



·高功率微波技术·

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*

杜传报¹, 毛从光¹, 崔志同¹, 孙东阳¹, 郝佳²,
吴伟¹, 陈伟¹, 吴志强³, 邱扬²

(1. 西北核技术研究所, 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024; 2. 西安电子科技大学机电工程学院, 西安 710071; 3. 北京航天晨信科技公司 北京 102300)

摘要: 为提高甚高频无线通信系统的抗高空电磁脉冲能力, 基于易损性分析结果, 确定了瞬态泄流和稳态滤波联合防护的设计思路以及设计指标, 并研制了防护样件。使用 20 ns/500 ns 传导注入波形开展防护组件脉冲注入试验, 比系统原始防护器残余电流峰值减小 60%, 启动时间缩短 75%, 作用时间缩短 80%, 注入波形低频能量限制 (20 MHz 以下) 提高 1 个量级; 以某甚高频无线通信系统为被试品, 开展了防护组件加固验证试验, 防护组件残余电流控制在 10 A 水平以下, 被试系统功能和性能指标正常, 验证了防护组件设计的有效性。

关键词: 高空电磁脉冲; 无线通信系统; 防护组件; 脉冲注入试验; 脉冲辐照试验

中图分类号: TM937; O441

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210155

Design and validation test of high-altitude electromagnetic pulse conductive protector module for wireless communication system

Du Chuanbao¹, Mao Congguang¹, Cui Zhitong¹, Sun Dongyang¹, Hao Jia²,
Wu Wei¹, Chen Wei¹, Wu Zhiqiang³, Qiu Yang²

(1. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

3. Beijing Aerocim Technology Co. Ltd, Beijing 102300, China)

Abstract: To improve the anti-HEMP ability of very high frequency wireless communication systems, based on the vulnerability analysis results in the early stage, the design principle and indicators of the combination of transient discharge and steady-state filtering were determined, and the protector module sample was produced. The 20 ns/500 ns conduction injected waveform was used to carry out the pulsed conducted injection test for the protector sample. Compared with the original protector, the peak of the residual current was reduced by 60%, the start time was shortened by 75%, the action time was shortened by 80%, and the low-frequency energy limit of the injected waveform below 20 MHz was increased by 1 order of magnitude. A VHF wireless communication system was taken as the test product, and the protection validation test was carried out. The test illustrated that the residual current peak is controlled below 10 A, and the function and performance of the tested system are norm, which verifies the effectiveness of the designed protector module.

Key words: high altitude electromagnetic pulse; wireless communication system; protector module; pulsed injection test; pulsed radiation test

高空电磁脉冲(HEMP)具有广域覆盖、场强峰值高、响应快、持续时间短等特点, 其主要能量范围集中在 300 MHz 以下, 对工作在此频段内的无线通信设备生存能力造成严重威胁^[1-3]。甚高频无线通信系统是铁路通信的主要手段之一, 其工作频率位于 HEMP 频谱范围, 现有通信系统大多已经根据防雷要求在天线端口安装雷电防护器。相比

* 收稿日期: 2021-04-20; 修订日期: 2021-06-30

联系方式: 杜传报, duchuanbao@nimt.ac.cn。

通信作者: 毛从光, maocongguang@nimt.ac.cn。

雷电脉冲, HEMP 脉冲响应速度更快, 雷电防护器不一定能有效保护通信系统免受 HEMP 脉冲冲击。在针对某型已经安装避雷器的甚高频无线通信 HEMP 易损性试验中, 被试设备出现由 HEMP 经天线端口冲击射频开关击穿短路造成电源模块故障的“间接效应”现象。如何通过防护设计和防护加固验证试验有效解决甚高频无线通信的 HEMP 加固问题, 是主要研究关注点。

目前, 关于射频前端电磁脉冲加固的研究主要集中在器件防护特性研究、组合器件防护特性研究和射频前端防护设计等方面。西安电子科技大学邱扬团队研究了器件在强电磁脉冲环境、不同脉冲参数环境下的防护器件响应特性、电路建模、组合器件特性等^[4-5], 李亚南、谭志良等人针对短波通信射频前端进行了防护模块仿真与设计^[6-7], 上海交大尹文言团队针对接收机 LNA 组件进行了电磁脉冲防护加固研究^[8]。上述研究成果主要是从器件响应特性、器件类型组合角度出发, 对于被防护系统端口耦合响应和电磁敏感特性关注较少。

决定防护器防护效果的理论依据是应力-强度干涉模型^[9-10], 电磁应力依赖于环境和耦合结构的电磁响应计算^[11], 决定防护器件类型、启动电压等参数, 而干扰强度则依赖于被保护系统本身的端口电路电磁敏感特性和损伤阈值, 其决定了防护器残余电流的设计指标要求。本文基于先期甚高频无线通信易损性分析结果和防护建议, 进行了防护电路的设计和仿真, 并与系统自带防护器进行传导注入试验结果对比, 最后通过脉冲辐照试验验证了加固性能, 证明了防护设计的有效性。

