

多器件联合 L 波段强电磁脉冲防护 模块仿真设计

徐扬^{1,2}, 傅海涛¹, 轩辕韵佳¹, 张冲¹, 陈锐¹

(1.湖北省医疗器械质量监督检验研究院, 武汉 430075; 2.华中科技大学, 武汉 430074)

摘要: 目的 设计针对 L 波段射频前端敏感器件的强电磁脉冲防护模块, 利用瞬态电压抑制二极管、气体放电管和发夹型微带带通滤波器进行联合仿真设计。方法 瞬态电压抑制二极管具有快速响应时间, 气体放电管具有高功率容量, 而微带带通滤波器可分离噪声信号, 并保留有效信号。通过结合这些器件进行防护设计, 可以充分发挥各自优势, 提高系统稳定性和强电磁脉冲防护能力。结果 该模块设计工作频段为 1.3~1.7 GHz, 带内插入损耗小于 1.5 dB, 在 70 dBm 功率注入的情况下, 防护效果可以达到 42.5 dB, 具有良好的防护效果。结论 通过分析研究不同器件的特性和优化设计, 实现了对 L 波段频谱的防护, 具有重要的实用价值和广阔的应用前景。

关键词: 强电磁脉冲防护; 瞬态电压抑制二极管; 气体放电管; 微带带通滤波器; 射频前端; 强电磁脉冲
中图分类号: TN973.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)04-0140-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.04.017

Simulation Design of Multi-device Joint Strong EMP Protection Module at L-band

XU Yang^{1,2}, FU Haitao¹, XUANYUAN Yunjia¹, ZHANG Chong¹, CHEN Rui¹

(1. Hubei Medical Devices Quality Supervision and Test Institute, Wuhan 430075, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

ABSTRACT: The work aims to design a strong EMP protection module for L-band RF front-end sensitive devices and carry out a joint simulation design with transient voltage suppression diodes, gas discharge tubes and hairpin microstrip bandpass filters. The transient voltage suppression diode had a fast response time, the gas discharge tube had a high power capacity, and the microstrip bandpass filter separated the noise signal and retained the active signal. By combining these devices in the protection design, their respective advantages were fully utilized to improve system stability and provide strong EMP protection. Through the design, the module worked in the frequency band of 1.3~1.7 GHz, the insertion loss was less than 1.5 dB in the working band, and the protection effect reached 42.5 dB under 70 dBm power injection, which indicated a good protection effect. By analyzing the characteristics of various devices and optimizing the design, the study achieves the protection of the L-band spectrum, which has important practical value and broad application prospects.

KEY WORDS: strong EMP protection; transient voltage suppression diodes; gas discharge tubes; microstrip bandpass filters; RF front-end; strong electromagnetic pulse

收稿日期: 2024-03-07; 修订日期: 2024-04-03

Received: 2024-03-07; Revised: 2024-04-03

引文格式: 徐扬, 傅海涛, 轩辕韵佳, 等. 多器件联合 L 波段强电磁脉冲防护模块仿真设计[J]. 装备环境工程, 2024, 21(4): 140-147.

XU Yang, FU Haitao, XUANYUAN Yunjia, et al. Simulation Design of Multi-device Joint Strong EMP Protection Module at L-band[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(4): 140-147.

射频系统及设备在强电磁脉冲环境下的生存能力面临巨大的困难和挑战, 强电磁脉冲能量的危害也时刻存在^[1-3]。强电磁脉冲根据频谱频段不同, 大致可划分为雷电 (Lightning)、高空核电磁脉冲 (HEMP)、高功率微波 (窄带和宽带, HPM、HIRF 和 UWB 等)。其中, 频谱分布达到 300 MHz 及以上的高空核电磁脉冲和高功率微波脉冲是射频电路系统面临的主要威胁^[4]。高功率微波峰值功率可达到 1 GW 甚至 10 GW 量级, 再通过天线定向辐射, 目标的峰值场强可以达到 1 kV/m 至 100 kV/m。强电磁脉冲能量通常会通过射频系统的前、后门耦合进入系统内部, 通过高热量、高电压、大电流等途径造成系统内部的敏感器件损伤。利用传统的屏蔽、接地、滤波等电磁脉冲防护技术的基本原理结合新型防护材料, 研究人员提出了多种新型防护方式^[5-7], 比如利用半导体器件 (瞬态电压抑制二极管以及 PIN 二极管) 进行限幅^[8], 或者利用放电管器件配合压敏电阻分压导流^[9]。但是, 单一器件的防护效果也因其特性不同而具有局限性。目前, 强电磁脉冲防护技术的主要设计难点在于在响应时间、结电容以及承受功率等不同性能之间的矛盾, 难以同时满足不同的性能要求。因此, 需要探索多器件联合进行防护的相关研究, 发挥不同器件各自的优势, 以获得更好的防护效果。

