

# 基于短波通信的射频前端电磁脉冲防护 模块仿真与设计

李亚南<sup>1</sup>, 谭志良<sup>1</sup>, 彭长振<sup>2</sup>

(1. 陆军工程大学静电与电磁防护研究所, 河北石家庄 050003; 2. 北方自动控制技术研究所, 山西太原 030006)

**摘 要:** 随着通信系统面临的电磁工作环境越来越严峻, 高功率容量、低插损、快响应时间的电磁脉冲防护模块对其射频前端电路的保护越发的重要起来. 本文主要基于 PIN 二极管射频限幅的原理, 构建了 PIN 二极管的时域等效电路模型, 利用去嵌入阻抗场计算方法提取相应电路的 S 参数, 优化设计匹配网络, 并采用无源多级 PIN 二极管结构, 设计了一个工作于 0 ~ 200MHz, 插入损耗小于 0.15dB, 驻波比小于 1.4dB, 响应时间小于 1ns 的短波通信电磁脉冲防护模块. 结合 PIN 二极管时域等效电路模型, 利用先进设计系统 (Advanced Design System, ADS) 仿真软件对电磁脉冲防护模块限幅性能进行仿真, 并对加工出来的电磁脉冲防护模块进行了测试, 结果验证了各项指标满足要求.

**关键词:** PIN 二极管; 防护模块; ADS; 插入损耗

**中图分类号:** TM937

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2018)06-1421-07

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

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.06.022

## Simulation and Design of RF Front End Electromagnetic Protection Module Based on HF Communication

LI Ya-nan<sup>1</sup>, TAN Zhi-liang<sup>1</sup>, PENG Chang-zhen<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Army Engineering University, Shijiazhuang, Hebei 050003, China;

2. CNGC North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract:** With the increasing threat of extremely difficult environment of communication system, the electromagnetic pulse protection module which has the characteristics of high power capacity, high isolation, low insertion loss and fast response time is becoming increasingly important. In this paper, the principle of radio frequency limiting of PIN is studied, and the structure of passive multistage PIN diode is adopted. Through the establishment of its field simulation model, the corresponding S parameters are extracted, and the optimal matching network is optimized. The electromagnetic pulse protection module which works at 0 ~ 200MHz has insertion loss of less than 0.15dB, the voltage standing wave ratio (VSWR) of less than 1.4, response time of less than 1ns is designed. Combined with self-built PIN diode model, ADS simulation software is used to simulate the limiting performance of electromagnetic pulse protection module. The result shows that all the indexes meet the requirements.

**Key words:** PIN diode; limiter; ADS; insertion loss

### 1 引言

随着电磁脉冲武器的实用化, 高功率微波武器逐步出现在现代战争中, 其瞬间释放的高强度、超宽谱的电磁脉冲能量将会破坏敏感电子设备, 导致通信系统内部射频前端模块中的半导体器件和电路的损坏<sup>[1]</sup>. 收发机作为发射和接收电磁能量的主通道, 接收电磁脉冲能量强、效率高, 是电子设备首要保护的對象<sup>[2-4]</sup>. 射频前端电磁脉冲防护模块作为天线和接收机之间的

限幅控制元件<sup>[5]</sup>, 对于保护接收机等敏感电路不被强电磁脉冲损坏有着至关重要的作用. 目前关于短波通信系统射频前端电磁防护的研究日趋多样, 文献[6, 7]对带通滤波和浪涌保护器组合的复合型电磁防护模块进行了仿真和测试试验. 文献[8]利用微带电路进行了无源检波和主动式的限幅器设计, 并提出了性能测试的实验平台.

目前射频前端电磁脉冲防护模块在响应时间、结电容以及承受功率等性能上仍然存在矛盾, 难以满足

新时期高功率电磁脉冲防护工程的需求,譬如响应速度快、功率容量高、限幅电平低等要求<sup>[9]</sup>. 本文从防护模块电路设计方面入手,结合 PIN 二极管插入损耗小、承受功率容量大的特点,通过分析影响 PIN 二极管限幅性能的因素,研究了响应速度快、峰值耐受功率高的射频前端电磁脉冲防护原理,设计了一款 PIN 二极管限幅防护模块,该限幅防护模块针对通信电台高能尖峰脉冲能量进行防护,能够较好的满足工程需求.

