

文章编号: 2095-4980(2024)12-1364-06

## 短波天线端口脉冲电流注入方法实验

董亚运<sup>1</sup>, 崔志同<sup>1</sup>, 杜传报<sup>1</sup>, 聂鑫<sup>1</sup>, 刘逸飞<sup>1</sup>, 王文卓<sup>2</sup>, 郑生全<sup>2</sup>

(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, 陕西 西安 710024;

2.中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064)

**摘要:** 脉冲电流注入是研究电子设备高空电磁脉冲(HEMP)效应的重要手段。本文设计了短波天线端口接触式脉冲电流注入实验平台, 研究了短波设备接收和发射两种不同工作状态, 以及低、中、高3种不同工作频率对注入电流的影响, 探索了天线端口防护器分立状态和在线状态下的性能差异, 为后续短波天线端口的抗电磁脉冲干扰的性能试验提供了可靠依据。

**关键词:** 脉冲电流注入; 短波天线; 防护器; 高空电磁脉冲

中图分类号: TM27

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023092

## Experimental study on pulse current injection method for short-wave antenna port

DONG Yayun<sup>1</sup>, CUI Zhitong<sup>1</sup>, DU Chuanbao<sup>1</sup>, NIE Xin<sup>1</sup>, LIU Yifei<sup>1</sup>, WANG Wenzhuo<sup>2</sup>, ZHENG Shengquan<sup>2</sup>

(1.National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China; 2.China Ship Development and Design Center, Wuhan Hubei 430064, China)

**Abstract:** Pulse Current Injection(PCI) is an important means of studying the High-altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) effects on electronic equipment. This paper designs a shortwave antenna port contact pulse current injection experimental platform, studies the effects of two different working states (receiving and transmitting) of shortwave equipment, as well as the impact of three different working frequencies (low, medium, and high) on the injected current. It also explores the performance differences of antenna port protectors in both stand-alone and online states, providing a reliable basis for subsequent performance tests of shortwave antenna port resistance to electromagnetic pulse interference.

**Keywords:** Pulse Current Injection(PCI); short-wave antenna; protector; High-altitude Electromagnetic Pulse (HEMP)

高空电磁脉冲(HEMP)作为一种瞬变电磁现象, 其瞬时高能量已严重威胁到现代电子设备尤其是通信设备的安全<sup>[1-3]</sup>。短波通信设备天线的工作频率为1.6~30 MHz, 在HEMP的主要能量频段内, 电磁脉冲的绝大部分能量通过短波天线进入到短波通信设备中, 对短波通信设备造成干扰甚至损坏<sup>[4]</sup>。因此开展对短波天线端口的电磁脉冲传导敏感性研究具有十分重要的意义。

国外已经研究并制定了一系列环境和试验方法的标准, 如MIL-STD-464C *Electromagnetic Environmental Effects Requirements For Systems* 和TOP-1-2-511 *Electromagnetic Environmental Effects System Testing* 等。部分标准规定了通信系统的HEMP防护与试验验证方法等内容, 如美军标MIL-STD-188-125-1/2规定了天线系统的脉冲电流注入试验方法, 对短波天线采用双指数波脉冲注入<sup>[5]</sup>。国内也在2016年颁布了GJB 8848-2016《系统电磁环境效应试验方法》。基于现有标准, 段泽民等<sup>[6]</sup>针对暴露于电磁脉冲环境下的螺旋天线进行了建模与仿真, 研究了天线在不同电磁脉冲入射角下的响应特性。赵守俊等<sup>[7]</sup>运用时域有限差分对飞行器及其天线进行建模仿真, 研究获取了两幅短波天线对不同入射角度HEMP的电流响应波形。吴刚<sup>[8]</sup>对天线前端设备进行HEMP传导注入试验, 评估了HEMP对一个实际的短波接收天线系统的威胁。这些研究揭示了天线耦合响应和传导防护的特点, 但并未对短波通信设备在不同状态下脉冲电流注入是否有差异展开研究。另外, 现有标准中规定的通信系统的HEMP传导防护器件防护性能指标参数不够全面, 对器件本身特性的研究较为清楚, 但实际防护效果和指标测试结果的关联研究欠缺, 不能充分反映防护器件电气特性和实装状态下的防护效果。