目前已有相关研究人员研究多器件联合防护。李祥超等^[10-11]分析了不同尺寸的同轴腔体浪涌保护器件在安装气体放电管时的特性, 结果表明, 随着冲击电压的增加, 气体放电管的响应时间随之减少, 但是同轴浪涌保护器的通流和残压也随之增加。张忠连^[12]提出了带通滤波器与瞬态防护器件相结合的电磁脉冲防护模块。徐黄飞等^[13]提出了气体放电管和半导体放电管配合性能的设计方法, 通过增加半导体放电管的退耦电阻阻值能降低气体放电管的动作电压, 缩短气体放电管的响应时间。牛春霞等^[14]基于有限元仿真研究了气体放电管与瞬态抑制二极管的能量配合方法, 提出将传统的 2.2Ω 退耦电阻换成 4Ω , 能有效降低防护电路的残压值, 形成最佳能量配合。郭稳^[15]利用不同防护器件组合, 并结合滤波电路, 实现了 LEMP 和 HEMP 共同防护模块的设计。毕景康^[16]提出了瞬态抑制器件与稳态滤波电路级联组合防护模块, 并基于此研制了超短波电台射频链路组合防护模块、网线组合防护模块、音频线组合防护模块。以上研究大部分是针对雷电等低频段电磁脉冲进行防护, 而少有针对更高频段的防护设计, 仍需进一步针对频谱更高的频段进行强电磁脉冲防护设计。对于更高频段的强电磁脉冲防护设计, 目前研究大多采用同一种防护器件的不同结构进行设计^[17-20]。受限于某些防护器件在高频段具有较大寄生电容的问题, 一些防护器件组合设计的防护模块, 适用频段最高上限为 L 波段。因此, 在高频段可以选取合适的防护器件进行联

合防护, 以达到更好的防护效果。

本文利用瞬态电压抑制二极管、气体放电管以及发夹型微带带通滤波器, 联合仿真设计针对 L 波段射频前端敏感器件的强电磁脉冲防护模块。瞬态电压抑制二极管具有快速的响应时间, 气体放电管具有高通流容量。微带带通滤波器是微波电路设计中常用的元件之一, 可以分离通带以外的噪声信号, 保留通带内的有效信号^[21]。瞬态电压抑制二极管和气体放电管一直以来是强电磁脉冲防护设计的常用器件, 各自具有不同的特性以及优势。结合以上器件进行防护设计, 不仅能发挥不同器件各自的优势, 也能使得整个系统更加稳定, 进一步提高模块的强电磁脉冲防护能力。因此, 该研究具有重要的实用意义和很好的应用前景。

1 电磁脉冲防护设计原理

1.1 瞬态电压抑制二极管防护特性

瞬态电压抑制二极管 (Transient Voltage Suppressor, TVS) 采用半导体工艺集成的单个 PN 结或多个 PN 结构成, 是脉冲防护研究中普遍使用的保护器件之一, 能够承受高功率脉冲的冲击。其基本工作原理为, 在高功率脉冲到达时, TVS 管雪崩击穿, 并进入工作状态, 其动态阻抗由高阻态转变为低阻态, 高功率电流经由二极管内部导出, 从而实现保护后级电路的功能^[22-23]。其主要特点是响应时间快, 体积小, 但功率容量较小, 可采用多管并联形式提高其通流能力。其伏安特性曲线如图 1 所示。

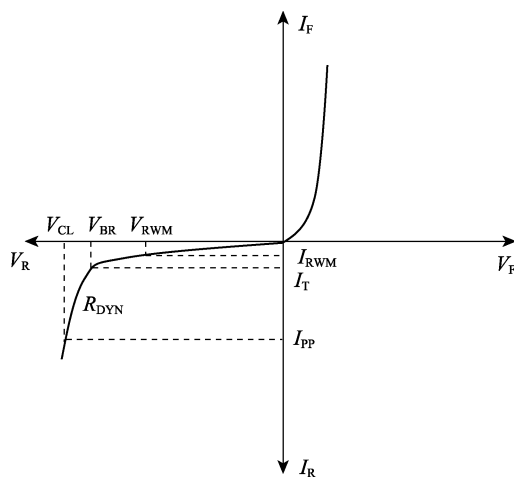


图 1 TVS 管的 V-I 特性曲线
Fig.1 V-I characteristic curve of TVS

瞬态抑制二极管与压敏电阻同属于限压型防护器件, 具有响应时间快、击穿电压偏差小、箝位电压低、无续流等特点, 但由于通流量小, 当通过的电流过大时, 会造成炸裂失效, 因此常作为后级防护, 并采用多管并联的形式进行防护。本文以英飞凌公司生