1 背景描述

1.1 电磁环境

HEMP 环境波形有早期(E1), 中期(E2)和晚期(E3)三个阶段, 对于天线、线缆等小尺度耦合结构主要关注早期 E1 波形, E1 波形具有分布范围广、脉冲幅值大、频谱范围宽和作用时间短等特点, 对无线通信设备威胁最大, 国际标准^[12]均使用双指数波形作为标准环境波形, 上升沿 2.5 ns, 脉宽 23 ns, 峰值 50 kV/m, 其表达式如式(1), 其时域波形如图 1 所示。通过计算可知, 脉冲能量 99% 均集中在 300 MHz 以下。

$$e_{\text{inc}}(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ E_0 \cdot k_0 (e^{-at} - e^{-bt}), & t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: 电场峰值 $E_0 = 50 \text{ kV/m}$, 决定脉冲前沿脉宽的参数为 $a = 4 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $b = 6 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, $k_0 = 1.3$ 。

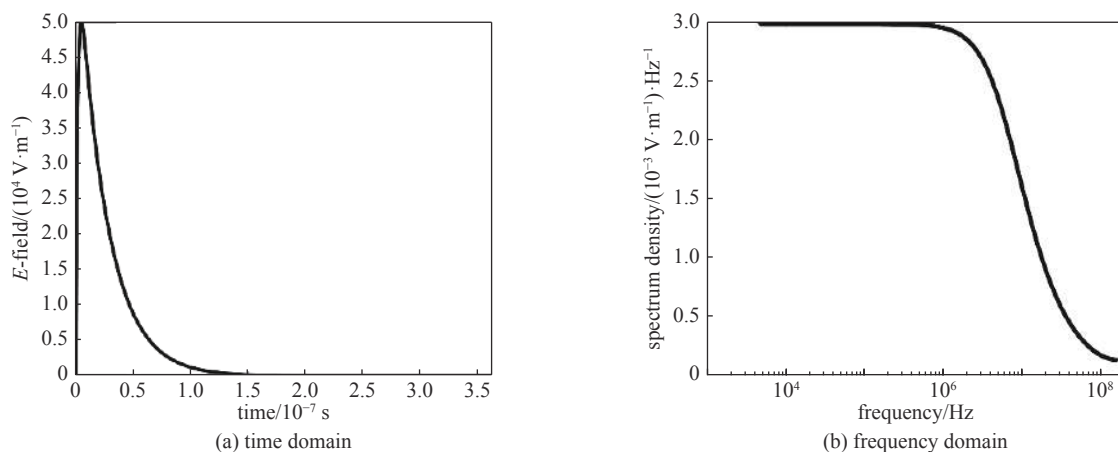


Fig. 1 HEMP wave description

图 1 HEMP 环境波形描述

1.2 甚高频无线通信系统

甚高频无线通信工作频段在甚高频 30~300 MHz 内, 主要应用于列车与站台之间的调度通信, 通常采用半双工通信制式, 其接收机结构类型主要有超外差式、零中频式、低中频式和带通采样等结构^[13-14]。本文研究的试验对象采用超外差式收发结构, 图 2 为典型射频前端通信收发结构示意图。

无线通信的天线通常安装于机车顶部, 天线通常使用底馈单极子天线, 长度 0.3~3.0 m, 其电尺寸长度位于 HEMP 主要能量频段范围内。由于常规电磁兼容要求, 天线是雷电脉冲冲击的主要耦合通道, 天线端口通常配置有雷电脉冲防护器, 防护器采用旁路泄流方式, 核心器件为气体放电管或瞬态抑制放电二极管 TVS。由于高空电磁脉冲标准波形相较于雷电脉冲波形响应上升沿快、持续时间短, 雷电脉冲防护器未必能够完全有效抑制住防护

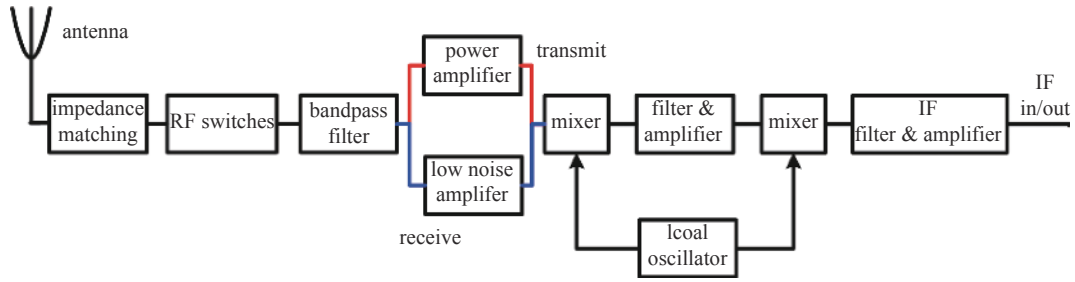


Fig. 2 Typical transceiver structure for RF front end

图 2 典型射频前端通信收发结构

器后端残余的脉冲能量。

1.3 易损性分析结果

甚高频无线通信系统的主要耦合通道有天线感应电磁脉冲的“前门”耦合和通过主机金属外壳孔缝渗透进入设备内部的“后门”耦合,已有主机脉冲辐照试验证明设备金属外壳起到较好的屏蔽作用,可有效保护设备内部电路。而“前门”耦合分析中,将设备天线视作 3 m 长平板单极子天线,其在 50 kV/m 平面波垂直极化照射下天线端口耦合响应可以达到 400 A 水平,使用经典电磁计算方法矩量法 MoM^[15] 建模和耦合计算波形如图 3 所示。

