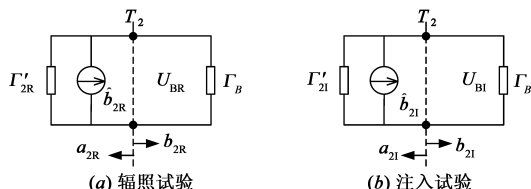


图10 将参考面 T_2 左侧部分等效简化后的电路模型

$$\hat{b}_{2R} = \sum_{k=1, k \neq 2}^n \frac{D_{(2Sk)}}{D_{(22)}} \hat{a}_k = \frac{D_{(2S1)}}{D_{(22)}} \hat{a}_{1R} = S_{21} \hat{a}_{1R} \quad (15)$$

$$\hat{b}_{2I} = \sum_{k=1, k \neq 2}^n \frac{D_{(2Sk)}}{D_{(22)}} \hat{a}_k = \frac{D_{(2S4)}}{D_{(22)}} \hat{a}_{4I} = S_{24} \hat{a}_{4I} \quad (16)$$

$$\Gamma'_{2R} = \Gamma'_{2I} = \frac{D_{(2S2)}}{D_{(22)}} = S_{21}^2 \Gamma_1 = S_{21}^2 \Gamma_A e^{-2\gamma l} \quad (17)$$

由式(17)可以看出:定向耦合装置引入互联系统后,在辐照和注入试验条件下, T_2 参考面向左看的反射系数相同,即两种试验条件下等效激励源的输出阻抗相同,满足 2.2 中注入与辐照试验等效条件二.

根据图 10 所示的等效电路,推导得出受试设备 B 的端口响应 U_{BR} 和 U_{BI} 分别为:

$$U_{BR} = \frac{\hat{b}_{2R} \sqrt{Z_C}}{1 - \Gamma'_{2R} \Gamma_B} (1 + \Gamma_B) \quad (18)$$

$$U_{BI} = \frac{\hat{b}_{2I} \sqrt{Z_C}}{1 - \Gamma'_{2I} \Gamma_B} (1 + \Gamma_B) \quad (19)$$

根据本文提出的辐照和注入试验等效的依据,即两种试验方法受试设备的响应相同 $U_{BI} = U_{BR}$,由式(13)~(19)推导得出, U_{SR} 和 U_{SI} 之间的关系为:

$$U_{SI} = S_{21} S_{24}^{-1} (1 - \Gamma_A e^{-2\gamma l}) U_{SR} \quad (20)$$

若设备 A 为接收天线或发射设备,其输出端口的反射系数 Γ_A 通常保持不变,此外定向耦合装置的 S 参数为定值,由式(20)、(4)可知: U_{SI} 与 U_{SR} (或辐照场强 E)之间为线性关系。

上述分析可知,将定向耦合装置引入互联系统后,在设备 A 端口反射系数不变的条件下,不论设备 B 的响应是否是线性的,等效注入电压源与辐照场强均满足线性变化关系。因此,采用线性外推的方法得到的注入电压源,满足 2.2 中注入与辐照试验等效条件一。

3.3 监测端响应相同作为等效依据可行性分析

注入与辐照试验等效的依据是受试设备 B 的端口响应相等,但在实际工程中,多数情况下直接监测设备 B 的端口响应是比较困难的,为使得本方法有较高的工程应用价值,我们将采用 5# 监测端口响应电压相同,作为差模电流注入(DMCI)与辐照法等效的依据。

根据图 9 所示的等效电路模型,采用等效电源波定理,得出辐照和注入试验条件下,从参考面 T_5 向负载端看去的等效电源波 \hat{b}_{5R} 和 \hat{b}_{5I} 分别为:

$$\hat{b}_{5R} = \frac{D_{(5S1)}}{D_{(55)}} \hat{a}_{1R} = \frac{S_{51}}{1 - S_{21}^2 \Gamma_1 \Gamma_B} \hat{a}_{1R} \quad (21)$$

$$\hat{b}_{5I} = \frac{D_{(5S4)}}{D_{(55)}} \hat{a}_{4I} = \frac{S_{54} + S_{21} (S_{51} S_{24} - S_{54} S_{21}) \Gamma_1 \Gamma_B}{1 - S_{21}^2 \Gamma_1 \Gamma_B} \hat{a}_{4I} \quad (22)$$

