



·高功率微波技术·

宽带高抑制性能电磁脉冲防护电路设计与实验*

张景洪^{1,2}, 秦 风^{2,3}, 高 原^{2,3}, 钟受洪^{2,3}, 王 震^{2,3}

(1. 中国工程物理研究院 研究生院, 四川 绵阳 621999; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999;
3. 中国工程物理研究院 复杂电磁环境科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 强电磁脉冲易通过天线、孔缝、线缆等多种耦合途径进入电子系统内部, 造成敏感电子设备出现短暂故障或永久损毁。安装电磁脉冲防护电路可有效提高电子设备抗强电磁脉冲能力。基于 LC 选频网络和瞬态电压抑制 (TVS) 二极管, 设计了一种宽带高抑制性能电磁脉冲防护电路, 防护电路工作带宽超过 2 GHz, 插入损耗低于 0.6 dB。系统性研究了防护电路对频谱分布在工作带宽内多种电磁脉冲(方波脉冲、宽带高功率微波、窄带高功率微波)的防护能力。结果表明: 防护电路对不同类型电磁脉冲电压抑制比大于 40 dB, 耐受功率超过 387 kW, 而响应时间仅 0.7 ns。该防护电路具有工作频带宽、电磁抑制性能好、响应速度快、耐受功率高等特点, 对电子信息系统电磁防护加固具有重要意义。

关键词: 电磁脉冲防护电路; TVS 二极管; 方波脉冲; 宽带高功率微波; 窄带高功率微波

中图分类号: TM937

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220257

Design and experiment of wideband electromagnetic pulse protection circuit with effective suppression capability

Zhang Jingqi^{1,2}, Qin Feng^{2,3}, Gao Yuan^{2,3}, Zhong Shouhong^{2,3}, Wang Zhen^{2,3}

(1. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621999, China;

3. Key Laboratory of Science and Technology on Complex Electromagnetic Environment, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: High-intensity electromagnetic pulse can easily couple into the electronic system through antenna, cavity and cable, causing transient failure or permanent damage of the sensitive electronic equipment. Installing electromagnetic pulse protection circuit can effectively improve the anti-destruction ability of electronic equipment against high-intensity electromagnetic pulse. Herein, based on LC frequency selective network and transient voltage suppressor (TVS) diodes, we develop a wideband electromagnetic pulse protection circuit with outstanding suppression capability. The operation bandwidth of the protection circuit exceeds 2 GHz, while the insertion loss is less than 0.6 dB. Moreover, the suppression capabilities of this protection circuit towards square-wave pulse, wideband high-power microwave and narrow-band high-power microwave were systematically investigated. The results show that the protection circuit has a suppression ratio of more than 40 dB and power capacity up to 387 kW, while the response time is as low as 0.7 ns. Altogether, the protection circuit has advantages of wide operation bandwidth, excellent suppression performance, fast response time and high power capacity, which are of great importance for the electromagnetic protection reinforcement of electronic information system.

Key words: electromagnetic pulse protection circuit, TVS diode, square-wave pulse, wide-band high-power microwave, narrow-band high-power microwave

强电磁脉冲具有峰值场强高、上升时间短、覆盖频率范围宽等特点^[1], 可通过天线等“前门”通道或孔缝、线缆等“后门”通道耦合进入电子系统内部, 产生瞬态高电压、大电流, 造成系统内敏感电子设备出现短暂干扰、长期

* 收稿日期: 2022-08-22; 修订日期: 2022-10-17

基金项目: 中国工程物理研究院复杂电磁环境科学与技术重点实验室基金项目

联系方式: 张景洪, zhangjingqi_gscaep@163.com。

通信作者: 秦 风, fq_soul2000@163.com;

高 原, 18142550916@163.com。

降级或永久损伤,对雷达、导航、通信等现代电子信息系统具有极大威胁^[2]。电磁脉冲防护电路,作为一种重要的能量控制器件,对于保护电子信息系统内的敏感电子设备不被电磁脉冲损坏有着至关重要的作用^[3-5]。