## 2 PIN 型二极管模型

在射频前端防护电路设计中, PIN 二极管模型的准确性对于其限幅特性仿真极其关键<sup>[10,11]</sup>. 目前已有的 PIN 二极管都是采用比较理想的 PSpice 模型,难以准确反映 PIN 二极管的正向导通和反向截止特性,需要对 PIN 二极管模型进行改进以满足性能仿真需求.

PIN 二极管的 P 区和 N 区之间夹有一层本征半导体区,也称 I 层 (intrinsic region),该半导体区对 PIN 二极管的特性有着重要影响. 根据二极管电荷控制方程, PIN 二极管 I 层电荷存储量  $q_0(t)$  与二极管电流  $i(t)$  之间存在如下关系:

$$\frac{dq_0(t)}{dt} + \frac{q_0(t)}{\tau} = i(t) \quad (1)$$

在大功率注入情况下, I 层载流子浓度分布由下面的双极扩散方程<sup>[12,13]</sup> 决定:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{p}{L_\alpha^2} + \frac{1}{D_\alpha} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2)$$

通过对式(2)进行拉普拉斯变换以及 Pade 逼近理论<sup>[14]</sup>可以得到 PIN 二极管电流双极注入分量的关系式:

$$I_1(s) = \frac{Q_0(s)}{\tau} \frac{1}{1+s\tau} + \frac{1}{(3/T_0) + \frac{1}{\frac{5}{1+s\tau} + \frac{1}{(7/T_0) + \dots}}} \quad (3)$$

式中,  $Q_0(s)$  为 I 层存储电荷  $q_0(t)$  拉普拉斯变换;  $I_1(s)$  为二极管双极注入电流  $i_1(t)$  的拉普拉斯变换,可认为是由电压源  $\frac{Q_0(s)}{\tau}$  作用于  $s$  域导纳  $G(s)$  产生的回路电流;  $T_0 = x_m^2/D_\alpha$ ,  $\tau$  为载流子寿命,  $D_\alpha$  为双极扩散常数.

二极管空穴浓度  $q_0(t)$  和结压降  $v_j(t)$  之间存在以下关系:

$$\frac{q_0(t)}{\tau} = I_s \left[ \exp\left(\frac{v_j(t)}{NV_T}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

$I_s$  表示二极管饱和电流,  $N$  表示发射系数,均为常数,  $V_T$  表示热电压. 在电压  $v_j(t)$  作用于二极管  $D_j$  时,产生的

电流  $i_j(t) = I_s \left[ \exp\left(\frac{v_j(t)}{NV_T}\right) - 1 \right] = \frac{q_0(t)}{\tau}$ , 因此 PIN 二极管基区电流分量可表示为:

$$i_2(t) = \frac{i_j(t)^2}{I_E} = \left[ \frac{q_0(t)}{\tau} \right]^2 \frac{1}{I_E} \quad (5)$$

$I_E$  为常数等于 10

式(3)和式(5)分别描述了 PIN 二极管电流双极注入分量和基区复合分量. 在此基础上,将两个电流分量用时域等效电路表示,串联后得到 PIN 二极管电流的综合等效电路,如图 1(a)所示. 完整的 PIN 二极管还包括 PN 结的理想二极管模型、结电容等参数<sup>[15]</sup>,其中图 1(b)描述了 PIN 二极管管芯的串联结构形式,包括 I 层等效电路以及 PN 结等效电路;图 1(c)和图 1(a)与图 1(b)中的 PN 结等效电路相结合,共同描述了 PIN 二极管电流和 PN 结压降之间的关系.