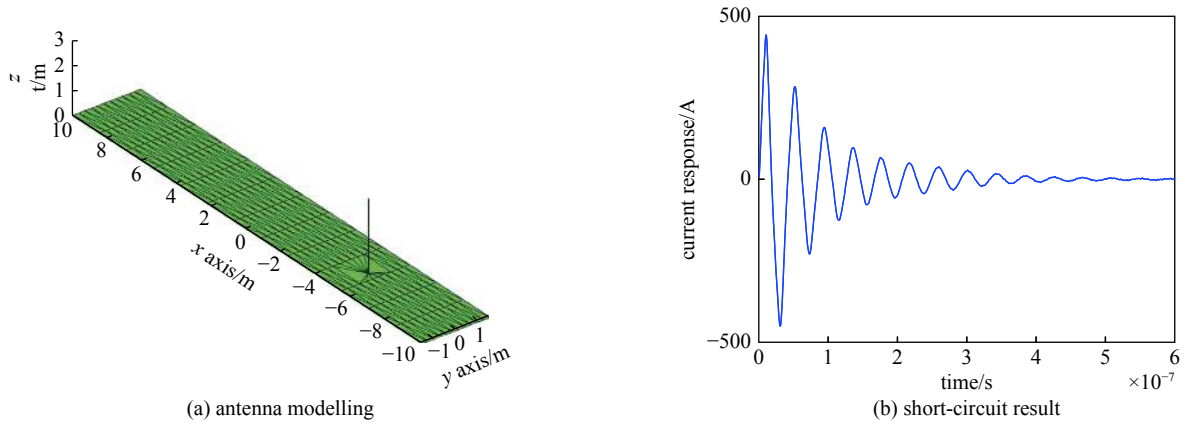


Fig. 3 Antenna modelling and simulation results

图 3 天线建模和计算结果

在天线系统脉冲辐照试验中,被试通信系统出现“电源模块”故障的间接效应现象,经效应机理分析,确定是由于经过天线端口到达的脉冲电压峰值超过了其射频开关最大翻转耐受电压门限所致。基于机理分析,确定了防护器后端残余电流不大于 10 A 的防护指标。

2 电磁脉冲防护设计仿真

2.1 防护设计方案和指标

相较于系统自带避雷器使用的旁路泄流设计方案,使用一级旁路泄流和二级稳态滤波的组合设计思路(图 4),一级防护使用气体放电管与压敏电阻串联的组合形式,二级防护使用带通滤波实现残余电流的进一步抑制,瞬态防护器件参数的选择主要考虑响应时间、直流/脉冲击穿电压、钳位电压、最大承受功率等,目前已有很多文献介绍如何选择防护器件参数^[4-5],本文不再赘述。根据被防护系统特性和易损性分析结果,确定防护器设计指标如表 1 所示。

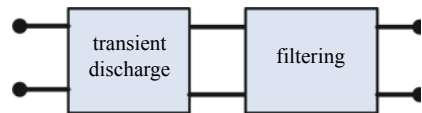


Fig. 4 Combination protection design

图 4 组合防护设计示意

表 1 防护指标

Table 1 Protection indicator

operation frequency/MHz	insert loss/dB	maximum residual current peak (400 A injected current peak 400 A)	starting time
30-100	≤0.5 dB	≤10 A	≤10 ns

2.2 防护电路仿真

根据 GJB8848-2016^[16] 中规定的传导环境注入试验要求中, 选择 20 ns/500 ns 双指数波进行注入, 其波形参数定义如图 5 所示, 其双指数函数表达式如下

$$I(t) = I_0 \cdot K_{DL} \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2)$$

式中: I 是时域波形的瞬时电流; I_0 是时域波形的峰值电流; $K_{DL} = 1/(e^{-\alpha t_p} - e^{-\beta t_p})$, 是幅值修正系数, $t_p = (\ln \alpha - \ln \beta)/(\alpha - \beta)$; α 和 β 的值分别为影响着脉冲后沿与前沿的参数。

在电路仿真软件 Cadence 中建立的 HEMP 脉冲注入源仿真电路和注入波形如图 6 所示。其中, V1、V2 为分段线性信号源的电压源, 分别模拟双指数源公式中的 $-\alpha t$ 与 $-\beta t$; EXP 模块为指数函数模块, 模拟函数 e^x ; DIFF 模块模拟减法运算; Gain 为电流控制电流源, 通过其电流增益模拟双指数源公式中的 I_0 , 设式 (2) 中的参数如 $K_{DL} = 1.089$, $\alpha = 1.72 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, $\beta = 1.05 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 。