收稿日期: 2023-04-14; 修回日期: 2023-08-17

基金项目: 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室基金资助项目(SKLIPR1901); 国防基础科研计划资助项目(JCKY2019207A029)

本文围绕短波天线端口，采用接触式脉冲电流注入(PCI)法，研究短波通信设备的不同工作频段、不同工作状态(接收或者发射)对注入电流是否有影响。此外，开展了防护器件的在线测试方法研究，对比分析了防护器件的离线和在线状态下的防护性能差异，为后续短波天线端口的加固防护提供参考。

## 1 短波天线端口抗 HEMP 研究

### 1.1 短波通信设备耦合路径分析

在电磁脉冲环境中，电磁脉冲可能通过多种耦合途径进入到短波通信设备中，并对短波通信设备造成干扰甚至损伤。耦合途径可包括“前门”和“后门”等，其中，“前门”耦合主要是指电磁脉冲能量通过接收通道进入到设备内部，对短波通信的前端设备造成损伤；“后门”耦合是指电磁脉冲能量通过设备孔、缝、线缆等途径进入短波通信设备内部，对设备的组成部分造成破坏<sup>[9-11]</sup>。为减小电磁脉冲对短波通信设备的影响，在实际应用中，短波通信设备中的重要部件位于屏蔽壳体内部，并无功能性开孔，因此，“后门”耦合对于短波通信系统的影响较小，主要研究“前门”耦合对短波通信设备的影响。

图 1 为短波通信设备的结构图。从图中可以看出，该短波通信设备的“前门”耦合路径包括天线、天线调谐器以及收发信机。其中，收发信机内部包括低噪声放大器以及带通滤波器。天线是短波通信设备的“前门”耦合的核心，是短波通信设备中电磁脉冲“前门”耦合的主要途径，电磁脉冲能量直接通过天线耦合到设备的收发信机<sup>[12-13]</sup>。因此，短波通信设备的传导敏感度研究主要是围绕天线端口的传导敏感度开展。

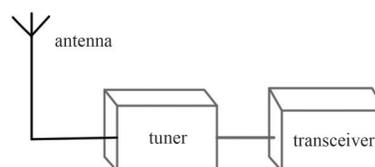


Fig.1 Diagram of short-wave communication system  
图 1 短波通信设备结构图

### 1.2 短波天线端口脉冲电流注入

PCI法因其对试验环境要求较低，装置简单，易控制，应用范围广，是电子设备传导敏感度试验中的重要技术手段。根据耦合装置的不同，PCI法可分为非接触式注入和接触式注入两类<sup>[14]</sup>。其中，非接触式注入方法中，脉冲源与受试设备没有直接的电气接触，不会对受试对象的工作状态造成影响，但其耦合效率低，受试设备端口感应电流有限；接触式注入方法中，脉冲源输出直接作用于受试设备，在设备端口感应电流较大，易达到受试设备的损伤阈值<sup>[15-17]</sup>。

图 2 为本文所设计的短波天线端口 PCI 实验装置，主要包括：PCI 源、天调防护器、天调、收发信机防护器、收发信机、示波器(电流监测与记录系统)。该实验装置采用接触式注入方法，获取每一级耦合电流幅值。