近年来,国内外关于电磁脉冲防护电路的研究日趋多样。毕景康、杜传报、M. T. Younis 和 K. N. Kim 等人提出了基于气体放电管(GDT)和压敏电阻(MOV)的滤波组合型防护电路^[6-9]。这种形式的防护电路具有较强的通流能力,但工作频率较低且带宽较窄,难以应用于微波频段电子设备的电磁脉冲防护;此外,由于 GDT 与 MOV 存在动作迟滞性,这类防护电路的响应速度通常较慢,泄露电压较大^[10-11],导致后端电子设备仍存在被泄露电压尖峰损坏的风险。邓世雄、李亚南、L. Yang 和 S. S. Yang 等人利用 PIN 二极管设计了无源检波和多级级联型限幅防护电路,设计的防护电路具有较大的工作带宽和较低的泄露电压^[12-15]。然而,在注入信号功率较高时,因 PIN 二极管的 PN 结易发生热损毁和二次击穿^[16-17],以致这类防护电路的功率容量较为有限,难以满足对大功率电磁脉冲的防护需求。瞬态电压抑制(TVS)二极管是在稳压管工艺基础上发展起来的新产品^[18],具有响应时间快、瞬态功率大、漏电流低、击穿电压偏差小等优点,能为电磁敏感度高的电子设备提供有效防护。孟兆祥、J. Lepkowski、陈子鹏和 J. S. Meiguni 等人设计了 TVS 二极管与滤波器串联组合的防护电路^[19-22],但主要是针对雷电、静电等低频段电磁脉冲的防护设计开发,电路的工作频率和带宽较低。上海交通大学 C. Zhang 针对高功率微波研制了一款 TVS 二极管防护电路^[23],该电路通过在信号输入和输出端口间并联不同钳位电压的 TVS 二极管来实现对脉冲能量的逐级衰减,具有结构紧凑、易于加工装配等优势,但由于缺乏对级间阻抗匹配的优化,导致电路插入损耗较大且抑制效果不理想。

本文设计了一种兼具大工作带宽、高抑制性能、快响应速度和大功率容量的电磁脉冲防护电路。该防护电路包含一个 LC 选频网络和数对 TVS 二极管,具有超过 2 GHz 的工作带宽和低于 0.6 dB 的插入损耗。并且,强电磁脉冲防护性能测试实验表明:所设计的防护电路对多种不同类型电磁脉冲(如:方波脉冲、宽带高功率微波、窄带高功率微波)均具有良好的防护效果,电压抑制比可达 40 dB 以上,耐受功率超过 387 kW,而响应时间仅有 0.7 ns,能较好地满足电子信息系统强电磁脉冲防护加固需求。

1 防护电路设计与仿真

电磁脉冲防护电路的设计需要兼顾射频传输性能和瞬态防护性能。本文将电磁脉冲防护电路设计成一种 LC 选频网络和 TVS 二极管混合集成的拓扑结构。其中,LC 选频网络用于实现防护电路的阻抗匹配,其元件参数决定了防护电路的工作频率、带宽以及小信号激励下的插入损耗;TVS 二极管采用级联组合的形式并接在 LC 选频网络中,用于泄放注入防护电路的瞬态强电磁脉冲,并在极短时间内将防护电路端口的电压钳制在较低水平,进而保护后级敏感电子设备不被损坏。

1.1 LC 选频网络分析

为了提高防护电路整体布局的紧凑性,本设计中 LC 选频网络采用了一种如图 1 所示的新型结构,该结构包含两个电容(C_a 和 C_b)和多个电感(L_{a1} , L_{a2} , L_{b1} , L_{b2})。与现有防护设计中常用的多阶 L 型或 π 型匹配电路相比^[19-22],本文所提出的 LC 选频网络结构便于集成 TVS 二极管实现一体化设计,可以有效降低防护电路的排布尺寸,具有一定的结构优势。计算得出 LC 选频网络的 Y 参数矩阵(Y_{LC})为

$$\begin{aligned} Y_{LC}(1,1) &= 1/Z_{C_a} + (Z_{L_a} + Z_{C_b})/[Z_{C_b}(Z_{L_a} + Z_{L_b}) + Z_{L_a}Z_{L_b}] \\ Y_{LC}(1,2) &= -1/Z_{C_a} - Z_{C_b}/[Z_{C_b}(Z_{L_a} + Z_{L_b}) + Z_{L_a}Z_{L_b}] \\ Y_{LC}(2,1) &= -1/Z_{C_b} - Z_{C_a}/[Z_{C_b}(Z_{L_a} + Z_{L_b}) + Z_{L_a}Z_{L_b}] \\ Y_{LC}(2,2) &= 1/Z_{C_b} + (Z_{L_a} + Z_{C_a})/[Z_{C_b}(Z_{L_a} + Z_{L_b}) + Z_{L_a}Z_{L_b}] \end{aligned} \quad (1)$$

式中: Z_{C_a} , Z_{C_b} , Z_{L_a} , Z_{L_b} 分别是 C_a 的阻抗、 C_b 的阻抗、 L_{a1} 与 L_{a2} 的阻抗之和、 L_{b1} 与 L_{b2} 的阻抗之和。根据二端口网络的导纳-传输矩阵转换关系^[24],进一步计算得到 LC 选频网络的传输矩阵(A_{LC})为

$$A_{LC} = \begin{bmatrix} -Y_{LC}(2,2)/Y_{LC}(2,1) & -1/Y_{LC}(2,1) \\ -\Delta Y_{LC}/Y_{LC}(2,1) & -Y_{LC}(1,1)/Y_{LC}(2,1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 ΔY_{LC} 是导纳矩阵 Y_{LC} 的矩阵行列式。当 LC 选频网络端接信号源和负载构成级联结构时,整个级联结构的传输