产的 TVS 管（型号 ESD105-B1-02ELS）为实例进行研究设计。本研究利用官网给出的 ESD105-B1-02ELS

数据手册和 spice 模型建立了其等效电路图^[24]，如图 2 所示。

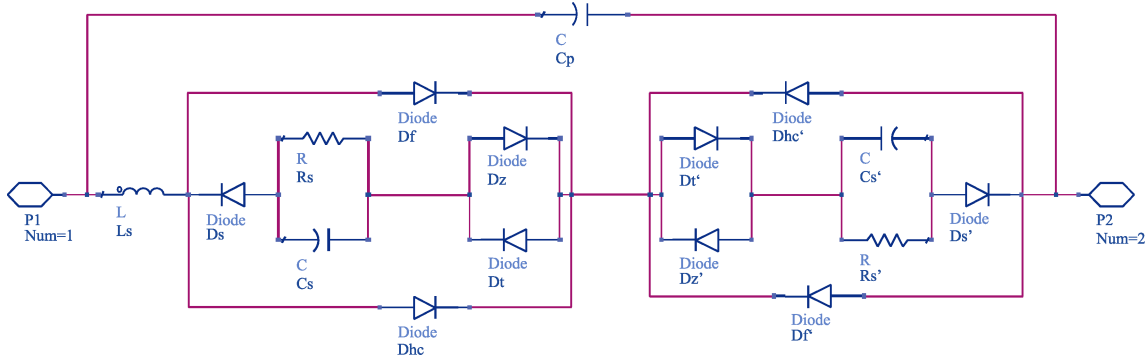


图 2 ESD105-B1-02ELS 等效电路
Fig.2 Equivalent circuit of ESD105-B1-02ELS

1.2 气体放电管防护特性

气体放电管（Gas Discharge Tube），简称 GDT，是一种内部有惰性气体的多电极陶瓷封装保护器件。它的防护作用是利用气体击穿原理，当在气体放电管的 2 个电极之间施加一定的电压时，电极之间会产生不均匀的电场，在该电场作用下，气体放电管内的惰性气体开始电离。当施加电压超过气体的绝缘强度时，两极之间的间隙将开始放电击穿，由原来的绝缘状态转化为导电状态，导通后放电管两极之间的电压维持在放电弧道所决定的残压水平。当残压较低时，可以避免气体放电管后端的电子设备因受过电压而造成损坏^[25]。

气体放电管作为一种开关型浪涌防护器件，其结电容很小，两极间的绝缘电阻很高，通常用于防护电路中的第一级，泄放大的暂态过电流。其优点是功率容量大、阻抗高、容值低；缺点为反应时间长，且弧光放电会形成电弧续流，影响正常信号传输，其伏安特性曲线如图 3 所示。大部分研究实验中，为了解决其响应时间长的问题，常常串联压敏电阻一起进行防护设计。

有相关研究建立了气体放电管的暂态行为级仿真模型，如图 4 所示。模型描述放电管的电极场致发

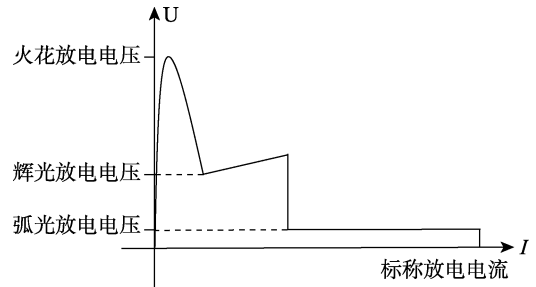


图 3 GDT 的伏安特性曲线
Fig.3 V-I characteristic curve of GDT

射和介质气体放电过程，是气体放电管中电流的主要来源^[26]。其中，由电极场致发射形成的电流用式（1）表示。

$$I_{surf}(t) = \frac{U_{arc}(t)}{a_M \cdot d} \cdot \int_0^t I_{surf}(\xi) d\xi \quad (1)$$

式中： a_M 为金属电极表面场致发射常数，与不同材料有关； d 为电极距离。

气体放电形成的电流用式（2）表示。

$$I_{gas}(t) = \frac{U_{arc}(t)}{a_T \cdot d} \cdot \int_0^t I_{gas}(\xi) d\xi \quad (2)$$

式中： a_T 为 Topley 常数，约为 $8 \times 10^{-4} \text{ V} \cdot \text{s/m}$ 。

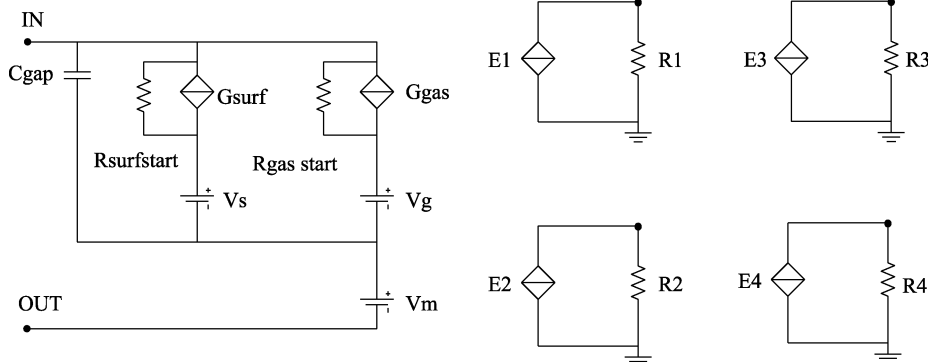


图 4 气体放电管的暂态行为级仿真模型
Fig.4 Transient behavioral level simulation model of GDT

1.3 发夹型微带带通滤波器

微带滤波器是射频通信电路中广泛应用的元件之一,其主要作用是隔离非必需频段的频率信号。微带滤波器因其具有尺寸小、精度高、易于集成、频率适用范围广等特点,被广泛应用^[27-28]。在进行防护器件组合研究过程中,由于多级器件的响应时间会变长,存在响应延时问题,在不同防护器件中间加入带通滤波器,可以起到去耦合的功能,能够对行波进行折反射,降低行波陡度。同时,带通滤波器还可以进行二次滤波,将防护器件的残压进一步降低,提高电磁脉冲防护效果。