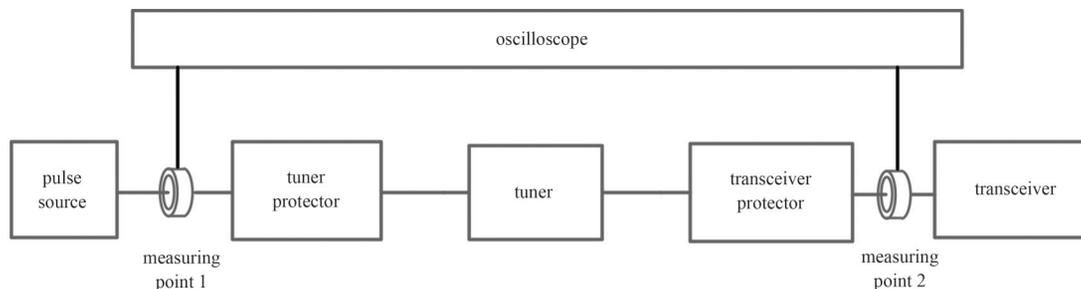


Fig.2 PCI test device of short-wave antenna port  
图 2 短波天线端口 PCI 实验装置

天调防护器和收发信机防护器主要采用气体放电管(Gas Discharge Tube, GDT)，GDT 与被保护的电子设备并联，如图 3 所示，通过泄放浪涌，起到保护后端电路的作用。其中，防护器为同轴结构，GDT 安装于其外壳与芯线之间，尺寸较小，且 GDT 两个电极之间的电容很小(pF 量级)，短波频段(1.6~30 MHz)内插损小于 0.1 dB，防护器不会对工作信号造成影响。实验中，当外加电压幅度较小时，GDT 支路处于高阻状态，注入的脉冲电流进入后端的电子设备中；当外加电压幅度增大到超过 GDT 动作电压时，GDT 可由高阻状态变成低阻状态，注入的脉冲电流从 GDT 支路泄放，保护后端的电子设备。

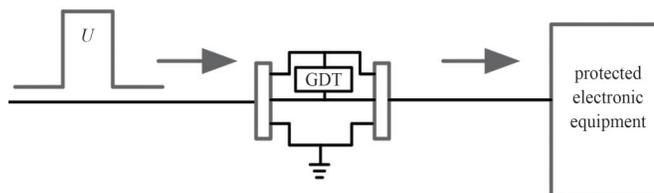


Fig.3 Working schematic of GDT  
图 3 气体放电管工作原理示意图

短波天线频率范围为 1.6~30 MHz, 按照 GJB 8848-2016 规定, 采用双指数波脉冲源开展 PCI 实验。实验中, 通过调整脉冲源输出电压, 得到不同幅度的双指数波, 从而改变注入电流幅值大小。脉冲源采用前沿为 20 ns, 半宽为 500~550 ns 的双指数脉冲直流信号, 波形如图 4 所示。实验中设置 2 个测点, 分别为: 脉冲源输出电流(测点 1)和收发信机前端电流(测点 2)两个测点。

## 2 短波通信设备状态对注入电流的影响

### 2.1 不同工作频率下短波天线端口的 PCI 实验

参照图 2 所示的装置, 研究不同工作频率对短波天线端口的敏感度是否有影响, 实验结果数据如表 1 所示。

表 1 不同频率下各测点电流值

Table1 Current value of each measuring point at different frequencies

| monitoring voltage/kV | frequency/MHz | current of measuring point 1/A | current of measuring point 2/A |
|-----------------------|---------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 2                     | 10.35         | 24                             | 13                             |
|                       | 18.65         | 25                             | 18                             |
|                       | 29.25         | 19                             | 3                              |

实验中选择短波通信设备的低、中、高 3 个工作频率, 分别为 10.35 MHz、18.65 MHz 和 29.25 MHz, 当监测电压为 2 kV 时, 收发信机防护器未动作。从表 1 中可以看出, 在监测电压相同时, 短波通信设备工作在不同频率下, 各测点的电流幅值不同。其中, 中频时的脉冲源输出电流幅值(测点 1)和收发信机前端电流幅值(测点 2)最高; 高频时, 测点 1 和测点 2 的电流幅值最小。

图 5(a)和图 5(b)分别为不同工作频率下测点 1 和测点 2 的典型电流波形。从图 5 中可以看出, 同一个监测电压下, 当短波通信设备工作在不同的频率下时, 传导回路负载可能发生变化。因此, 脉冲电流源输出的电流幅值不同, 测点 2 所示的电流幅值大小不同, 波形也发生了变化。