表 1 为 Si PIN 二极管 UMX5601 的部分电性能参数. 根据该型 PIN 二极管的参数,建立 ADS 子电路模型. 该型二极管的 I 层介电常数为 11.9,在大信号时电导率为  $1.75 \times 10^2 \text{ S/m}$ ,通过去嵌入阻抗场计算方法<sup>[16]</sup>,得到二极管 S 参数文件,根据等效电路模型,通过拟合 S 参数幅度和相位曲线,获得二极管的等效寄生集总参数数值,串联电阻  $R_s$  为  $0.3 \Omega$ 、电容  $C_T$  为  $2.6 \text{ pF}$ .

表 1 UMX5601 的电性能参数

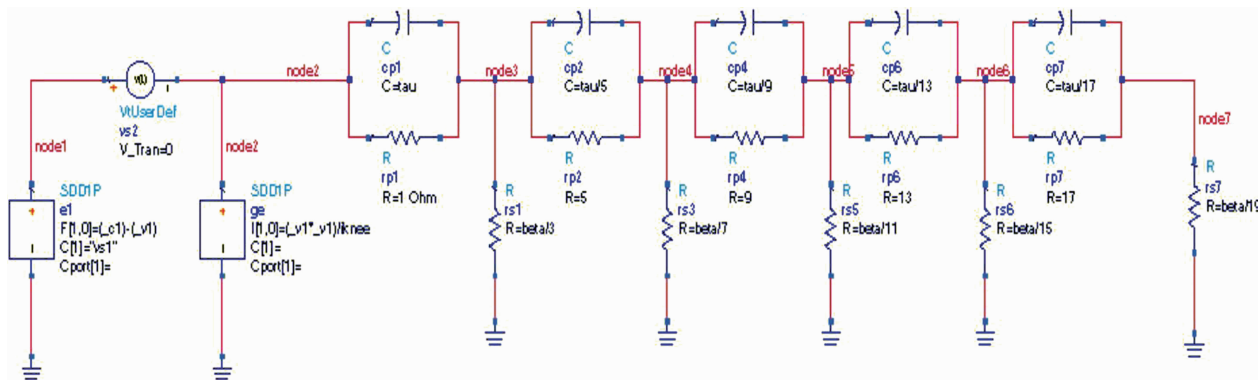
前向电压 $V_f$ :1V	可重复峰值反向电压 $V_{RRM}$ :100V
反向击穿电压 $V_{BR}$ :100V	工作峰值反向电压 $V_{RWM}$ :100V
载流子寿命 $\tau$ :10 $\mu$ s	直流阻断电压 $V_R$ :100V
电感 $L_s$ :900pH	并联电阻 $R_p$ :9k $\Omega$

利用图 1 模型通过 ADS 仿真得到 PIN 二极管模型的正向直流伏安曲线特性,如图 2(a)所示. 对比厂家数据手册提供的曲线,可以发现 PIN 二极管 ADS 子电路模型能够比较准确的拟合实际生产的 PIN 二极管伏安特性.

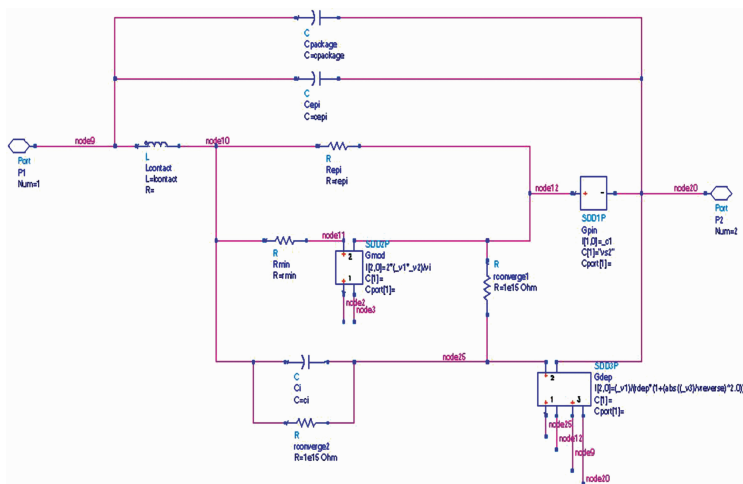
## 3 防护模块工作原理与设计方案

该电磁脉冲防护模块选用低结电容限幅二极管管芯,采用无源多级 PIN 二极管结构,根据 PIN 二极管耐受残压的不同,采用多个不同防护等级的管芯进行优化组合. 当二极管在大信号情况下时,二极管可当做几欧姆量级的电阻,信号近似全反射,实现限幅的效果.