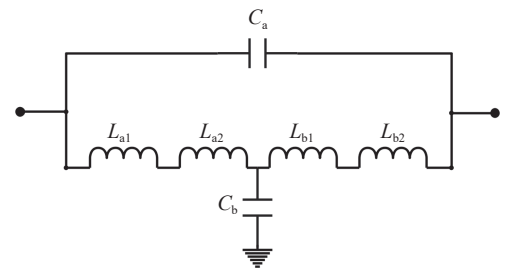


Fig. 1 Schematic illustration of LC frequency selective network

图 1 LC 选频网络原理图

矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} A_{LC} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_L & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： Z_s 和 Z_L 分别代表信号源阻抗和负载阻抗。此处，假设 Z_s 、 Z_L 与传输线路的特征阻抗(Z_0)相等。从而根据式(3)级联结构的传输矩阵，计算出 LC 选频网络的 S_{21} 参数。

$$S_{21} = \frac{2}{A} = 2 \left\{ 2 + \frac{Z_0^2(Z_{C_s} + Z_{L_s} + Z_{L_s}) + Z_{C_s}[(Z_{L_s} + Z_{L_s})(Z_{C_s} + Z_0) + Z_{L_s}Z_{L_s}]}{Z_0(Z_{L_s}Z_{L_s} + Z_{C_s}Z_{C_s} + Z_{C_s}Z_{L_s} + Z_{C_s}Z_{L_s})} \right\} \quad (4)$$

从式(4)可以看出，LC 选频网络的插入损耗与网络构成元件的阻抗密切相关，通过改变电容和电感的量值可实现对 LC 选频网络插损频率响应特性的调节。考虑到在 LC 选频网络中并接 TVS 二极管后，防护电路整体的插入损耗会因寄生参数和二极管结电容的影响略大于 LC 选频网络的插入损耗，因此 LC 选频网络的插入损耗需要设计的更小。此处，假设要求 LC 选频网络的插入损耗在 0~2.1 GHz 的工作频率范围内小于 0.4 dB，由此确定出 LC 选频网络电容和电感元件的电容、电感值分别为 $C_a=12$ pF, $C_b=40$ pF, $L_{a1}=L_{a2}=L_{b1}=L_{b2}=24$ nH。

1.2 TVS 二极管等效电路

TVS 二极管具有典型的非线性导电特性^[10]，当外施电压大于 TVS 二极管的 PN 结击穿电压时，TVS 二极管因隧穿效应而导通，为注入的强电磁脉冲提供低阻抗瞬态电流泄放通道，进而将输出电压钳制在较低水平以保护后续电子设备免受电压损坏^[25]。而当外施电压低于 TVS 二极管击穿电压时，TVS 二极管将保持高阻抗状态，管内仅有微弱的漏电流通过，对信号的正常传输干扰较小^[22]。为模拟 TVS 二极管在小信号作用下的频率响应特性，构建了未导通状态下的 TVS 二极管等效电路如图 2 所示。

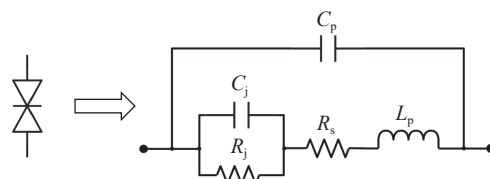


Fig. 2 Equivalent circuit of TVS diode under excitation of small signal

图 2 TVS 二极管在小信号作用下的等效电路

图 2 中 C_j 是 TVS 二极管结电容， R_s 是串联电阻， C_p 和 L_p 是封装产生的寄生电容和引线电感；二极管结电阻 $R_j = 8.33 \times 10^{-5} T / (I_s + I_b)$ ，其中： T 是环境温度， I_s 是二极管饱和电流， I_b 是二极管偏置电流。本设计中采用 Nexperia 公司生产的两款硅外延平面 TVS 二极管，型号分别为 PESD5V0U1BBYL 和 PESD2V0Y1BSFYL，这两型 TVS 二极管的参数分散性较低，结电容的标称值容差不超过 20%，且在 0~2 GHz 频率范围内偏差不得超过 0.1 pF，具有良好的频率稳定性，相应的等效电路元件参数见表 1。

表 1 TVS 二极管等效电路参数

Table 1 Equivalent circuit parameters of TVS diode

model	C_j /pF	R_j /k Ω	R_s / Ω	L_p /nH	C_p /pF
PESD5V0U1BBYL	2.9	18	6	1.8	0.12
PESD2V0Y1BSFYL	0.7	15	4	1.4	0.08

1.3 防护电路仿真与设计

基于 1.1 中提出的 LC 选频网络与 1.2 中建立的 TVS 二极管等效电路，采用 Advanced Design System 仿真软件建立防护电路的仿真模型如图 3 所示。