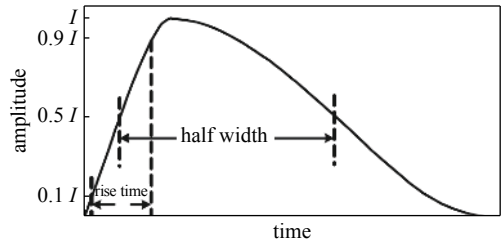
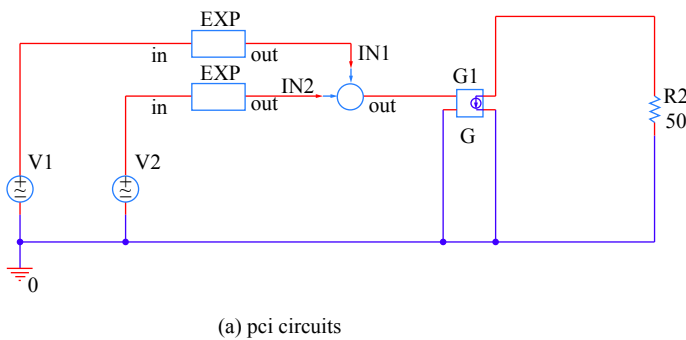


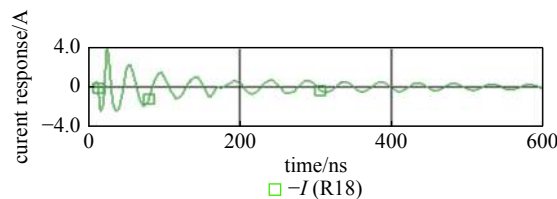
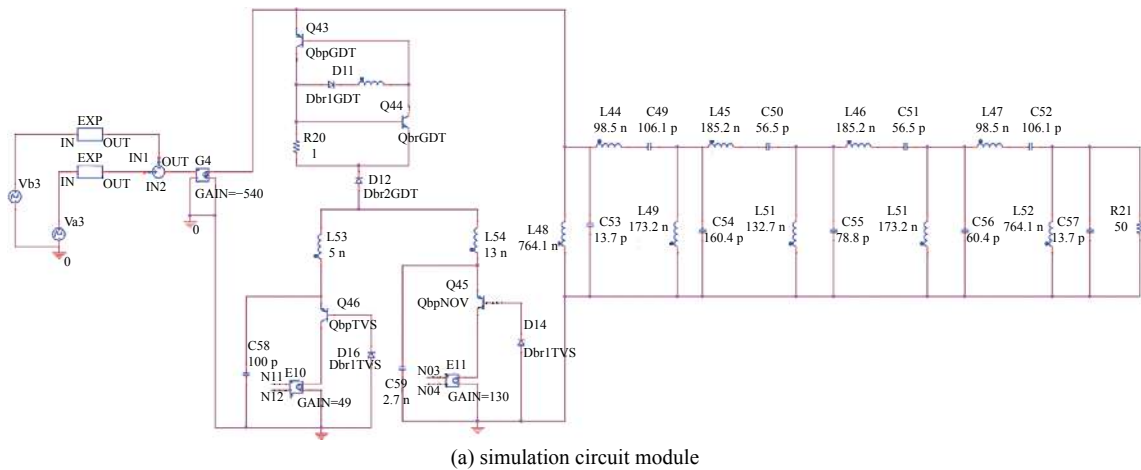
Fig. 5 Parameters for pulsed injection wave

图 5 脉冲注入波形参数定义图

Fig. 6 Simulation and results for pulsed injection source

图 6 脉冲注入源仿真电路和结果

联合注入源仿真回路和防护仿真电路, 构建防护组件注入试验仿真回路, 当注入电流为 400 A 时, 仿真环境下的防护器后端残余电流为 4 A, 仿真电流和负载电流波形如图 7 所示, 插损仿真和实测结果如图 8 所示, 残余电流



(b) residual current response after the protector

Fig. 7 Simulation circuit and residual current response for PCI test of the designed protector module