假设定向耦合装置 4# 端口和 5# 端口的耦合系数分别为 m 和 n ,单位为 dB,则:

$$\begin{aligned} S_{51} S_{24} &= S_{54} S_{21} \\ &= \sqrt{(1 - 10^{-m/10})(1 - 10^{-n/10})} 10^{-(m+n)/10} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\hat{b}_{5I} = \frac{S_{54}}{1 - S_{21}^2 \Gamma_1 \Gamma_B} \hat{a}_{4I} \quad (24)$$

在辐照和注入试验条件下,5# 监测端响应电压 U_{MR} 和 U_{MI} 分别为:

$$U_{MR} = \sqrt{Z_C} \hat{b}_{5R} = \frac{S_{51} (1 - \Gamma_1) U_{SR}}{2(1 - S_{21}^2 \Gamma_1 \Gamma_B)} \quad (25)$$

$$U_{MI} = \sqrt{Z_C} \hat{b}_{5I} = \frac{S_{54} U_{SI}}{2(1 - S_{21}^2 \Gamma_1 \Gamma_B)} \quad (26)$$

令辐照和注入试验条件下监测端口响应电压相同,即 $U_{MR} = U_{MI}$,则得到 U_{SI} 和 U_{SR} 的关系为:

$$U_{SI} = S_{21} S_{24}^{-1} (1 - \Gamma_A e^{-2\gamma l}) U_{SR} \quad (27)$$

式(27)和式(20)相等,因此上面的理论推导过程证明:将 5# 监测端口响应电压相同作为等效依据,同样

可以保证注入与辐照试验的等效性。

3.4 宽频带差模电流注入试验方法(DMCI)

(1)开展低场强预先辐照试验.按图 6 所示连接定向耦合装置,选择合适的辐照电场强度 E_1 ,在保证系统响应处于线性区的条件下,对互联系统进行低场强辐照试验,监测定向耦合装置 5# 端口的输出响应 U_{MR} 。

(2)获取注入电压与辐照场强的等效对应关系.通过定向耦合装置的 4# 端口对受试设备 B 进行注入试验,监测 5# 端口的输出响应 U_{MI} ,当 $U_{MI} = U_{MR}$ 时,记录此时的注入电压 U_{SI} ,得到注入电压与辐照场强之间的对应关系(传递函数) $k = U_{SI}/E_1$ 。

(3)完成互联系统差模电流注入(DMCI)试验.若受试系统最终考核的电场强度为 E_2 ,计算此时的等效注入电压为 $V_{SI} = kE_2$,通过定向耦合装置 4# 端口,对受试设备 B 开展差模电流注入实验,等效替代目前实验室条件下无法完成的高场强 E_2 辐照效应试验。

4 试验验证

4.1 受试互联系统

受试系统为典型射频前端互联系统,由接收天线(设备 A)、同轴互联电缆、射频前端组件(设备 B)等构成,其整体连接方式如图 11 所示.由于设备 B 中限幅滤波器、低噪声放大器等组件的非线性响应特性,因此上述受试互联系统可用于验证试验研究。

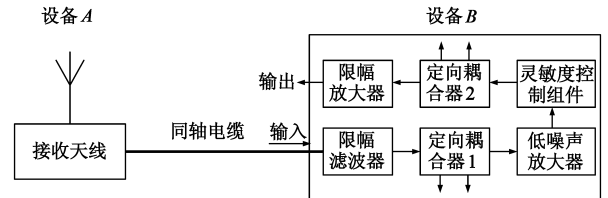


图 11 天线接收互联系统连接方式示意图

4.2 辐照场强与等效注入电压线性关系验证

按图 12、13 所示的配置方式,分别对受试互联系统进行单频连续波辐照与差模电流注入(DMCI)试验,采用频谱分析仪对受试设备 B 的输出响应信号进行监测,分别记录辐照场强、注入电压与设备 B 输出响应之间的对应关系。