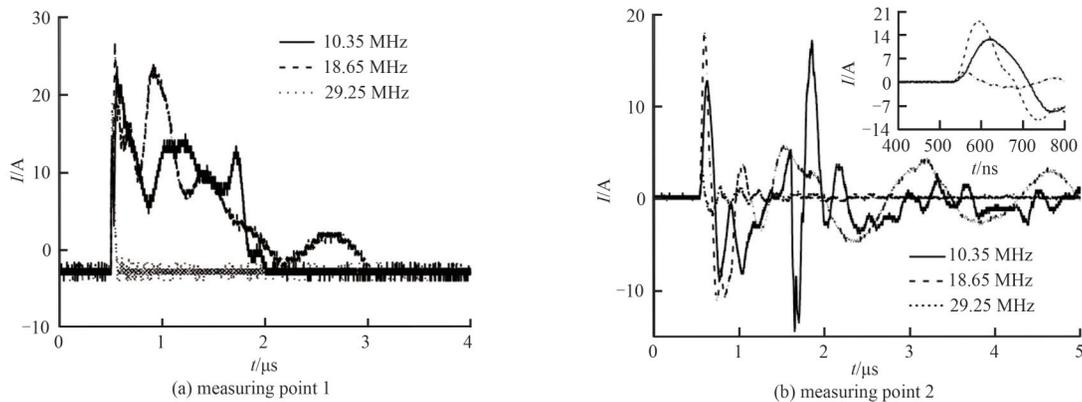


Fig.5 Typical current waveform of measuring points at different frequencies

图 5 不同工作频率下各测点典型电流波形

### 2.2 不同工作状态下短波天线端口的 PCI 实验

参照图 2 所示的装置, 展开短波通信设备在不同工作状态下, 短波天线端口的 PCI 实验。主要研究短波通信设备在发射和接收两种不同工作状态下对短波天线端口的敏感度是否有影响, 实验结果数据见表 2。

图 6 为监测电压为 5.5 kV, 短波通信设备工作频率为 2 MHz 时, 接收和发射状态下各测点的典型电流波形。从图中可以看出, 短波通信设备在接收状态下, 脉冲源输出电流幅值为 98 A, 收发信机前端电流幅值为 4 A; 短波通信设备在发射状态下, 脉冲源输出电流幅值为 80 A, 收发信机前端的电流幅值为 23 A。

图 7 为监测电压为 5.5 kV, 短波通信设备工作频率为 16 MHz 时, 接收和发射状态下各测点的典型电流波形。从图中可以看到, 短波通信设备在接收状态下, 脉冲源输出电流幅值为 98 A, 收发信机前端的电流幅值为 10 A; 短波通信设备在发射状态下, 脉冲源输出电流幅值为 80 A, 收发信机前端的电流幅值为 23 A。

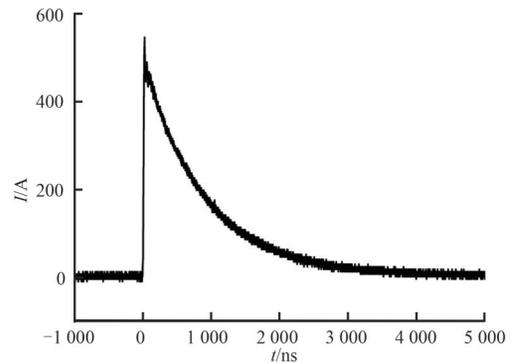


Fig.4 Output waveform of pulse current injection device

图 4 脉冲电流注入装置输出波形

表2 不同工作状态下各测点电流值  
Table 2 Current value of each measuring point in different working states

| monitoring voltage/kV | frequency/MHz | state        | current of measuring point 1/A | current of measuring point 2/A |
|-----------------------|---------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 5.5                   | 2             | receiving    | 98                             | 4                              |
|                       |               | transmitting | 80                             | 23                             |
|                       | 16            | receiving    | 98                             | 10                             |
|                       |               | transmitting | 80                             | 23                             |
|                       | 30            | receiving    | 87                             | 22                             |
|                       |               | transmitting | 80                             | 24                             |