常见微带滤波器形式有平行耦合微带线滤波器、发夹型滤波器、梳状型滤波器以及交指型滤波器。本文采用发夹型滤波器设计微带带通滤波器,发夹型微带滤波器是将半波长谐振单元弯成“U”形结构而获得,拓扑结构为交叉耦合,比平行耦合微带线滤波器具有更紧凑的结构。同时,相比于交指型滤波器,加工工艺更加简单,更易于集成,可以避免因加工精度不够带来的误差^[29-30]。

1.4 原理分析

为了克服强电磁脉冲防护研究中不能同时兼具快速响应时间、高功率容量等性能的难点,目前的研究大多采用多器件联合防护的设计方式。其中,TVS管具有响应时间快的优点,但无法承受大功率脉冲,而GDT的耐受功率高,但需要很长一段时间才能完全响应,且具有电弧续流的危害。因此,可以将2种器件并联,前端的GDT管作为开关型防护电路,后级采用多个TVS管并联组成限幅型防护电路。通过GDT与TVS管的并联,既可以解决TVS管功率容量小的问题,还可以提高GDT的响应速度。同时,为了保证防护效果的稳定,需要在GDT和TVS中间加入去耦电路,即微带滤波器。去耦电路的主要作用包括在强电磁脉冲经过时抬升电压,使GDT管迅速

导通,同时可以抑制掉高频能量经过后残留的一些分量。由于这种组合方式下,后级被保护器件的电压取决于TVS管,因此该模块的反应时间理论上为TVS管的响应时间。

2 防护模块仿真分析

2.1 防护器件及滤波器特性分析

研究采用Advanced Design System (ADS) 电磁仿真软件^[31]。根据1.1节中给出的等效电路模型,在ADS中建立105-B1-02ELS的仿真模型,并搭建电路进行仿真,验证其防护特性。分别对电路进行S参数和瞬态仿真,大功率微波源功率为70 dBm,载频为1.5 GHz,脉宽为300 ns,周期为1 000 ns。仿真结果表明,电路在12 GHz以下频段的插入损耗低于2 dB,并且在29.2 GHz时发生谐振。 S_{21} 参数仿真结果如图5所示,经过计算,该TVS管的电容值约为0.17 pF,与数据手册给出数据一致。大功率信号经过后,单个TVS管的防护效果大约为30 dB,仿真结果如图6所示,其中图6a灰色部分为输入电压,黑色部分为输出电压。

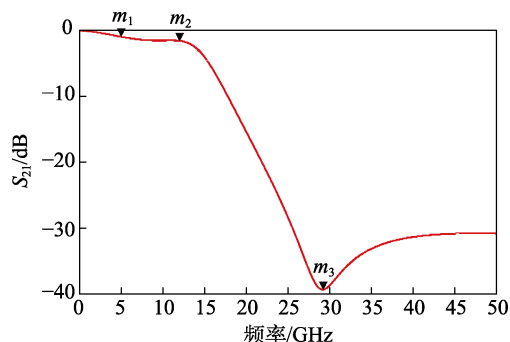
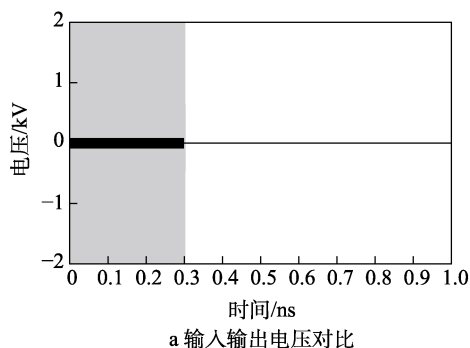
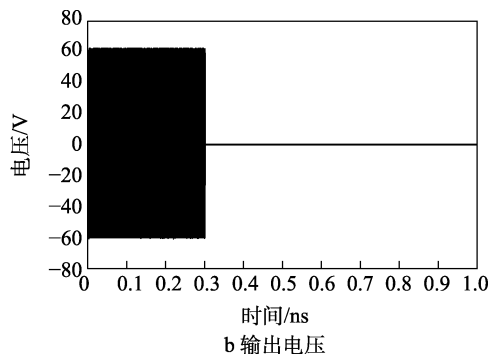


图5 TVS管的S参数传输特性

Fig.5 S-parameter transmission characteristics of TVS tube



a 输入输出电压对比



b 输出电压

图6 TVS管防护效果

Fig.6 TVS tube protection effect: a) comparison between input and output voltage; b) output voltage