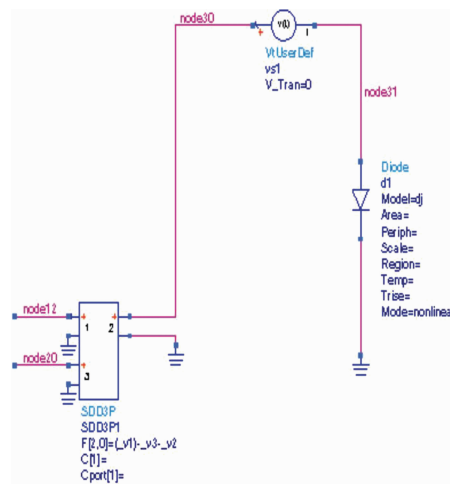
一般来说, PIN 二极管 I 层越厚反向击穿电压越高. 通过采用不同 I 层厚度的 PIN 二极管级联,构成宽带低通滤波器,可以有效降低限幅输出电平,提高防护模块的功率容量. 前级可以采用 I 层较厚的 PIN 管,以承受较大的功率,后级 I 层厚度递减,使限幅门限降低.



(a)

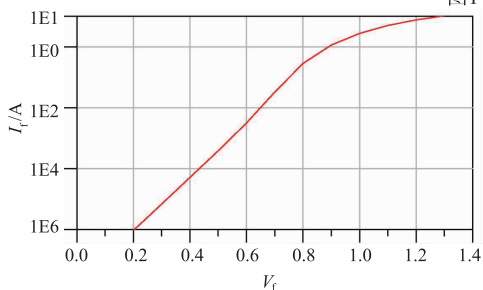


(b)

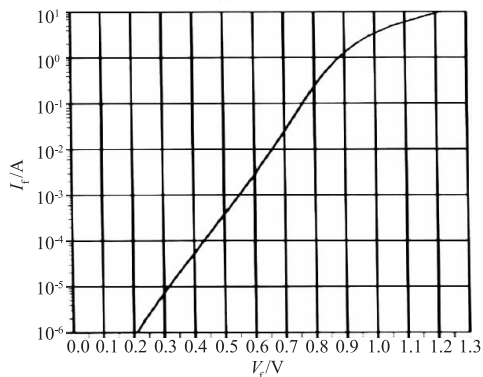


(c)

图1 PIN二极管的ADS电路模型



(a) ADS仿真



(b) 数据手册

图2 PIN二极管的正向伏安曲线

根据限幅器件的输入功率不同,防护的等级也不同,电磁脉冲防护模块中采用五级防护器件.图3为防护模块的多级防护示意图.为避免强电磁脉冲泄露通过,防护模块还应衔接好各级器件的起限电压.

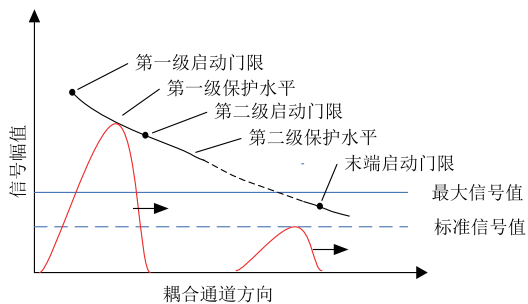


图3 防护模块多级防护示意图

为衔接各级器件的起限电压、承受数千伏电压冲击、获取小的限幅电平,防护模块前两级采用第一防护等级的PIN二极管,最大反偏电压为1000V;中间两级第二防护等级的PIN二极管,最大反偏电压分别为500V和100V;最后一级采用限幅电压较低的限幅二极管,启动门限低于设备最大承受信号值,

高于标准信号值,同时保证其单独起限时不会因过载而损毁.