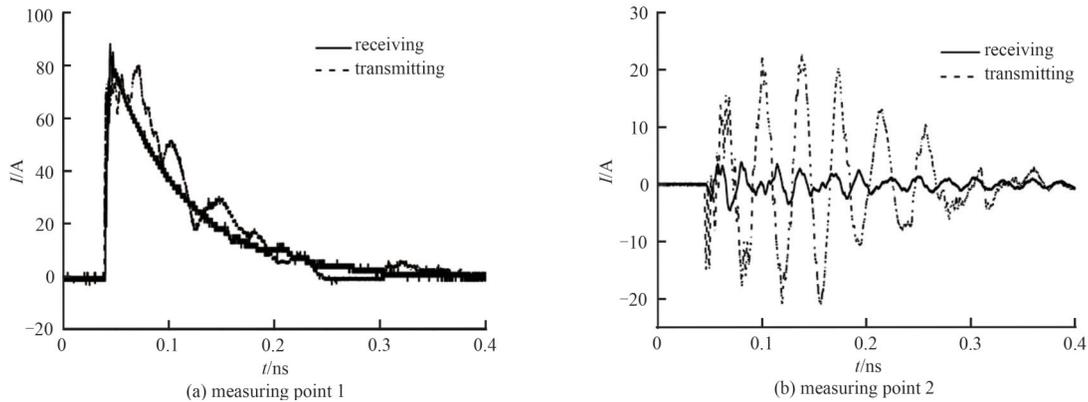


Fig.6 Typical current waveform of each measuring point in different working states at 2 MHz  
图6 2 MHz时不同工作状态下各测点典型电流波形

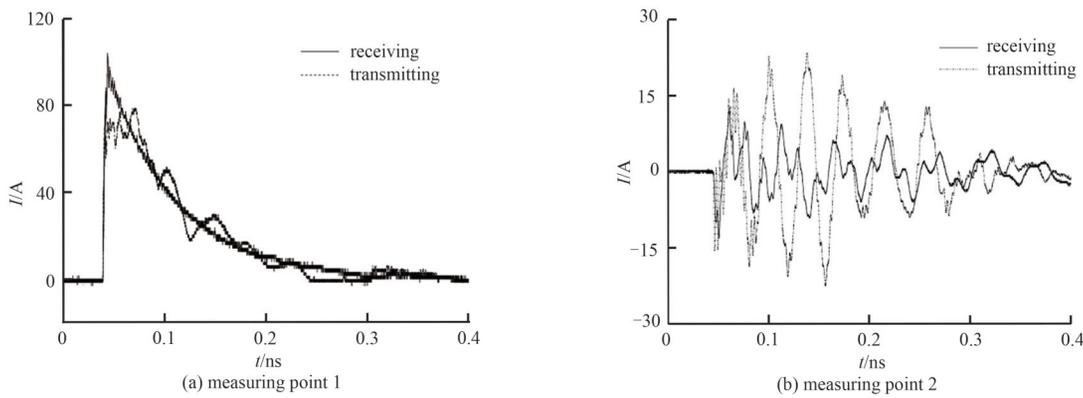


Fig.7 Typical current waveform of each measuring point in different working states at 16 MHz  
图7 16 MHz时不同工作状态下各测点典型电流波形

以上分析可得，短波通信设备在不同的工作状态下，可能会导致传导回路参数不同。因此，在监测电压相同条件下，脉冲源输出电流幅值大小不同，收发信机前端的电流幅值差距较大。另外还观察到，监测电压相同的情况下，短波通信设备在同一工作状态下，测点1的电流幅值大小相同，不随工作频率发生变化；但短波通信设备在接收状态时，测点2的电流幅值不同，可能是因为接收状态时，传导回路参数差异较大。