建立气体放电管模型,并搭建电路仿真验证防护特性,S参数仿真结果如图7所示。气体放电管模型小,信号传输特性良好。当大功率信号经过时,此时

输入电压为2 kV,尖峰泄漏可达到1 kV,大约需要25 ns的响应时间。仿真结果如图8所示,其中灰色部分为输入电压,黑色部分为输出电压。

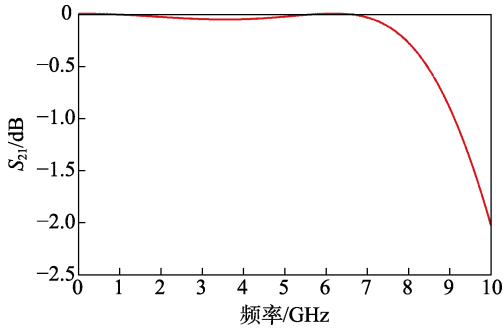


图7 气体放电管的S参数传输特性
Fig.7 S-parameter transmission characteristics of GDT

发夹型微带带通滤波器由多个发夹型谐振腔并排耦合组成^[32]。该滤波器的主要性能参数有发夹臂

长、发夹间距、抽头位置和发夹线宽等。其主要设计过程是利用公式与仿真软件结合，计算发夹间距，通过原型参数计算耦合线的奇偶模阻抗，再通过 ADS 软件的 LineCalc 计算工具，计算耦合线的线宽及间距。滤波器性能指标：工作频段为 1.3~1.7 GHz，通带内衰减不超过 3 dB，在 900 MHz 处的衰减不低于 30 dB。经过 ADS 仿真优化，最终确定滤波器尺寸参数，该发夹型微带带通滤波器微带线线宽 1 mm，发夹臂间距为 2 mm，发夹间距 $S_1=0.14$ mm， $S_2=0.28$ mm，抽头位置距离第一个发夹底部 9 mm。滤波器模型如图 9 所示，经过仿真验证，其 S 参数曲线如图 10 所示。通带内插入损耗小于 1 dB，平坦度良好，在 900 MHz 和 2.1 GHz 处， S_{21} 达到 40 dB 左右，带外抑制效果良好。

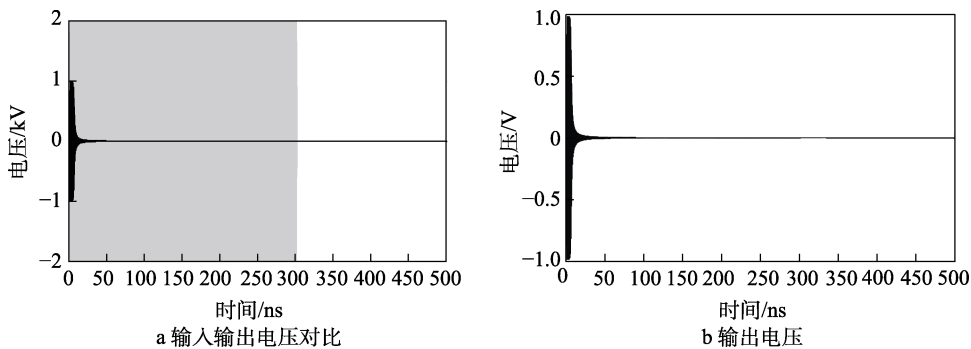


图8 气体放电管的防护效果
Fig.8 GDT protection effect: a) comparison between input and output voltage; b) output voltage

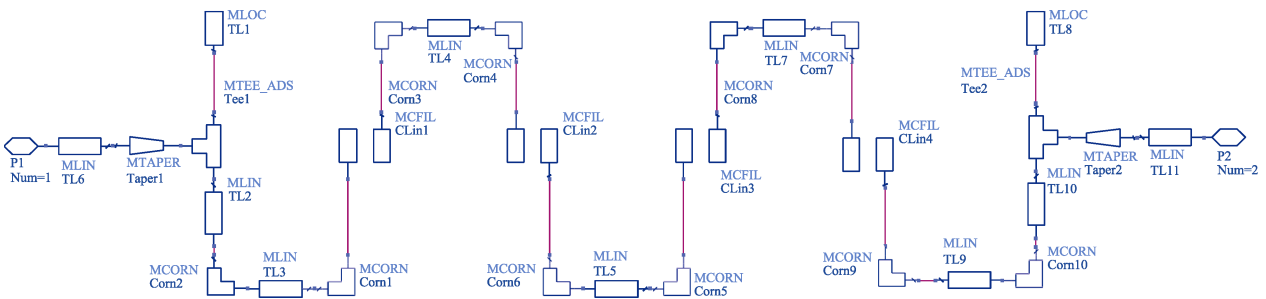


图9 发夹型微带带通滤波器模型
Fig.9 Hairpin microstrip bandpass filter model

2.2 防护模块设计

本文设计的防护模块主要由 3 部分组成，分别是前端的气体放电管组成的开关型防护电路，中间由微带带通滤波器构成的去耦电路，以及最后由多个瞬态电压抑制二极管并联组成的限幅型防护电路。这种组合方式可以兼具不同防护器件的优点，同时利用中间的去耦网络为两端提供在电磁脉冲能量集中频段时的高阻抗，在模块的工作频段则可以减小两端器件的寄生电容对模块的影响^[33-34]。利用仿真软件搭建气体放电管、微带带通滤波器和 5 个并联 TVS 管组合成的电磁脉冲防护模块，其中输入输出阻抗为 50 Ω，微带线采用 FR4 基板参数，防护模块的仿真模型如图 11 所示。