图 7 防护组件注入试验仿真电路和仿真结果

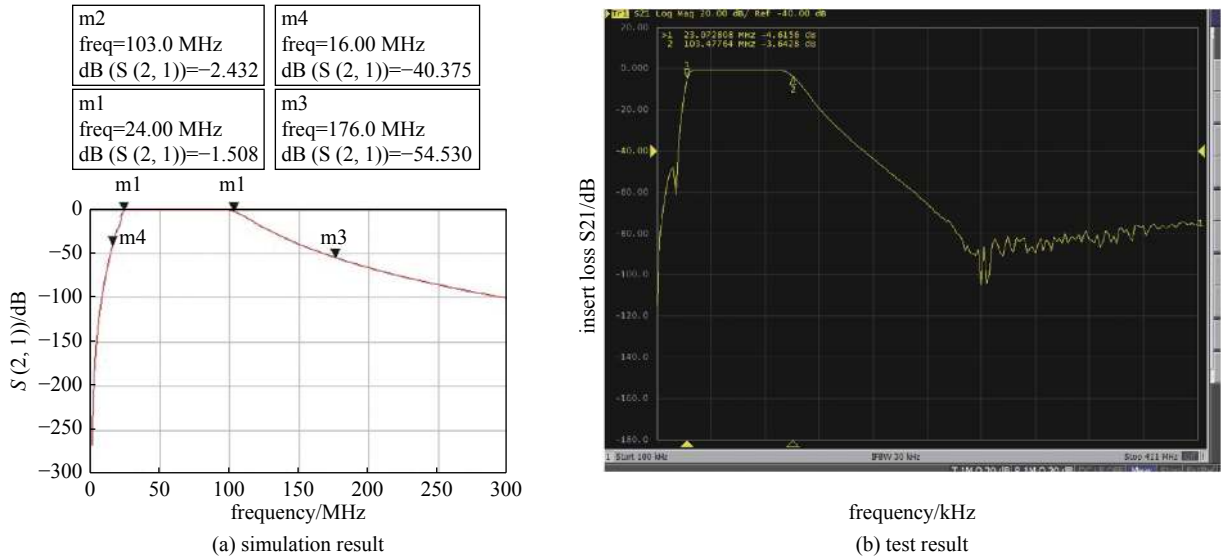


Fig. 8 Simulation and test results for insert loss

图 8 插损的仿真和测试结果

和插损指标均满足设计要求。

3 防护器性能测试和试验验证

3.1 防护器注入试验

制作加工的防护组件样件和系统自带防护器样件如图 9 所示。使用输出短路波形参数 20 ns/500 ns 的脉冲电流注入源进行防护组件注入试验,注入试验设置和注入源输出波形如图 10 所示。可知,脉冲源加压等级范围为 10~50 kV,输出标准双指数波形,电流峰值范围为 180~930 A,波形参数满足要求,频域上来看注入电流波形能力主要集中于 100 MHz 以下。

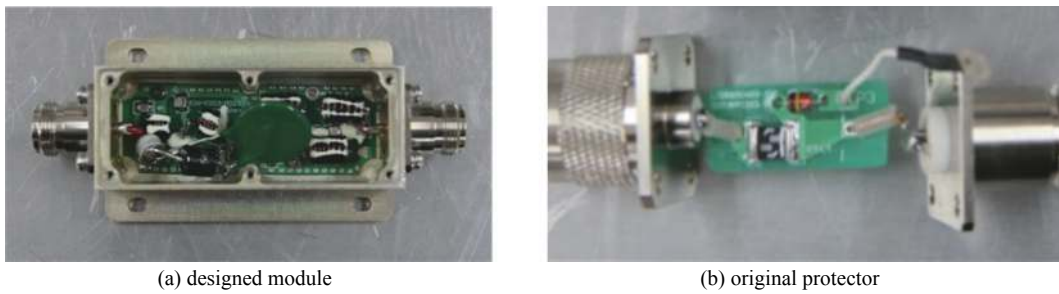


Fig. 9 Photos of the two protector modules

图 9 防护器组件样照

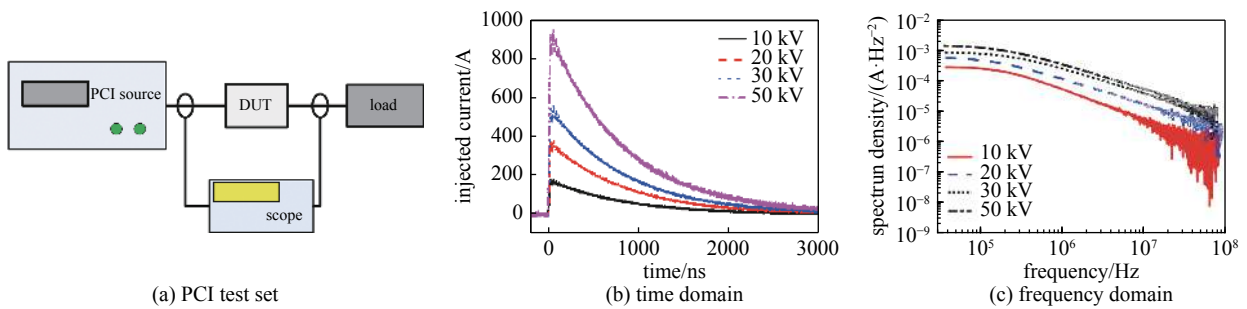


Fig. 10 Test set for PCI test and analysis of the injected current

图 10 注入试验设置和注入电流时频域分析结果

注入试验等级从脉冲 10 kV 加压至 50 kV,防护组件端口的注入电流从 190 A 提高至 930 A,防护组件后端残余电流峰值控制在 10 A 以内,从频谱分析结果可知,系统工作频段以外的频谱密度被限制在非常低的水平,如图 11 所示。将自研防护组件测试时频域测试结果和系统自带雷电防护组件进行对比,测试分析结果如图 12 所示。在 50 kV