以设备 B 输出响应相同作为等效依据,进行数据处理,得到辐照场强与等效注入电压及设备 B 输出响应之间的关系曲线如图 14 所示。

从图 14 中可以看出,不同频点当辐照场强由小逐渐增大时,设备 B 的输入/输出响应成典型非线性变化关系.但与之对应的是,辐照场强与等效注入电压始终保持线性变化关系,对实测数据点进行线性拟合,得到各频点线性拟合的斜率 k 及相关系数 R 如表 1 所示。

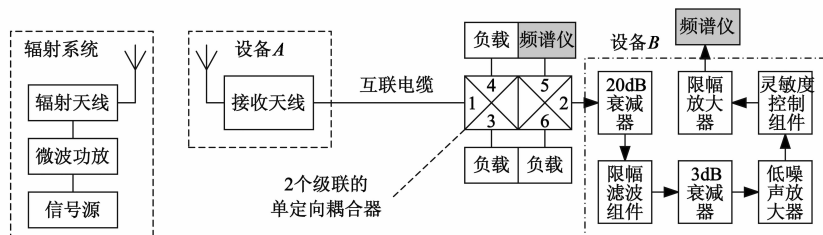


图12 辐照效应试验配置框图

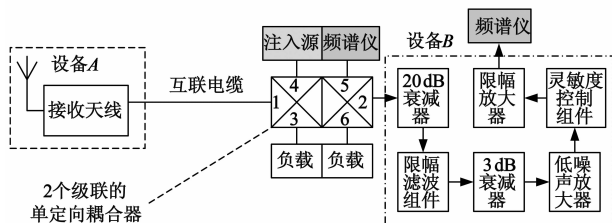


图13 注入效应试验配置框图

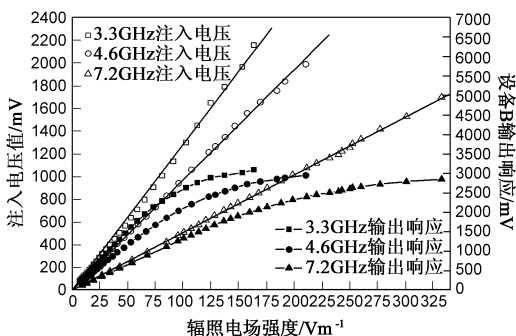


图14 辐照场强与注入电压及设备B输出响应关系曲线

表1 实测数据线性拟合的斜率及相关系数

序号	f/GHz	线性拟合斜率 m	相关系数 R
1	3.3	12.8281	0.99916
2	4.6	9.7117	0.99972
3	7.2	5.0820	0.99985

通过对相关系数 R 分析可知,图14中各频点数据线性拟合具有很高的精度,即等效注入电压与辐照场强成线性变化关系.对于少量数据点不完全符合线性关系(出现在受试系统进入饱和区的数据点),主要是由试验误差造成的.综上所述,即使是非线性响应系统,若保证受试系统注入与辐照试验响应相同,则不同频点等效注入电压与辐照场强仍成线性变化关系.

4.3 差模电流注入(DMCI)方法有效性验证

通过前面的辐照试验可知,现有试验条件所模拟的辐射场强能够使得受试设备 B 辐照后进入饱和区.因此,一方面采用直接辐照的试验方法,得到设备 B 从线性区到饱和区的辐照响应曲线;另一方面,根据 3.4

节提出的差模电流注入(DMCI)方法,得到设备 B 从线性区到饱和区的注入响应曲线,通过计算、分析两种试验方法设备 B 输出响应的误差,来验证本文提出的差模电流注入(DMCI)方法的有效性.图15中给出了3.3GHz、4.0GHz和5.6GHz三个频点受试设备 B 分别在辐照和差模电流注入试验条件下的响应曲线.