为优化防护模块的信号插损和驻波,在 ADS 电路仿真软件中,采用 S 参数仿真器优化设计器件间的配合网络.同时,每级之间采用介质基片的微带线,作为延迟线来减缓脉冲尖峰的传输时间,达到极间匹配的目的.

### 4 强电磁脉冲防护模块仿真

利用 ADS 软件对所要求的指标进行仿真和优化设

计,防护模块仿真原理图及仿真结果如下图 4 所示.

在 50Ω 匹配条件下,通过 ADS 软件进行小信号仿真,其驻波比(VSWR)和正向传输系数 S21 如图 5 所示.

从图中可以看出,在 1~200MHz 的短波频段内,驻波比小于 1.2,具有很小的反射系数;S21 插损在频带内保持在 -0.042dB 以上,具有良好的信号传输性能.

当信号源产生幅值 4kV,上升沿和下降沿均为 1ns,脉宽为 10ns 的方波脉冲时,防护电路输入端和各级输出电压响应如图 6 所示.

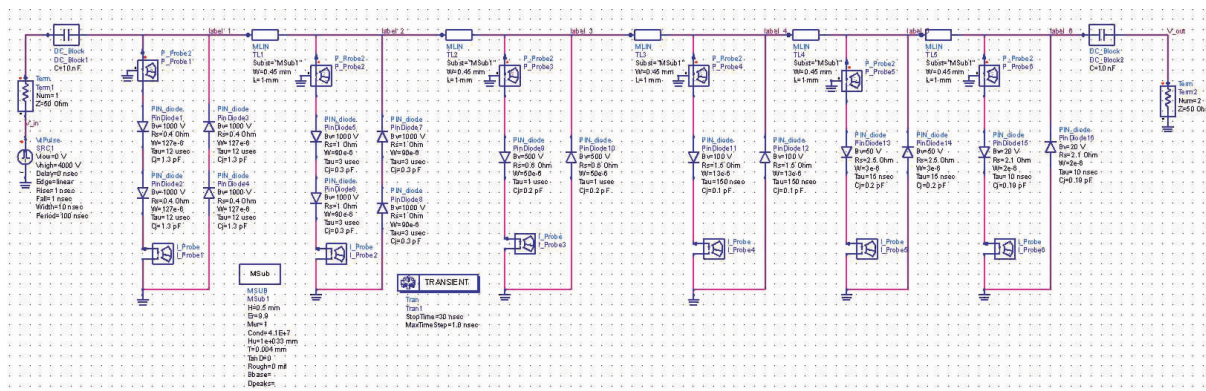


图4 防护模块仿真原理图

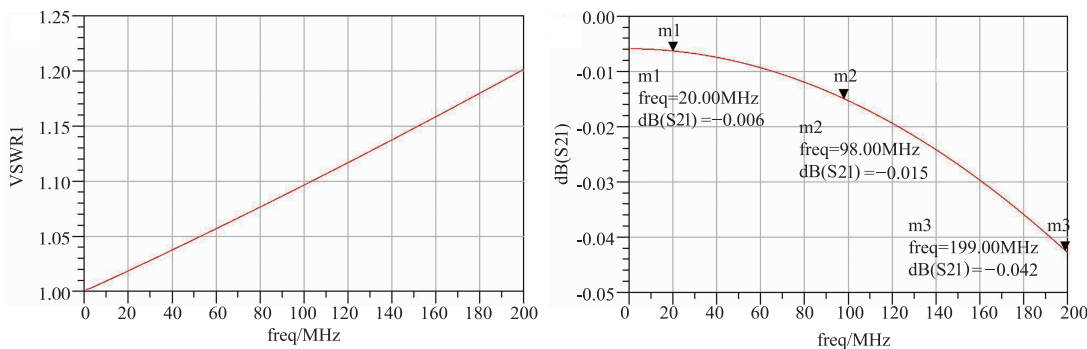


图5 导通时驻波比和插入损耗仿真图

从仿真结果中可以看到防护模块的 3 个响应过程:尖峰泄露、平顶泄露和反向脉冲.通过对防护模块注入 4000V 方波脉冲信号,可以发现:防护模块后级响应迅速,先行导通;前级输出了一个幅度小于 200V 的尖峰泄露电压,承受了较大的脉冲冲击电压.经过多级的层层降压,防护模块在小于 1ns 的时间内将尖峰泄露电压控制在 30V 以下,对后级的电路起到了良好的保护作用.