对模块进行 S 参数与瞬态仿真。仿真验证其小信

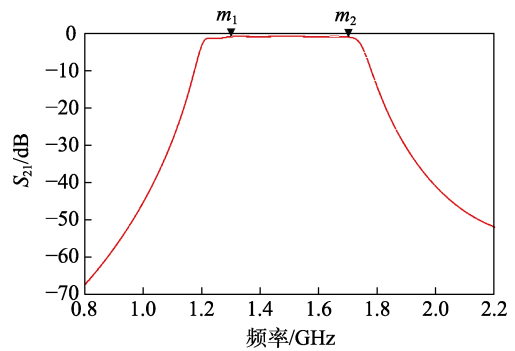


图10 滤波器 S_{21} 参数
Fig.10 S_{21} -parameter of filter

号传输特性以及大功率信号防护效果。大功率微波源为载频脉冲波，载频为 1.5 GHz，功率为 70 dBm，脉宽

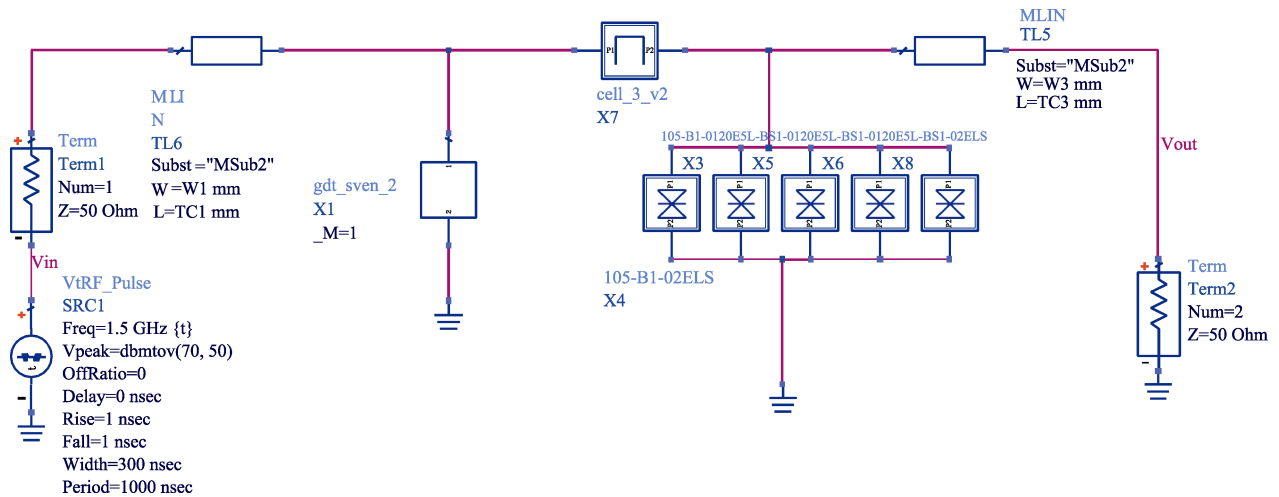


图 11 多器件联合 L 波段强电磁脉冲防护模块
Fig.11 Multi-device joint L-band strong EMP protection module

为 300 ns, 周期为 1 000 ns。经过仿真验证, 该模块在工作频段 1.3~1.7 GHz, 插入损耗小于 1.5 dB, 小信号下具有良好的传输特性, 如图 12 所示。在大功率微波源注入的情况下, 输入电压达到 2 kV, 输出电压只有 15 V, 防护效果约为 42.5 dB, 并经过 50 ns 模块完全响应, 仿真验证结果如图 13 所示。与 2.1 节中防护特性验证结果相比, 多器件联合防护效果远远超过单一器件进行防护。去掉滤波器模块进行仿真验证, 同样条件下, 输入电压为 2 kV, 输出电压为 20 V, 防护效果约为 40 dB。由此可知, 滤波器模块能够有效提高模块整体的防护效果。