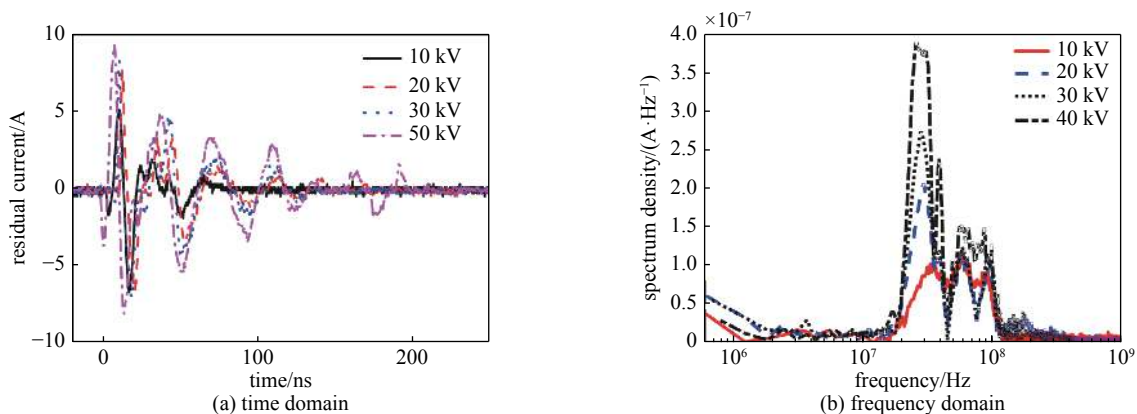


Fig. 11 Time and frequency analysis for the residual current of the designed protector module

图 11 组合防护组件残余电流时域频域分析

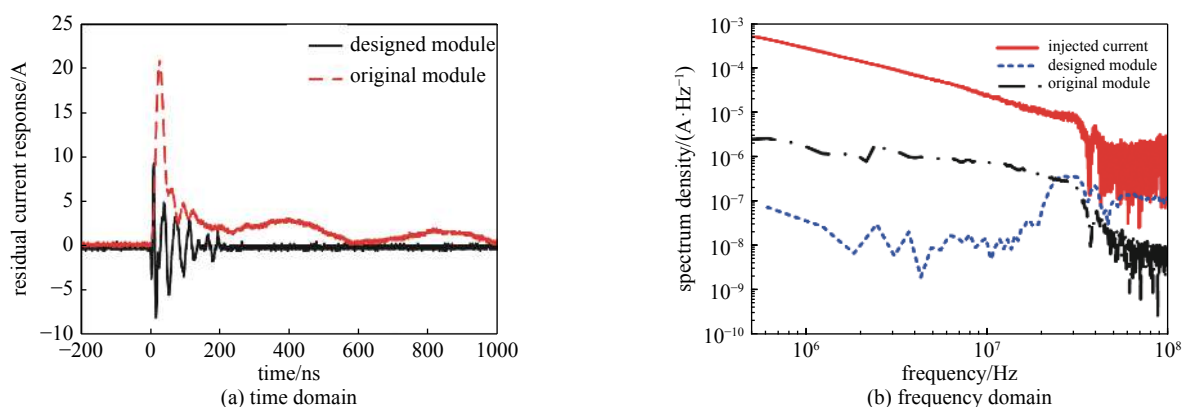


Fig. 12 Comparison of the injected wave and residual wave for these two protector modules

图 12 两款防护器防护前后电流波形响应分析

脉冲注入等级条件下,相比雷电防护器残余电流峰值 22 A、启动时间 20 ns、作用时间 1 μ s,自研防护组件电流峰值为 10 A(减小 60%)、启动时间 5 ns(减小 75%)、作用时间 200 ns(减小 80%),时域参数全面领先;此外,通过对比频域分析结果,相比雷电防护器,自研防护器频域在 25 MHz 以下将频谱能量限制压低近 1 个量级水平,有效抑制了低频能量为主的标准注入源波形。此外,在启动时间和作用时间上的优势均会提高防护效果,防止出现尖峰泄露和持续干扰被试系统等问题。

3.2 脉冲辐照验证试验

使用垂直极化有界波模拟器^[17]开展防护组件的脉冲辐照验证试验,能够产生上升沿 2.5 ns、脉宽 23 ns 和峰值高达 50 kV/m 的双指数脉冲电场波形。以某型铁路无线通信为例,开展天线脉冲辐照试验,试验场强等级为 50 kV/m,监测典型电场波形、天线端口和防护器后端电流耦合响应波形。图 13 为防护验证脉冲辐照试验布置示意、电场测试波形和该场强环境下的天线端口注入波形。试验结束后进行功能性和性能指标测试,功能性指标包括语音、数据通信功能,性能指标包括发送功率和接收灵敏度。