### 3 防护器性能测试实验

#### 3.1 防护器离线性能测试实验

实验装置如图8所示，主要包括：脉冲电流注入源、测试防护器、负载(一般阻抗为 50 Ω)、电流监测与记录系统。该实验包括 2 个测点，分别为脉冲源输出电流(测点3)、防护器后残余电流(测点4)。

首先，按照图8所示实验装置，对实验中所用的收发信机防护器进行离线状态下的防护性能测试。实验中，脉冲源加压为 0.5 kV 时，防护器未动作，防护器支路处于高阻状态，脉冲源输出的电流流经负载支路，测点3的电流幅值为 6 A 左右，测点4的电流幅值和测点3基本相同，典型电流波形如图9(a)所示；继续加压至 1.5 kV 时，脉冲源端输出电流幅值

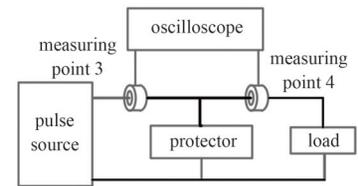


Fig.8 Device of protection performance test  
图8 防护器防护性能测试实验装置

增大, 防护器动作, 此时防护器支路处于短路状态, 测点 3 的电流幅值为 24 A 左右, 注入电流大部分流经防护器支路泄放掉, 残余电流幅值约为 12 A 左右, 动作后典型电流波形如图 9(b)所示。

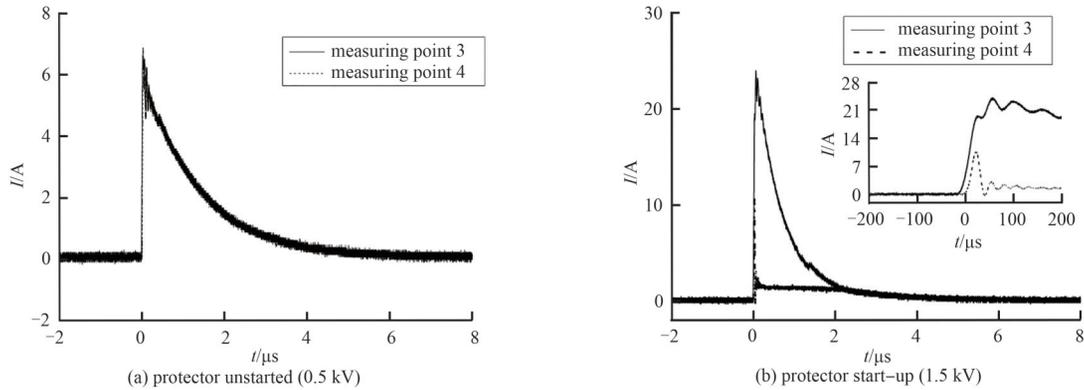


Fig.9 Typical current waveform for performance test of protector in off-line state

图9 防护器离线状态下性能测试典型电流波形

### 3.2 防护器在线性能测试实验装置

参照图 2 所示的装置示意图, 进行防护器在线状态下防护性能测试实验。实验中脉冲源加压 1.5 kV 时, 测点 1 的电流幅值为 20 A 左右, 测点 2 的电流幅值约为 8 A, 典型电流波形如图 10 所示。

从图 10 可以看出, 防护器在线状态下, 由于传导回路负载发生了变化, 因此测点 1 和测点 2 的电流波形都发生了变化。另外, 对比图 10 和图 9(b)中测点 3 的典型电流波形可以看出, 当防护器动作时, 离线状态下的防护器启动时间约为 10 ns, 作用时间约为 150 ns; 而在线状态下的防护器启动时间约为 25 ns, 作用时间大于 150 ns。因此, 可以得出, 在相同的监测电压下, 离线状态下的防护效果优于在线状态下的防护效果。