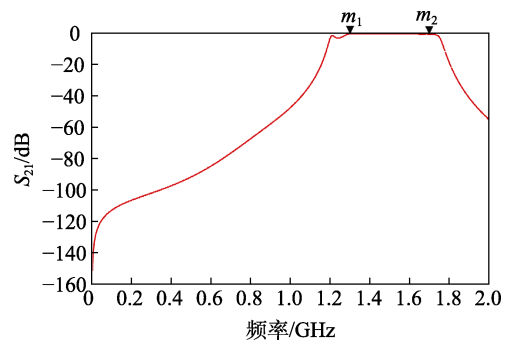


图 12 防护模块 S 参数
Fig.12 S-parameter of protection module

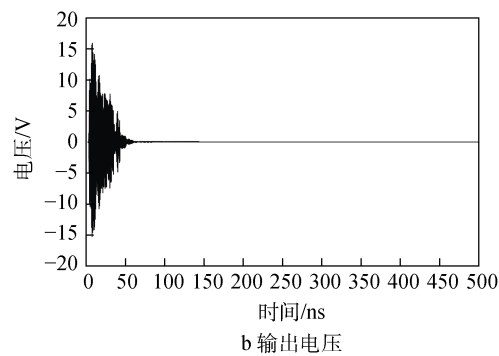
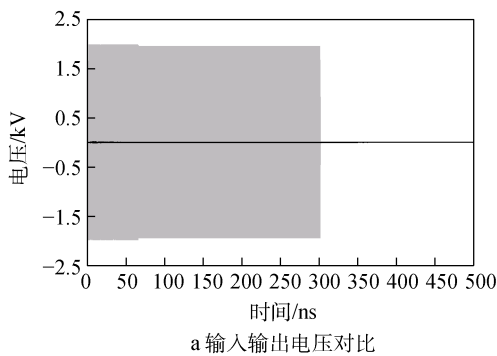


图 13 防护模块强电磁脉冲防护效果

Fig.13 Strong EMP protection effect of the model: a) comparison between input and output voltage; b) output voltage

3 结论

本研究首先建立了瞬态电压抑制二极管、气体放电管的仿真模型, 并仿真验证了 2 种防护器件在强电磁脉冲信号经过下的防护效果, 验证了防护器件的防护特性。设计了一款发夹型微带带通滤波器, 经过仿真验证, 滤波器性能指标符合设计标准。

利用瞬态电压抑制二极管、气体放电管和微带带通滤波器搭建了强电磁脉冲防护模块仿真模型。该模块工作频段为 1.3~1.7 GHz, 运行仿真得到该模块的防护效果约为 42.5 dB, 工作频段内的插入损耗小于

1.5 dB。通过对比, 多器件联合设计防护模块比仅利用 TVS 管进行的防护效果高 12.5 dB, 加入的微带低通滤波器可以使整个模块防护效果提高 2.5 dB。经过仿真验证, 当目标脉冲持续时间在 100 ns 以上时, 防护模块可以完全响应。同时, 该模块能够承受的最高峰值电压取决于 GDT 管的脉冲击穿电压, 启动电压取决于后级 TVS 管的过冲峰值电压。

参考文献:

[1] 刘尚合, 刘卫东. 电磁兼容与电磁防护相关研究进展

- [J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1605-1613.
LIU S H, LIU W D. Progress of Relevant Research on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Protection[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1605-1613.
- [2] 周璧华, 陈彬, 石立华. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
ZHOU B H, CHEN B, SHI L H. EMP and EMP Protection[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.
- [3] ZHOU L, LIU L L, SHEN Z X. High-Performance Energy Selective Surface Based on the Double-Resonance Concept[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(11): 7658-7666.
- [4] 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一路综合防护方法综述[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(2): 7-14.
ZHENG S Q, DENG F, WANG D D, et al. Overview of the HPM Field-Circuit Integrated Protection Methods for Electronic Equipment and System RF-Channels[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(2): 7-14.
- [5] 郑生全, 蔡敬标, 阮兵, 等. 舰船装备强电磁环境保护技术综述[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(4): 1-19.
ZHENG S Q, CAI J B, RUAN B, et al. A Review of Strong Electromagnetic Environment Protection Technology for Ship Equipment[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(4): 1-19.
- [6] LIU Q F, ZHENG S Q, ZUO Y, et al. Electromagnetic Environment Effects and Protection of Complex Electronic Information Systems[C]// 2020 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO). Hangzhou: IEEE, 2020.
- [7] YUAN L, WANG Z L, WEI W Q, et al. High-Frequency Broadband RF Transmit-Receive Switch for Pulsed Magnetic Field NMR[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 6004109.
- [8] 张耀辉, 李跃波, 韩超, 等. 用于高功率电磁脉冲防护的SiC-TVS器件设计研制[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2114-2121.
ZHANG Y H, LI Y B, HAN C, et al. Design and Development of SiC-TVS Devices for High Power Electromagnetic Pulse Protection[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2114-2121.
- [9] HODZIC M, MUJICIC A. Modelling Overvoltage Protection Components: Verilog Simulations of Combined MOV and GDT Arresters[J]. Informacije Midem-journal Of Microelectronics Electronic Components And Material, 2018, 47(4): 261-271.
- [10] 李祥超, 董昌鑫, 蔡露进. 气体放电管与压敏电阻级间能量配合的分析[J]. 电瓷避雷器, 2016(5): 54-59.
LI X C, DONG C X, CAI L J. Analysis of Energy Coordination between Gas Discharge Tube and Varistor[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(5): 54-59.
- [11] 李祥超, 张静, 陈良英, 等. 组合型电涌保护器设计方法的研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(4): 16-22.
LI X C, ZHANG J, CHEN L Y, et al. Research on Design Method of Combined Surge Protection Device[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(4): 16-22.
- [12] 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.
ZHANG Z L. Research on Electromagnetic Protection Technology of RF Front-End in Ultrashort Wave Communication System[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
- [13] 徐黄飞, 张其林, 蔡露进, 等. 气体放电管与半导体放电管配合使用方法的分析[J]. 电瓷避雷器, 2019(1): 22-30.
XU H F, ZHANG Q L, CAI L J, et al. Analysis on Matching Method between Gas Discharge Tube and Thyristor Surge Suppressors[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(1): 22-30.
- [14] 牛春霞, 马子龙, 杨仲江. 基于有限元法的GDT与TVS能量配合仿真研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(5): 102-106.
NIU C X, MA Z L, YANG Z J. Simulation Analysis for GDT and TVS Energy Coordination Based on the Finite Element Method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(5): 102-106.
- [15] 郭稳. 强电磁脉冲下防护器件的冲击特性及组合使用方法的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
GUO W. Research on Impact Characteristics and Combined Use Method of Protective Devices under Strong Electromagnetic Pulse[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Engineering, 2023.
- [16] 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 J K. Design and Research of Combined Protection Module for Strong Electromagnetic Pulse[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [17] 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.
ZHANG X W. Study on Response Characteristics and Protection Technology of Pulse Protection Devices under Different Fast Pulses[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [18] 郝佳. 通信系统发射通道的强电磁脉冲防护研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
HAO J. Research on Strong Electromagnetic Pulse Protection of Transmission Channel in Communication System[D]. Xi'an: Xidian University, 2022.
- [19] HUANG R Q, LIU J B, LIU C X, et al. Self-Switchable Broadband Waveguide Protector Against High Power Microwave[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2023, 65(1): 355-359.
- [20] LI Y N, TAN Z L. Simulation and Design of RF Front-End Electromagnetic Protection Module Based on VHF Communication[C]// 2018 International Conference on Electronics Technology (ICET). Chengdu: IEEE, 2018.
- [21] CHEN J P, SHEN D Y, ZHANG X P, et al. 5G Dual-Mode Bandpass Filters Fed by Coaxial and ISGW[C]//