对两种防护器在脉冲辐照试验下的残余电流进行时频域分析,见图 14。相比系统防护组件,自研防护组件将残余电流峰值控制在 10 A 水平以下,其与注入试验分析结果相一致;根据频域分析结果,相比天线端口响应电流波形,两款防护器均能够大幅度限制频谱量,但自研防护器在频谱能量抑制方面,除了工作频段以外,具有全面的频谱能量抑制优势。每个试验等级结束后均会对被试品进行全面功能和性能指标检测,未发现被试系统异常,其中通信功能如语音通话质量清晰,数据通信传输成功率为 100%,性能指标如发送功率为 45~48 dBm,接收灵敏度指标为 -115~-120 dBm,性能指标正常。不同于被试系统安装雷电防护组件时出现“电源模块故障”的效应现象,本防护组件通过试验考核。

4 结论

本文基于前期对甚高频无线通信的易损性分析结果,确定了瞬态泄流和稳态滤波联合防护的设计思路以及设

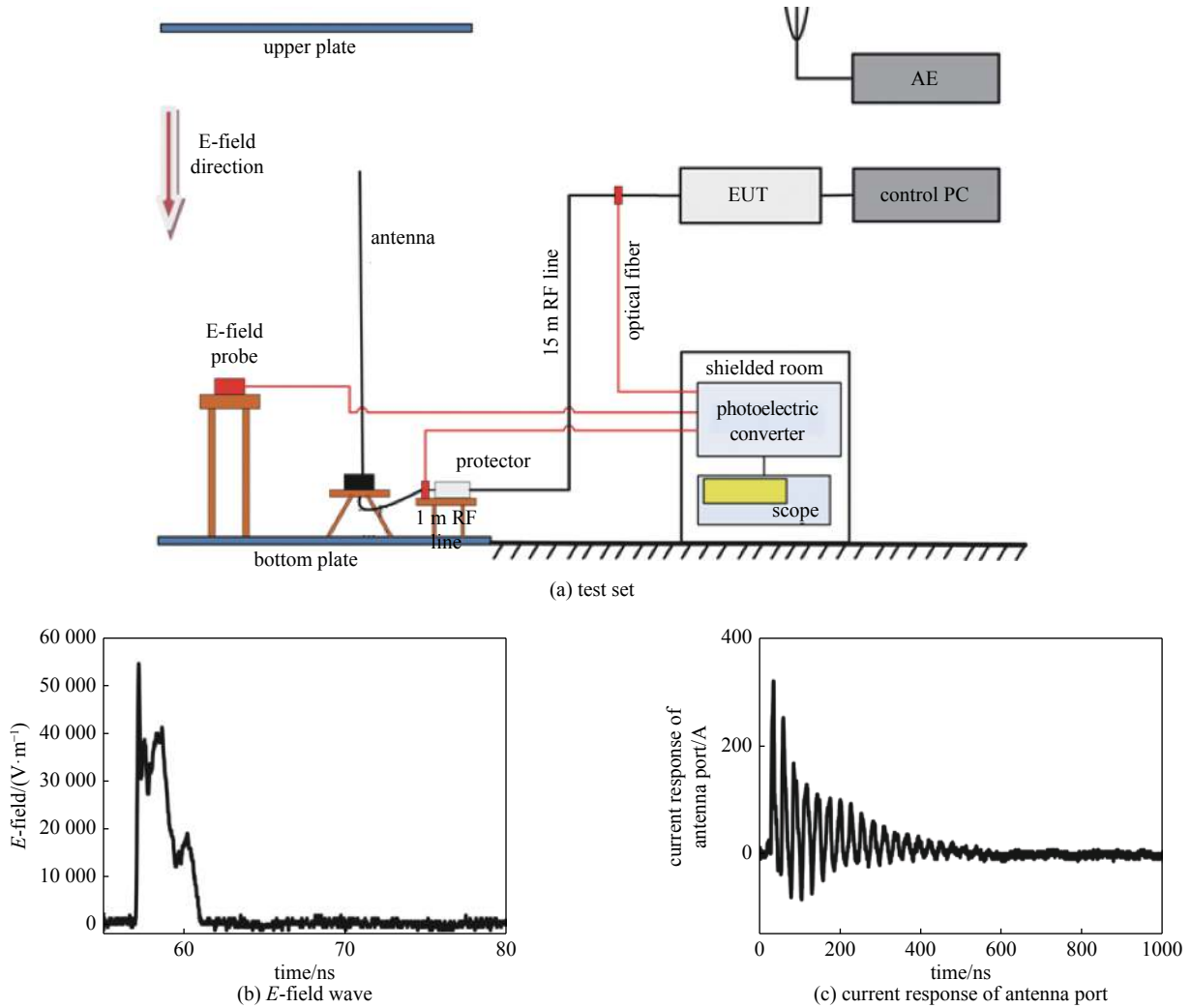


Fig. 13 Test set and waves for pulsed radiation test

图 13 脉冲辐射试验布置和响应波形

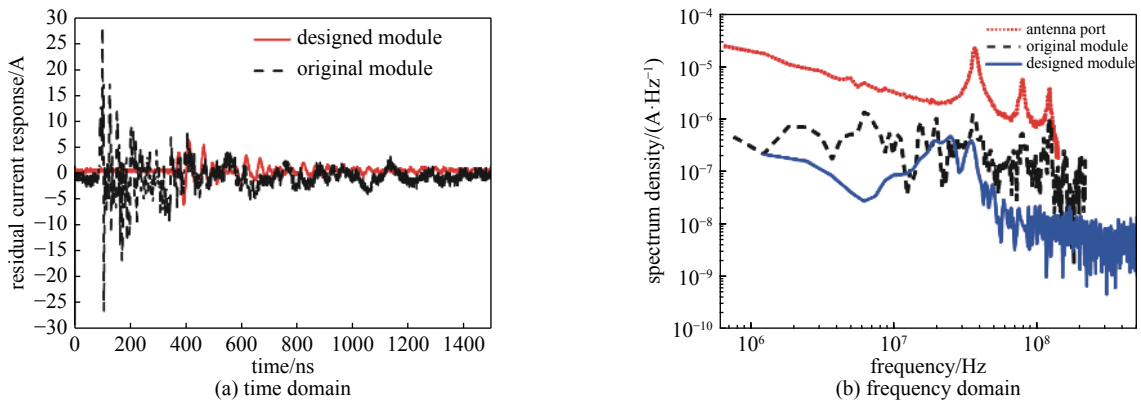


Fig. 14 Test result analysis for the current responses of these two protectors

图 14 两种防护器前后端电流响应测试结果分析

计指标,通过防护组件注入试验仿真验证了设计电路的合理性,基于研制样件分别开展了防护组件注入试验和防护组件加固后的脉冲辐照试验,通过和系统自带防雷组件的残余电流时频域分析对比,以及对被试系统功能性和指标性的效应测试,全面验证了本文所设计防护组件的有效性和优越性。下一步将从辐照耦合响应波形和传导注入波形的等效性角度开展防护器的防护特性分析。

参考文献:

[1] Giri D V, Hoard R, Sabath F. High-power electromagnetic effects on electronic systems[M]. London: Artech House, 2020: 20-30.

- [2] 周璧华, 陈彬, 石立华. 电磁脉冲及其防护工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. (Zhou Bihua, Chen Bin, Shi Lihua. Electromagnetic pulse and its protection engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003)
- [3] Backstrom M G, Lovstrand K G. Susceptibility of electronic systems to high-power microwaves: summary of test experience[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, 46(3): 396-493.
- [4] 马浪凯. 强电磁脉冲下传导防护器件瞬态响应特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018. (Ma Langkai. Study on transient response characteristics of conductive protection device under strong electromagnetic pulse[D]. Xi'an: Xidian University, 2018)
- [5] 张小威. 不同快脉冲下脉冲防护器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. (Zhang Xiaowei. Research on response characteristics and protection technology of pulse protector under different fast pulses[D]. Xi'an: Xidian University, 2019)
- [6] 李亚南, 谭志良, 彭长振. 基于短波通信的射频前端电磁脉冲防护模块仿真与设计[J]. *电子学报*, 2018, 46(6): 1421-1427. (Li Ya'nan, Tan Zhiliang, Peng Changzhen. Simulation and design of RF front end electromagnetic protection module based on HF communication[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(6): 1421-1427)