### 5 防护模块加工测试

为了更好的方便管子的安装和电路的调整,这里采用了 Rogers5880 的板材.每个等级之间采用介质基片的微带线,作为延迟线来减缓脉冲尖峰的传输时间,达到极间匹配的目的.由于板材等因素影响,芯片与微带线的互联采用引线键合技术,大大降低了高频下的寄生效应和延迟效应,提高了射频性能.防护模块实物如图 7 所示.

首先进行了通带内插入损耗测试.利用安捷伦 N5230A 型矢量网络分析仪对该防护模块的传输特性进行测试,测得的防护模块小信号插损如图 8.可以看出,在 1~200MHz 的频段内,该防护模块的插入损耗维持在较小范围内,最大值约为 0.153dB,对于短波通信设备正常信号的影响比较小.

为了测试限幅器对强电磁脉冲的防护性能,对该防护模块进行方波注入测试实验,注入的方波脉冲电压为 4000V、脉宽 1us、周期 16ms、上升沿小于 1ns,方波脉冲和防护模块限幅输出端的电压波形如图 9 所示.

从图 9 可以看出:该防护模块通过层层降压,能将尖峰泄露电压控制在 25V 以内,起到了较好的限幅作用;响应时间小于 1ns,具有较快的反应速度.

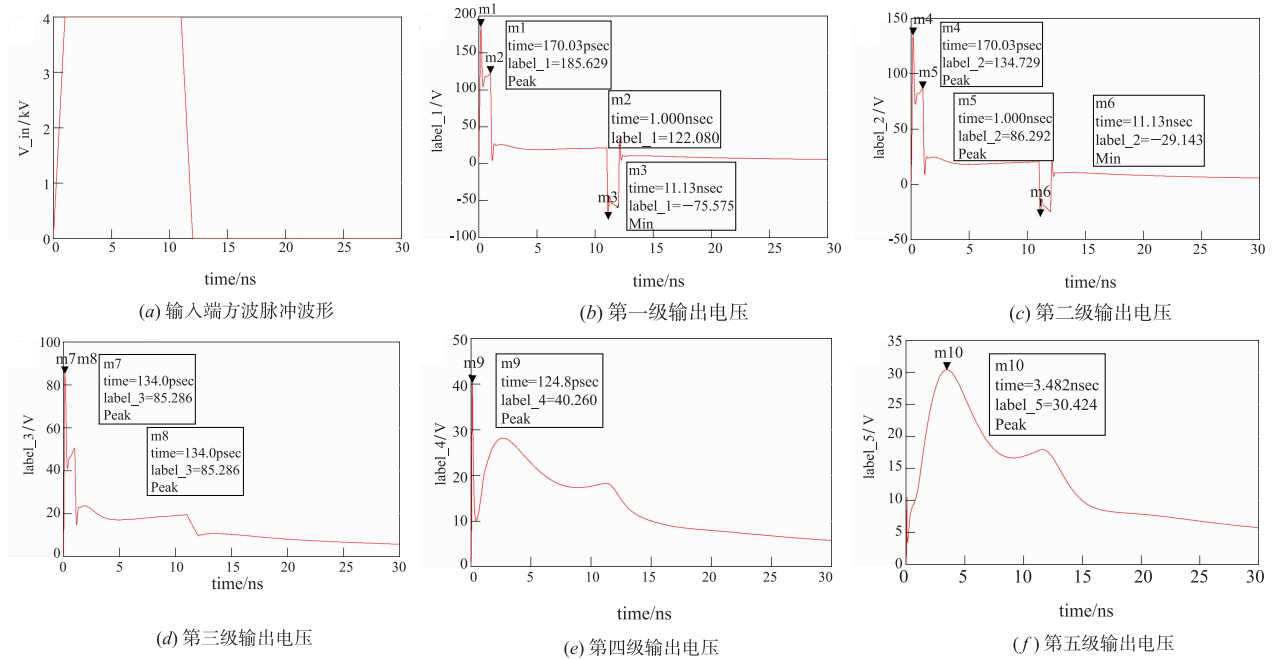