在图 3 所示的防护电路结构中，TVS 二极管采用对管串联的形式并接在 LC 选频网络中，这样既能减小 TVS 二极管漏电流对高频信号造成的插入损耗，降低结电容偏差对线路阻抗匹配的影响，又能避免单个 TVS 二极管因电流过载发生损坏。其中，位于前级的 TVS 二极管 $T_1 \sim T_8$ 选择具有较大可承受电压(10 kV)的 PESD5V0U1BBYL，承担泄放大部分注入脉冲能量的作用，对注入防护电路的强电磁脉冲进行前级衰减。位于末级的 TVS 二极管 T_9 、 T_{10} 则采用钳位电压较低且响应速度较快的 PESD2V0Y1BSFYL，能对前级 TVS 二极管来不及响应的快脉冲进行有效钳制，并将前级输出的残余电压进一步衰减至安全值以下。经过级联优化组合，各级 TVS 二极管之间起限电压衔接良好，防护电路可承受数 kV 电压的冲击并具有小的电压泄露和快响应速度。防护电路中的微带结构经过尺寸调谐，用于进一步优化集成 TVS 二极管后 LC 选频网络的级间阻抗匹配特性，改善因寄生参数在个别谐振点产生的阻抗畸变导致电路插入损耗频率响应特性变差的问题。此外，TVS 二极管级间的微带结构还具有电压推挽和退耦的作用^[25]，能够在末级 TVS 二极管响应后加速前级 TVS 二极管的导通和能量泄放。防护电路的介质基板采用热稳定性

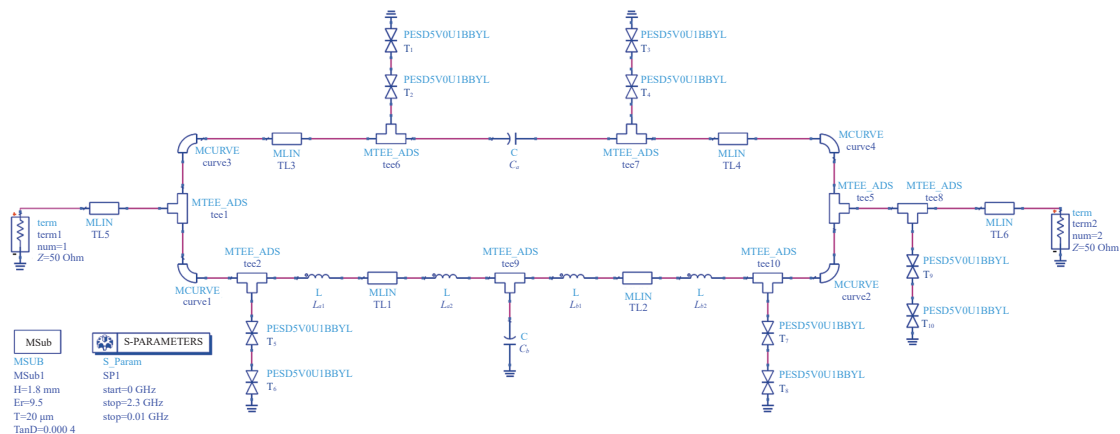


Fig. 3 Simulation module of protection circuit in Advanced Design System

图 3 在 Advanced Design System 中建立的防护电路仿真模型

良好的氧化铝陶瓷, 该材料的热导率(26 W/(mK))较高, 具有优异的散热性能, 适合在大功率微波电路中使用; 且氧化铝陶瓷具有较低的耗散因子(0.0004)和较大的介电系数(9.5), 有利于电路中微带结构和整体布局的小型化。装配完成的防护电路模块如图 4 所示, 尺寸 50 mm×40 mm×20 mm。

图 5 给出的是小信号仿真与矢量网络分析仪 (Agilent N5230A) 实测得到的防护电路 S_{21} 参数与驻波比 (VSWR)。可以看出, 仿真与测试结果吻合良好, 防护电路在 1 MHz~2.1 GHz 频率范围内插入损耗小于 0.6 dB, VSWR 低于 1.2, 表明所设计的防护电路具有良好的射频信号传输特性。