通过以上实验结果可以得到, 由于在实际应用中, 防护器后端连接的端口负载更为复杂, 导致防护器在离线测试和在线测试时存在性能上的差异。因此, 在实际对防护器的性能测试时, 不能仅进行离线测试, 还需考虑典型应用状态下影响防护性能参数的主要因素, 全面衡量防护器的防护性能。

## 4 结论

本文基于接触式注入的 PCI 实验方法, 设计了端口接触式注入的实验装置, 对短波通信设备工作在发射和接收两种不同工作状态、不同工作频段对注入电流的影响进行了分析研究。结果表明, 短波通信设备在不同工作状态下, 传导回路参数发生变化, 导致了 PCI 幅值不同。另外, 设计了防护器防护性能测试装置, 研究了天线端口防护器在离线状态和在线状态下的性能差异, 明确了防护器综合性能测试的重要性, 为后续短波天线端口的抗电磁脉冲干扰的性能试验提供了可靠依据。

### 参考文献:

- [1] GIRI D V, HOAD R, SABATH F. High-power electromagnetic effects on electronic systems[M]. London: Artech, 2020:20-30.
- [2] 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):396-403. doi:10.1109/TEMC.2004.831814.
- [3] 李宝忠, 何金良, 周辉, 等. 电磁脉冲在传输线上激励电流规律研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010,8(1):36-40. (LI Baozhong, HE Jinliang, ZHOU Hui, et al. Study about induced current law by EMP on transmission line[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2010,8(1):36-40.)
- [4] 杜传报, 毛从光, 崔志同, 等. 无线通信系统 HEMP 性能降级效应研究[J]. 现代应用物理, 2022,13(3):109-115. (DU Chuanbao, MAO Congguang, CUI Zhitong, et al. Performance degradation effect of wireless communication system in HEMP environment[J].

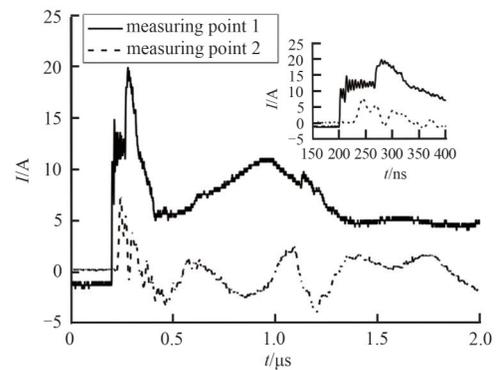


Fig.10 Typical current waveform for performance test of protector in online state(1.5 kV)

图10 防护器在线状态下性能测试典型电流波形(1.5 kV)