- [7] 李亚南, 谭志良, 宋培姣. 射频前端强电磁脉冲防护模块设计[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 013204. (Li Ya'nan, Tan Zhiliang, Song Peijiao. Simulation and design of RF front end electromagnetic protection module[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 013204)
- [8] 王洋. 接收机前端低噪声放大器设计及其电磁脉冲防护研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011. (Wang Yang. Design and electromagnetic pulse protection research of receiver front-end LNA[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011)
- [9] Mao C, Canavero F. System-level vulnerability assessment for IEMI: from fault tree analysis to Bayesian networks—part i: methodology framework[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, 58(1): 180-187.
- [10] 张志华. 可靠性理论及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (Zhang Zhihua. Reliability theory and engineering application[M]. Beijing: Science Press, 2012)
- [11] Du C, Liu Z, Mao C, et al. An efficient method to statistical modeling of transient response for monopole antenna[C]//Europe EMC Conference. 2018.
- [12] IEC 61000-2-10-1998, Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2-10: Environment—description of HEMP environment conducted disturbance[S].
- [13] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016. (Fan Changxin, Cao Lina. Principle of communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016)
- [14] 楼才义, 徐建良, 杨小牛. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014. (Lou Caiyi, Xu Jianliang, Yang Xiaoniu. Software-defined radio: principles and practice[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2014)
- [15] Rao S M, Wilton D R, Glisson A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape[J]. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 1982, 30(3): 409-418.
- [16] GJB8848-2016. 系统电磁环境效应试验方法[S]. (GJB8848-2016. Test method of system electromagnetic environmental effect[S].)
- [17] 谢霖霖, 吴伟, 朱湘琴. 分布式负载垂直极化有界波电磁脉冲模拟器外泄场的规律分析[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 055002. (Xie Linshen, Wu Wei, Zhu Xiangqin. Regularity analysis of leakage-field from vertically polarized bounded wave electromagnetic pulse simulator with distributed load[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 055002)