图6 限幅器仿真结果



图7 防护模块实物图

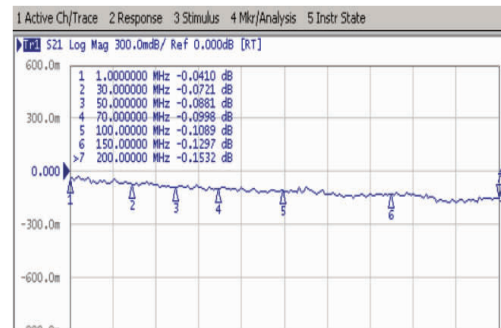
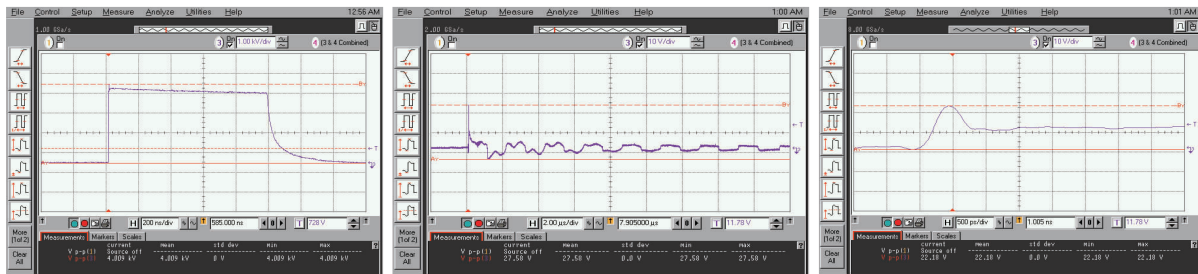


图8 防护模块插入损耗测试图



(a) 方波脉冲电压波形

(b) 防护模块输出电压波形

(c) 尖峰泄露波形

图9 快沿方波脉冲的限幅波形图

对比 ADS 仿真结果,防护模块的插入损耗要比仿真结果偏大.通过测试结果可以看出,针对射频端口能量防护而设计的射频前端强电磁脉冲限幅模块能够对快沿方波脉冲进行有效抑制,具有射频前端强电磁脉冲防护的能力,其结果满足性能指标.

### 6 结论

本文设计了一种工作于 0 ~ 200MHz 频带,基于短波通信接收设备射频前端的防护模块.为实现低插损、大容量特性,该防护模块采用多级 PIN 二极管管芯并联构成宽带低通滤波网络,根据 PIN 二极管耐受残压

的不同,采用多个不同防护等级的管芯进行优化组合.通过建立 PIN 二极管的时域等效电路模型,利用去嵌入阻抗场法提取电路  $S$  参数,优化了级间匹配网络.该防护模块响应速度快,具有小功率信号低损耗直通、大功率信号大衰减限幅的良好性能,有着良好的射频前端电磁脉冲防护性能.