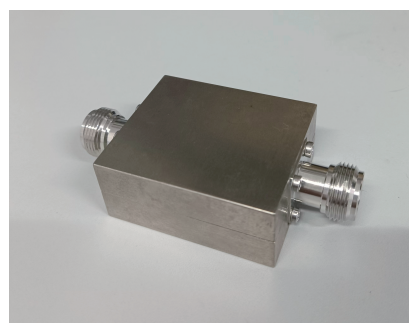
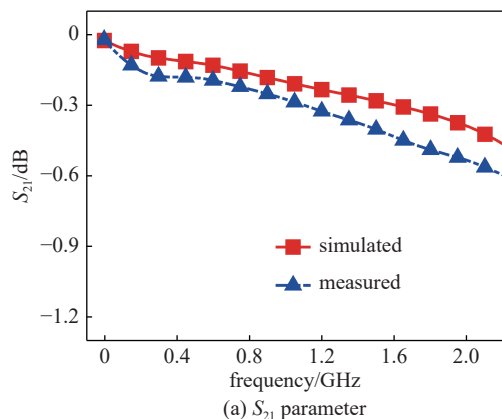
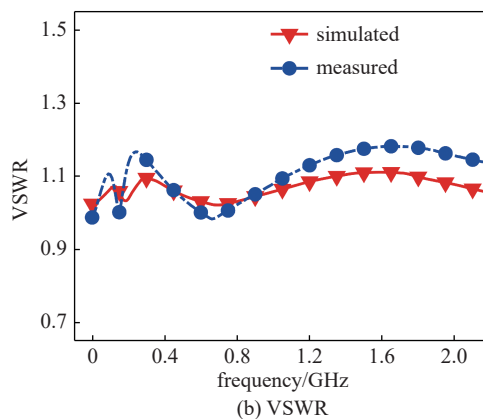


Fig. 4 The fabricated protection circuit module

图 4 装配完成的防护电路模块



(a) S_{21} parameter



(b) VSWR

Fig. 5 Simulated and measured S_{21} parameter and VSWR

图 5 仿真与实测得到的 S_{21} 参数和 VSWR

2 瞬态防护性能测试

2.1 测试系统

为获得防护电路对能量分布在工作频带内强电磁脉冲的防护性能, 针对所设计的防护电路开展了瞬态电磁脉冲注入实验。实验中所采用的测试系统如图 6 所示, 包括: 脉冲源、3 dB 功分器、衰减器、数字示波器 (RIGOL MSO8204) 和待测防护电路。脉冲源输出的电磁脉冲信号经由 3 dB 功分器被均分为两路: 一路通过衰减器进入数字示波器的 1 通道, 该路信号被记为入射信号; 另一路信号在经过待测防护电路后通过衰减器接入数字示波器的 2 通道, 该路信号即为

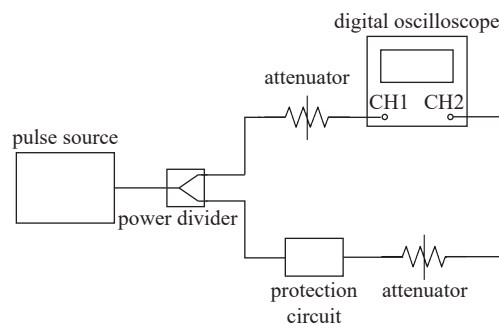


Fig. 6 Schematic illustrating the measurement system for protection performance test

图 6 防护性能测试系统原理图

经防护电路抑制后的残余信号。

2.2 测试脉冲波形

分别采用方波脉冲、宽带高功率微波(WB-HPM)和窄带高功率微波(NB-HPM)对防护电路的带内抑制性能进行了测试,三种电磁脉冲的归一化时域波形与频谱分布如图7所示。方波脉冲的上升沿约为1 ns,脉冲宽度为400 ns,频率范围在0~12 MHz之间。宽带高功率微波和窄带高功率微波波形则具有明显的振荡特性;其中:宽带高功率微波的脉冲宽度约14 ns,频率范围100~560 MHz;窄带高功率微波的上升沿约10 ns,脉冲宽度100 ns,频率范围1320~1380 MHz。