- Modern Applied Physics, 2022,13(3):109–115.) doi:10.12061/j.issn.2095–6223.2022.030502.
- [ 5 ] U.S. Department of Defense. High–altitude EMP protection for transportable systems:MIL–STD–188–125–2[S]. 1999.
- [ 6 ] 段泽民,朱博,仇善良,等. 螺旋天线电磁脉冲响应特性研究[J]. 传感器与微系统, 2018,37(1):87–90,95. (DUAN Zemin,ZHU Bo, QIU Shanliang, et al. Research on response characteristics of helical antenna exposed to electromagnetic pulse[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018,37(1):87–90,95.) doi:10.13873/J.1000–9787(2018) 01–0087–04.
- [ 7 ] 赵守俊,王华力,白冬林. 应用FDTD分析飞行器天线HEMP响应[J]. 军事通信技术, 2007,28(2):16–18,26. (ZHAO Shoujun, WANG Huali, BAI Donglin. Analysis of response to HEMP of antennas on aircraft by FDTD[J]. Journal of Military Communications Technology, 2007,28(2):16–18,26.)
- [ 8 ] 吴刚,乐波,杨雨枫,等. 短波接收天线系统核电磁脉冲注入试验[J]. 强激光与粒子束, 2019,31(9):75–83. (WU Gang,YUE Bo, YANG Yufeng, et al. High–altitude electromagnetic pulse survivability test study on shortwave receiving antenna system by pulsed current injection[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019,31(9):75–83.) doi: 10.11884/HPLPB201931.190159.
- [ 9 ] 毛从光,程引会,谢彦召. 高空电磁脉冲技术基础[M]. 北京:科学出版社, 2019. (MAO Congguang,CHENG Yinwei,XIE Yanzhao. Fundamentals of high altitude electromagnetic pulse technology[M]. Beijing:Science Press, 2019.)
- [10] 冀鑫炜,田锦,孙珊珊,等. 地面雷达系统强电磁脉冲防护分析[J]. 现代雷达, 2018,40(7):23–26. (JI Xinwei,TIAN Jin,SUN Shanshan, et al. Analysis of high intensity electromagnetic pulse protection for ground radar system[J]. Modern Radar, 2018, 40(7):23–26.) doi:10.16592/j.cnki.1004–7859.2018.07.006.
- [11] 何小东,王哲,吴昊,等. 超短波通信系统的强电磁脉冲耦合分析及防护研究[J]. 通信技术, 2020,53(6):1538–1545. (HE Xiaodong, WANG Zhe, WU Hao, et al. Analysis and protection of strong EMP coupling in VHF communication system[J]. Communications Technology, 2020,53(6):1538–1545.) doi:10.3969/j.issn.1002–0802.2020.06.036.
- [12] 胡晓,邱扬,田锦. 车载单极天线的电磁脉冲响应特性[J]. 强激光与粒子束, 2018,30(3):42–47. (HU Xiao,QIU Yang,TIAN Jin. Response characteristics of vehicle monopole antenna exposed to electromagnetic pulse[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018,30(3):42–47.) doi:10.11884/HPLPB201830.170177.
- [13] 王伟. 车载多天线耦合效应及天线布局研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019. (WANG Wei. Study on coupling effect and layout of vehicular multi–antennas[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2019.) doi:10.7666/d.D01905596.
- [14] 陈向跃,孙蓓云,聂鑫,等. 接触式方波电流注入方法研究[J]. 核电子学与探测, 2010,30(4):549–551. (CHEN Xiangyue,SUN Beiyun,NIE Xin, et al. The study of contacted square current injection[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, 30(4):549–551.) doi:10.3969/j.issn.0258–0934.2010.04.025.
- [15] 崔志同,毛从光,孙蓓云,等. LDO稳压器电磁脉冲损伤阈值试验研究[J]. 微电子学, 2013,43(3):423–425. (CUI Zhitong,MAO Congguang,SUN Beiyun, et al. Damage threshold characterization of LDO regulator for EMP interference[J]. Microelectronics, 2013,43(3):423–425.) doi:10.3969/j.issn.1004–3365.2013.03.028.
- [16] (美)怀特. 微波半导体控制电路[M]. 北京:科学出版社, 1983:179–183. (WHITE J F. Microwave semiconductor control circuit[M]. Beijing:Science Press, 1983:179–183.)
- [17] 刘国靖,刘国治,潘泉,等. 高功率微波短脉冲雷达接收机保护装置设计[J]. 西安电子科技大学学报, 2002(2):236–240. (LIU Guojing, LIU Guozhi, PAN Quan, et al. The fundamental design of HPM short–pulse radar receiver protectors[J]. Journal of Xidian University, 2002(2):236–240.) doi:10.3969/j.issn.1001–2400.2002.02.021.

#### 作者简介:

**董亚运**(1990–), 女, 硕士, 工程师, 从事强电磁脉冲效应、传导试验技术方面的工作. email:dongyayun@nint.ac.cn.

**崔志同**(1981–), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为强电磁脉冲效应、传导试验技术.

**杜传报**(1987–), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为强电磁脉冲效应、传导试验技术.

**聂鑫**(1977–), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为强电磁脉冲效应、传导试验技术.

**刘逸飞**(1985–), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为电磁脉冲效应与混响室技术.

**王文卓**(1992–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电磁兼容与防护.

**郑生全**(1970–), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为舰船强电磁脉冲防护设计、舰船电磁兼容性设计和电磁环境效应.