#### 参考文献

- [1] 孙国至,刘尚合,陈京平,等. 战场电磁环境效应对信息化战争的影响[J]. 军事运筹与系统工程,2006,20(3): 43-47.  
SUN Guozhi, LIU Shanghe, CHEN Jingping, et al. Influence of battlefield electromagnetic environment effect on Information Warfare[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2006, 20(3): 43-47. (in Chinese)
- [2] 怀特. 微波半导体控制电路[M]. 王晦光,译. 北京: 科学出版社,1983. 179-183.
- [3] 刘国靖,刘国至,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,2002,29(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, 29(2): 236-240. (in Chinese)
- [4] 朱长青,刘尚合,魏明. ESD 辐射场测试研究[J]. 电子学报,2005,33(9):1702-1705.  
ZHU Chang-qing, LIU Shang-he, WEI Ming. A study on test & measurement of the radiated field by ESD[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1702-1705. (in Chinese)
- [5] 陈盘训. 半导体器件和集成电路的辐射效应[M]. 北京: 国防工业出版社,2005. 328-333.
- [6] 张忠连. 超短波通信系统射频前端电磁防护技术研究[D]. 成都: 电子科技大学,2009. 34-39.  
ZHANG Zhonglian. Study on RF electromagnetic protection technology of ultra short wave communication system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. 34-39. (in Chinese)
- [7] 颜克文. 短波通信设备电磁防护技术研究[D]. 成都: 电子科技大学,2009. 43-51.  
YAN Ke wen. Research on electromagnetic protection technology of short wave communication equipment [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. 43-51. (in Chinese)
- [8] 张海伟,史小卫,徐乐,等. 高功率 PIN 限幅器设计及测试方案[J]. 强激光与粒子束,2011,23(11):3029-3031.  
ZHANG Haiwei, SHI Xiaowei, XU Le, et al. High power PIN limiter design and test plan[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(11): 3029-3031. (in Chinese)
- [9] 郑生全,邓峰,王冬冬,等. 电子设备和系统射频通道高功率微波电磁脉冲场-路综合防护方法综述[J]. 中国舰船研究,2015,10(2):7-13.  
ZHENG Shengquan, DENG Feng, WANG Dongdong, et al. Overview of the HPM field-circuit integrated protection methods for electronic equipment and system RF-channel [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(2): 7-14. (in Chinese)
- [10] 金杰,冯军,盛志伟,等. 0.18 微米 CMOS 10Gb/s 光接收机限幅放大器[J]. 电子学报,2004,32(8):1393-1395.  
JIN Jie, FENG Jun, SHENG Zhi-wei, et al. 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS limiting amplifier for 10Gb/s optical receiver[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(8): 1393-1395. (in Chinese)
- [11] Strollo G M. A new SPICE model of power P-I-N diode based on asymptotic waveform evaluation[J]. Power Electronics, IEEE Transaction on, 1997, 12(1):12-20.
- [12] Caverly R H, Drozdovski N V, Drozdovskaia L M. SPICE modeling of microwave and RF control diodes[A]. Proceedings of the Circuits and Systems, Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on[C]. Lansing, USA: IEEE, 2000. 28-31.
- [13] Caverly R H, Quinn M J. Time domain modeling of PIN control and limiter diodes[J]. IEEE MTT-S Digest, 1999, 1(6):719-722.
- [14] Menutt T R, Hefner A R, Mantooth H A, et al. Silicon carbide PiN and merged PiN Schottky power diode models implemented in the Saber circuit simulator[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2004, 19(3):573-581.
- [15] 汪海洋,李家胤,周翼鸿,等. PIN 限幅器 PSpice 模拟与实验研究[J]. 强激光与粒子束,2006,18(1):88-92.  
WANG Haiyang, LI Jiayin, ZHOU Yihong, et al. Experiment study and PSpice simulation of PIN diode research [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(1): 88-92. (in Chinese)
- [16] 姚常飞,周明,罗运生,等. 基于巴特沃斯低通滤波器的毫米波宽带低插损限幅器研究[J]. 电子学报,2013,41(9):1810-1814.  
YAO Chang-fei, ZHOU Ming, LUO Yun-sheng, et al. Research on millimeter wave broad-band and low insertion loss limiters based on butterworth low pass filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(9): 1810-1814. (in Chinese)

作者简介



**李亚南** 男,1988 年 11 月出生,河北石家庄人,现为军械工程学院博士研究生,主要研究方向为电磁脉冲理论与防护技术.  
E-mail:lynang@126.com



**彭长振** 男,1988 年 10 月出生,河北邢台人,现工作于北方自动控制技术研究所,主要研究方向为计算机建模与仿真技术研究.



**谭志良** 男,1964 年出生,湖南岳阳人,军械工程学院静电与电磁防护研究所教授,博士生导师,主要从事电磁兼容防护领域研究.