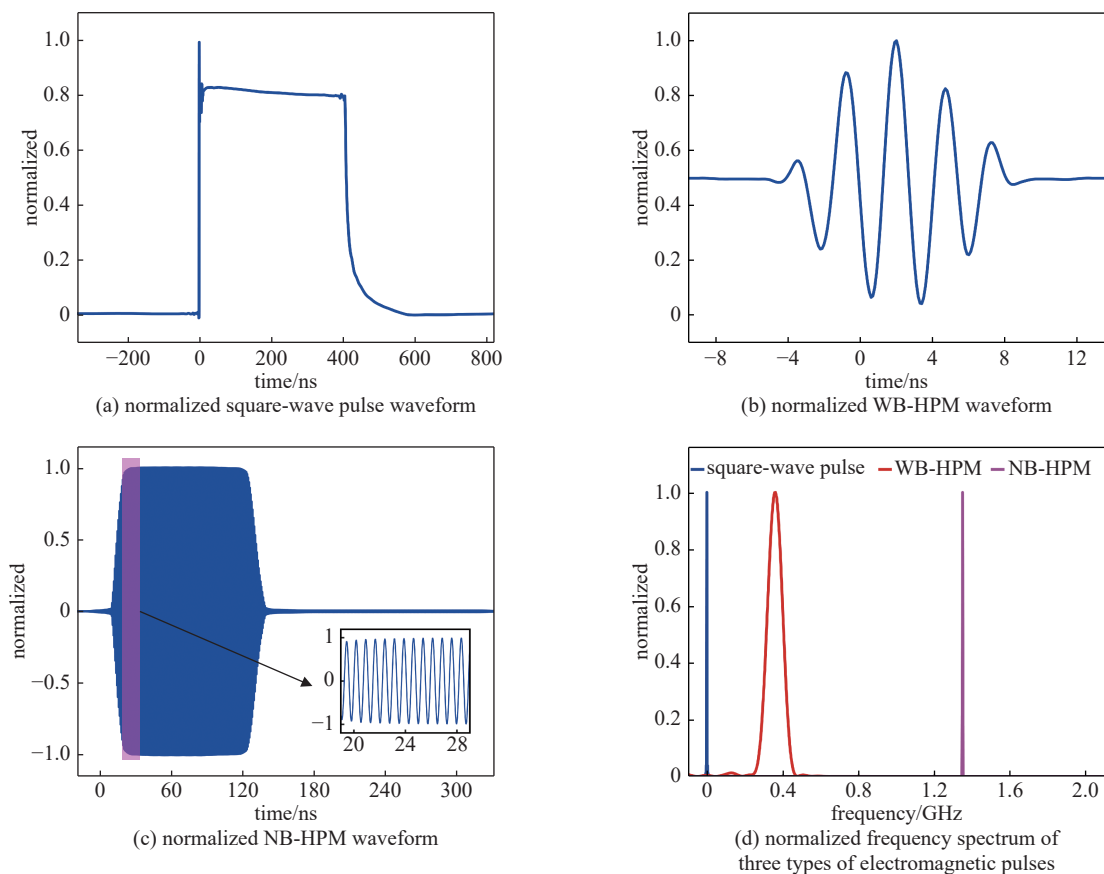


Fig. 7 Normalized transient waveform and frequency spectrum of three different types of electromagnetic pulses

图7 三种不同电磁脉冲的归一化时域波形与频谱分布

2.3 防护性能评估

防护电路的性能评估参数主要包括尖峰泄露、响应时间、耐受功率和电压抑制比^[6-23]。其中:尖峰泄露是指经防护电路抑制后残余信号的电压最大值(图8中的 V_s),响应时间则定义为从电磁脉冲开始作用于防护电路到尖峰泄露出现的这段时间(如图8中的 t_r);耐受功率用于表征防护电路所能承受的脉冲峰值功率,对于衡量防护电路的功率容量具有工程参考意义;电压抑制比表征为防护电路输入峰值电压和输出尖峰泄露的分贝差值,用于评估防护电路对大功率电磁脉冲尖峰泄露的抑制效果,其计算方法为

$$R = 20 \lg(V_p/V_s) \quad (5)$$

式中 V_p 代表入射信号的电压峰值。

2.4 测试结果

对于方波脉冲、宽带高功率微波和窄带高功率微波三种电磁脉冲,测得的入射和残余信号波形如图9所示(为

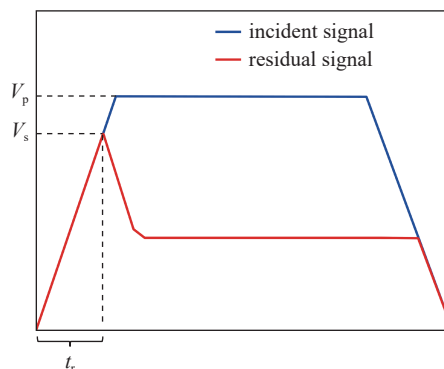


Fig. 8 Schematic illustrating the evaluation parameters of protection performance

图8 防护性能评估参数示意图

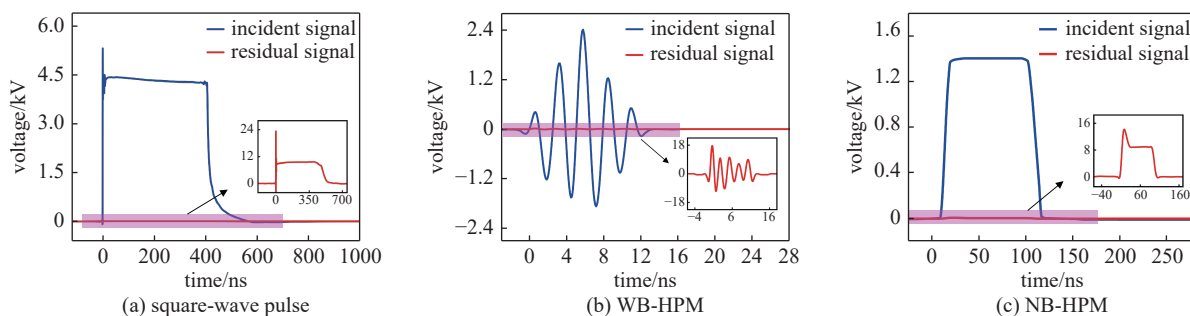


Fig. 9 Measured incident and residual signal waveforms under excitation of 3 types of electromagnetic pulses