- 2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Nanjing: IEEE, 2021.
- [22] WANG D D, CHEN L, YANG K, et al. Experimental Study of the Protection Effect of the Short-Wave RF Front-End Lightning Electromagnetic Pulse Protection Module Based on Switch-Type and Voltage Limiting Type Protective Elements[C]// 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Hangzhou: IEEE, 2018.
- [23] BÖNISCH S, KALKNER W. Measurement and Simulation of the Behavior of a Short Spark Gap Used as ESD Protection Device[C]// 2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record. Boston: IEEE, 2003: 37-42.
- [24] ZHANG C R, ZENG X, ZHOU L, 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.
- [25] HITOSHI K, KAZUO M. Lightning Surge Response Improvement by Combinations of Varistors and Gas Discharge Tubes[J]. WSEAS Transactions on Power Systems, 2012, 7(1/4): 60-69.
- [26] bönisch S, KALKNER W. Measurement and Simulation of the Behaviour of a Short Spark Gap Used as ESD protection Device[C]// 2003 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record. Boston: IEEE, 2003.
- [27] 王敏. 多频段微带滤波器的研究与设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
WANG M. Research and Design of Multi-Band Microstrip Filter[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023.
- [28] 杨新宇. 一种小型化交叉耦合微带带通滤波器的设计[J]. 现代电子技术, 2023, 46(21): 28-31.
YANG X Y. Design of Miniaturized Cross-Coupled Microstrip Bandpass Filter[J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(21): 28-31.
- [29] 彭黎黎, 董思乔, 唐清华. Ku 频段微带带通滤波器的设计与实现[J]. 信息与电脑(理论版), 2022, 34(3): 210-213.
PENG L L, DONG S Q, TANG Q H. Design and Implementation of Ku Band High Performance Spurious Suppression Micro-Strip Filter[J]. China Computer & Communication, 2022, 34(3): 210-213.
- [30] WANG Y, CHEN P F, YONG J, et al. A Comprehensive Investigation on the Selection of High-Pass Harmonic Filters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 4212-4226.
- [31] 吴平. 基于 ADS\HFSS 软件的微波限幅器综合仿真设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
WU P. Comprehensive Simulation Design of Microwave Limiter Based on ADS\HFSS Software[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2011.
- [32] 苏永川, 何子述, 高瑜翔, 等. L 波段发夹型微带滤波器的设计[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(1): 16-18.
SU Y C, HE Z S, GAO Y X, et al. Design of Hairpin Microstrip Filter with Frequency in L-Band[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2004, 33(1): 16-18.
- [33] WANG Q Y, BO L, WANG D D, et al. Simulation Design of RF Front-End Electromagnetic Pulse Protection Module Based on Gas Discharge Tubes and Transient Voltage Suppressors[C]// 2023 IEEE 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (ISEMC). Hangzhou: IEEE, 2023.
- [34] WANG Q Y, WANG D D, YANG Y P, et al. Design and Optimization of Strong Electromagnetic Pulse Protection Devices Based on Semiconductors and Gas Discharges Tube[C]// 2023 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC). Guilin: IEEE, 2023.