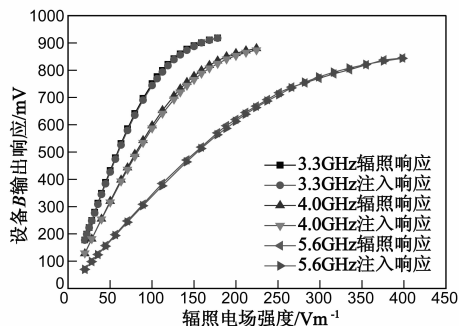


图15 受试设备B辐照与差模注入响应曲线

从图15可以看出:采用差模电流注入(DMCI)方法得到的设备 B 输出响应曲线与辐照试验方法几乎完全相同.为分析 DMCI 试验方法的误差,将图15中的试验数据进行处理,得到 DMCI 与辐照试验方法的最大相对误差仅为 2.39%.上述试验研究表明:对于电磁能量耦合通道为天线或线缆的互联系统,采用本项目提出的 DMCI 试验方法来模拟高场强下的辐照效应试验理论上是正确的、工程上是可行的.

5 结论

本文对宽频带差模电流注入理论、方法及实现技术等方面进行了深入研究,建立了差模电流注入与辐照响应的分析模型和强场条件下注入电压源外推模型,确定了两者等效满足的条件.推导了注入电压与辐照场强之间的等效对应关系,提出了通过线性外推获取等效注入电压源的实现技术.确定了辅助试验设备的功能结构设计方案,实现了互联系统中前向电压信号的提取、干扰信号的注入以及正常传输信号的有效监测,提出了基于定向耦合装置的新型宽频带差模电流注入试验方法.通过对典型射频前端系统进行辐照与差模注入试验研究,验证了该试验方法的有效性.

参考文献

- [1] M G Bäckström, Lövstrand. Susceptibility of electronic systems to high-power microwaves: summary of test experience [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 396 – 403.
- [2] 陶建义, 陈越. 外军高功率微波武器发展综述 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(2): 111 – 116.
Tao Jianyi, Chen Yue. Development of HPM weapon for foreign military [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information, 2011, 6(2): 111 – 116. (in Chinese)
- [3] GJB1389A – 2005, 系统电磁兼容性要求 [S].
- [4] 王侃, 朱瑞平. 相控阵天线的电磁环境分析 [J]. 电子学报, 2012, 40(3): 571 – 574.
Wang Kan, Zhu Ruiping. Analysis of electromagnetic environment of phased array [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(3): 571 – 574. (in Chinese)
- [5] A Orlandi, G Antonini, R M Rizzi. Equivalent circuit model of a bundle of cables for bulk current injection (BCI) test [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2006, 48(4): 701 – 713.
- [6] F Grassi, F Marliani, S A Pignari. Circuit modeling of injection probes for bulk current injection [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2007, 49(3): 563 – 576.
- [7] S Caniggia, F Maradei. Spice-like models for the analysis of the conducted and radiated immunity of shielded cables [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(4): 606 – 616.
- [8] G Spadacini, S A Pignari. A bulk current injection test conforming to statistical properties of radiation-induced effects [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 446 – 458.
- [9] F Grassi, G Spadacini, F Marliani, S A Pignari. Use of double bulk current injection for susceptibility testing of avionics [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(3): 524 – 535.
- [10] F M Tesche. Development and use of the BLT equation in the time domain [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2007, 49(1): 3 – 11.
- [11] D M Pozar. Microwave Engineering [M]. 4th Ed. New York: John Wiley & Sons, 2011. 347 – 356.
- [12] 李宗谦, 余京兆, 高葆新. 微波工程基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 195 – 199.
Li Zongqian, She Jingzhao, Gao Baoxin. Foundation for Microwave Engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 195 – 199. (in Chinese)

作者简介



潘晓东 男, 1980 年出生, 吉林桦甸人, 机械工程学院电磁环境效应国家级重点实验室博士研究生, 讲师, 主要从事电磁兼容与防护技术方面的研究。

E-mail: panxiaodong1980@sina.com



魏光辉 男, 1964 年出生, 河北宁晋人, 机械工程学院电磁环境效应国家级重点实验室教授, 博士生导师, 主要从事电磁环境模拟与测试技术、电磁环境效应与防护技术等方面的研究。

E-mail: wei-guanghui@sohu.com