图9 在三种电磁脉冲激励下测试得到的入射与残余信号波形

方便分析说明,窄带高功率微波信号仅示出正包络)。可以看出,经防护电路抑制后三种电磁脉冲的残余信号均远小于入射信号。对于方波脉冲、宽带高功率微波和窄带高功率微波信号,测得的防护电路响应时间分别为 0.7 ns、1.8 ns 和 5.4 ns,均小于对应入射脉冲信号的上升沿。0.7 ns 的响应时间说明设计的防护电路具有亚 ns 的响应能力。值得注意的是,防护电路对宽带高功率微波和窄带高功率微波信号的响应时间大于对方波脉冲的响应时间,这主要归因于入射高功率微波信号上升沿慢^[10]。同时,我们还观察到方波脉冲、宽带高功率微波、窄带高功率微波在经过防护电路后尖峰泄露分别为 23.5 V、17.6 V 和 14.8 V,低于大多数半导体器件在电磁脉冲作用下的电压毁伤阈值^[26-27]。可以看到,防护电路对方波脉冲的尖峰泄露大于对宽带高功率微波和窄带高功率微波的尖峰泄露,这是因为 TVS 二极管的过冲峰值电压会随注入信号功率的升高而增大,在测试采用的 3 种电磁脉冲信号中方波脉冲的峰值功率较高,因此对应的防护电路尖峰泄露也更大^[11]。表 2 归纳总结了防护电路对 3 种不同类型电磁脉冲的电压抑制比和注入脉冲的峰值功率。可以看出防护电路的耐受功率超过 387 kW;对方波脉冲、宽带高功率微波、窄带高功率微波 3 种电磁脉冲的电压抑制比分别可达 45.4 dB、42.7 dB、40.1 dB。综合以上测试结果,本文所设计的防护电路不仅具有出色的带内抑制能力、快的响应速度,还具有高的功率容量,能很好地满足电子信息系统强电磁脉冲防护需求,具有良好的实用价值。

表 2 防护电路对不同类型电磁脉冲的抑制能力及注入脉冲峰值功率

Table 2 Voltage suppression ratio of protection circuit towards different electromagnetic pulses and the peak power of incident pulses

waveform	R/dB	incident peak power/kW
square-wave pulse	45.4	387.2
WB-HPM	42.7	115.2
NB-HPM	40.1	45.0

3 结论

本文设计了一种基于 LC 选频网络和 TVS 二极管的电磁脉冲防护电路,该防护电路具有超过 2 GHz 的工作带宽和低于 0.6 dB 的插入损耗。在此基础上,系统研究了所设计防护电路对频谱分布在工作带宽内的三种不同电磁脉冲防护能力。结果表明:防护电路电压抑制比可达 40 dB 以上、耐受功率超过 387 kW,而响应时间仅有 0.7 ns。该防护电路具有工作带宽大、响应速度快、抑制性能好、耐受功率高等优势,且拥有结构紧凑、安装方便等优点,对电子信息系统电磁脉冲防护加固具有良好的实用价值。

参考文献:

- [1] 秦风,蔡金良,曹学军,等.车辆强电磁脉冲环境适应性研究[J].强激光与粒子束,2019,31:103203. (Qin Feng, Cai Jinliang, Cao Xuejun, et al. Investigation on the adaptability of vehicle in high-intensity electromagnetic pulse environment[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31: 103203)
- [2] 秦风,高原,马弘舫.高置信度强电磁脉冲环境测试技术研究进展与展望[J].强激光与粒子束,2021,33:123001. (Qin Feng, Gao Yuan, Ma Hongfeng. Progress and prospect of high-confidence measurement technology for high-intensity electromagnetic pulse[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33: 123001)
- [3] 刘培国,刘晨曦,谭剑锋,等.强电磁防护技术研究进展[J].中国舰船研究,2015,10(2):2-6. (Liu Peiguo, Liu Chenxi, Tan Jianfeng, et al. Analysis of the research development on HPM/EMP protection[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(2): 2-6)
- [4] 谭志良,李亚南,宋培姣.射频前端强电磁脉冲防护研究进展[J].北京理工大学学报,2020,40(3):231-242. (Tan Zhiliang, Li Yanan, Song Peijiao. Relevant research on electromagnetic pulse protection of RF front-end[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(3): 231-242)

- [5] 黄丹. 基于PIN二极管的X波段大功率限幅器设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2018. (Huang Dan. Design of a X-band microwave limiter based on PIN diode[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018)
- [6] 毕景康. 强电磁脉冲组合防护模块设计与研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020. (Bi Jingkang. Design and research of combined protection module of strong electromagnetic pulse[D]. Xi'an: Xidian University, 2020)
- [7] 杜传报, 毛从光, 崔志同, 等. 无线通信系统电磁脉冲传导防护组件设计与有效性试验验证[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 093005. (Du Chuanbao, Mao Congguang, Cui Zhitong, et al. Design and validation test of high-altitude electromagnetic pulse conductive protector module for wireless communication system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 093005)
- [8] Younis M T, Nasser N Y. Overvoltage transient protection network design[J]. *Engineering and Technology Journal*, 2009, 27(15): 2711-2718.
- [9] Kim K N, Lee S H, Kim J T. Implementation of dedicated power line filter for HEMP protection[J]. *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, 2016, 16(4): 47-52.
- [10] 张俊, 姜彦南, 张耀辉, 等. 纳秒脉冲下典型钳压型浪涌防护元件的响应特性[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 125003. (Zhang Jun, Jiang Yannan, Zhang Yaohui, et al. Nanosecond pulse response of typical voltage-clamping surge protective devices[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 125003)
- [11] 张小威. 不同快脉冲下脉冲防护器件响应特性与防护技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019: 20-47. (Zhang Xiaowei. Research on response characteristics and protection technology of EMP protection devices under different fast pulses[D]. Xi'an: Xidian University, 2019: 20-47)
- [12] 邓世雄, 高长征, 陈书宾, 等. 小型化高功率微波限幅器研究[J]. *微波学报*, 2020, 36(5): 70-73. (Deng Shixiong, Gao Changzheng, Chen Shubin, et al. Research on miniaturized high power microwave limiter[J]. *Journal of Microwaves*, 2020, 36(5): 70-73)
- [13] 李亚南, 谭志良. 基于PIN二极管的快上升沿电磁脉冲防护模块设计与研究[J]. *兵工学报*, 2018, 39(10): 2066-2072. (Li Yanan, Tan Zhiliang. Design and research of the fast rise time electromagnetic pulse protection module based on PIN diode[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(10): 2066-2072)
- [14] Yang Lin, Yang Lin'an, Rong Taotao, et al. Codesign of Ka-band integrated GaAs PIN diodes limiter and low noise amplifier[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 88275-88281.
- [15] Yang S S, Kim T Y, Kong D K, et al. A novel analysis of a Ku-band planar p-i-n diode limiter[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, 57(6): 1447-1460.
- [16] 艾竞. 小型化X波段平衡式限幅器设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2013. (Ai Jing. Design of a X-band miniaturized balanced microwave limiter[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013)
- [17] 王冬冬, 邓峰, 郑生全, 等. PIN二极管限幅器的电磁脉冲损伤特性试验[J]. *中国舰船研究*, 2015, 10(2): 65-69. (Wang Dongdong, Deng Feng, Zheng Shengquan, et al. Experimental investigation on the EMP damage characteristics of PIN diode limiters[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2015, 10(2): 65-69)
- [18] 牛萍, 王培, 赵佳欢, 等. 基于组合型电涌保护器能量配合的实验研究[J]. *南京信息工程大学学报:自然科学版*, 2015, 7(5): 463-468. (Niu Ping, Wang Pei, Zhao Jiahuan, et al. Energy coordination of combined surge protective device[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition*, 2015, 7(5): 463-468)
- [19] 孟兆祥, 毕军建, 王玉明, 等. 基于组合匹配的低残压宽带雷电防护方法研究[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(4): 547-552. (Meng Zhaoxiang, Bi Junjian, Wang Yuming, et al. Research on the lightning protection method for the low residual voltage and broadband based on the combined matching[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, 36(4): 547-552)
- [20] Lepkowski J, Wolfe B, Lepkowski W. EMI/ESD solutions for the CAN network[C]//Proceedings. 2005 IEEE Networking, Sensing and Control, 2005. 2005: 413-418.
- [21] 陈子鹏, 戴亚文, 李鹏, 等. 无线传感器电磁脉冲效应实验及防护电路设计[J]. *武汉理工大学学报*, 2013, 35(5): 146-151. (Chen Zipeng, Dai Yawen, Li Peng, et al. Effect of ESD EMP test on wireless sensor and protection network design[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2013, 35(5): 146-151)
- [22] Meiguni J S, Zhou Jianchi, Maghlaelidze G, et al. Transient analysis of ESD protection circuits for high-speed ICs[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, 63(5): 1312-1321.
- [23] Zhang Chengrui, Zeng Xun, Zhou Liang, et al. Protection effects using transient voltage suppressor diodes based circuits under high-power microwave pulses[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, 63(6): 2058-2064.
- [24] Pozar D M. Microwave engineering[M]. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 2011: 174-191.
- [25] 郝凤柱. 某机载天线系统的电磁脉冲防护研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017: 28-39. (Hao Fengzhu. Study of protection against electromagnetic pulse for airborne antenna[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017: 28-39)
- [26] Shurenkov V V, Pershenkov V S. Electromagnetic pulse effects and damage mechanism on the semiconductor electronics[J]. *Facta Universitatis-Series: Electronics and Energetics*, 2016, 29(4): 621-629.
- [27] Cheng Yonghong, Ding Man, Wu Kai, et al. Damage effect of typical electronic device under EMP[C]//Proceedings of 2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials. 2011: 491-494.