



·电磁防护与应用·

电磁防护技术发展综述与展望*

毋召锋, 徐延林, 刘培国, 查 淞

(国防科技大学 电子科学学院, 长沙 410073)

摘 要: 针对复杂电磁对抗环境中电子信息装备面临的强电磁环境威胁以及防护加固需求, 对强电磁防护技术的发展现状进行了综述, 并提出了强电磁系统级综合防护的发展展望。强电磁防护是为了保证电子信息装备在强电磁环境中免受损伤或损毁的技术手段, 从电磁波的耦合途径分析了当前电磁防护的重点和难点, 然后分别以限幅器技术、频率滤波技术、能量选择防护技术三个方面对前门防护技术的发展现状进行了分析总结, 最后从新型屏蔽材料和防护器件两个方面对新型电磁防护技术进行了展望, 并从前后门一体防护、场路一体防护、多域联合防护三个角度对系统级电磁防护进行了总结, 为电子信息装备在复杂电磁环境下的电磁防护加固设计提供了支撑。

关键词: 电磁防护; 强电磁环境; 限幅器技术; 能量选择技术; 频域滤波技术

中图分类号: TN82

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230375

Review and prospect of electromagnetic protection technology development

Wu Zhaofeng, Xu Yanlin, Liu Peiguo, Zha Song

(College of Electronics Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In this article, the development of strong electromagnetic protection technology is reviewed in response to the strong electromagnetic environmental threats and protection reinforcement requirements faced by electronic information equipment in complex electromagnetic countermeasures environments, and the development prospects of strong electromagnetic system level comprehensive protection are proposed. Strong electromagnetic protection is a technical means to ensure that electronic information equipment is not damaged or destroyed in a strong electromagnetic environment. This paper analyzes the current focus and difficulties of electromagnetic protection from the coupling pathway of electromagnetic waves, and then analyzes and summarizes the development status of front door protection technology from three aspects: limiter technology, frequency filtering technology, and energy selection protection technology. Finally, the new electromagnetic protection technology is prospected from two aspects of new shielding materials and protective devices, and the system level electromagnetic protection is summarized from three aspects of integrated front and rear door protection, integrated field and road protection, and multi domain joint protection, which provides support for the electromagnetic protection reinforcement design of electronic information equipment in complex electromagnetic environment.

Key words: electromagnetic protection, strong electromagnetic environment, limiter technology, energy domain selection technology, frequency domain filtering technology

电磁空间作为独立于陆、海、空、天之外的第五维空间, 是一切电子信息系统赖以工作并发挥效能的基础物理空间。随着信息技术高速发展, 上至国家各项重大公共基础设施及其背后的物理信息网络, 如电力系统、交通系统、通信系统等, 下至单个电子设备, 如雷达、手机、电脑等, 无一不是依赖于电磁空间开展工作的。因此, 维护电磁空间的安全与稳定直接关系到整个国家的安全与稳定。

对于某一特定的电子信息系统而言, 其电磁安全威胁主要来源于两个方面, 其一是不同电子设备之间由于同时工作, 各自产生的电磁波相互交错而引起的“无意”互扰和串扰; 其二是敌对势力针对性的“有意”电磁干扰或电

* 收稿日期: 2023-10-27; 修订日期: 2024-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62101564、62293491、62293494); 湖南省自然科学基金项目 (2022JJ20045)

联系方式: 毋召锋, wuzhaofeng13@nudt.edu.cn。

通信作者: 徐延林, 13298656824@163.com。

磁攻击。对于前者,属于电磁兼容方面问题,国内外学者认知较早,已经得到充分重视,现今绝大多数电子设备在设计定型阶段均有电磁兼容性相关的标准和要求。得益于近年来电磁兼容相关领域学科和技术的快速发展,针对电子设备之间的互扰、串扰问题,已经积累了较多的解决手段,技术储备较为雄厚。对于后者,根据攻击电磁波能量强度的不同,能够对电子设备依次产生干扰、降级、损伤、损毁等不同程度的影响^[1-2]。以往鉴于高能量强度电磁波的生成难度,对于外部电磁干扰/电磁攻击的关注重点多集中在抗有意电磁干扰上,此方面目前也已经取得了较为丰硕的成果^[3-4]。并且,随着相关标准的不断完善出台,各种电子信息设备在设计定型阶段一般都会考虑抗电磁干扰相关的指标要求。相比而言,对于高能量的电磁攻击,以往的重视程度并不高,大多数电子信息设备在设计定型阶段并没有考虑抗强电磁攻击毁伤的问题。然而,随着近些年高功率微波、脉冲功率等技术的发展成熟^[5-6],强电磁攻击给电子信息系统的电磁安全带来了更为严峻的全新威胁。

相比电磁干扰的“软杀伤”,强电磁攻击能够通过高能量强度的电磁波直接物理损伤或损毁电子信息系统中敏感电子元器件,给设备造成不可逆转的“硬杀伤”^[7]。并且,由于电磁波的空间覆盖性和电磁绕射特征,强电磁攻击能够充分利用电子设备上的各种信号、非信号通道进入设备内部,给电磁敏感器件造成致命性打击。特别是对于诸如电力网络、通信网络等为代表的大型电子信息网络,强电磁攻击往往能够通过破坏关键节点的方式,起到“由点及面”的打击效果,大范围瘫痪一个国家的公共基础设施网络,给国家的安全稳定带来重大威胁。

鉴于强电磁攻击的颠覆性作用,世界各国已将强电磁攻击引发的电磁安全问题上升为国家战略,美国以及俄罗斯等欧洲发达国家更是在二十多年前便开始布局,意在控制战略制高点。美国是国际上最早开展强电磁攻击武器和强电磁脉冲效应相关研究的国家,美国国会两度成立电磁脉冲委员会,先后发布了数十份与强电磁攻击威胁相关的研究报告^[8]。2019年,美国总统针对重大设施电磁安全(包括预警、防护、恢复等)正式签署法令,目前已进入实施阶段。欧盟方面也十分重视电磁安全领域的研究,通过第七框架计划先后资助了三个重大设施的电磁安全研究课题,分别为:HIPOW(重大设施高功率微波威胁防护)、STRUCTURES(重大设施电磁攻击防护策略)和SECRET(铁路应对电磁攻击安全防护),总投资约3500万欧元,在重大设施的电磁安全领域取得了重要的成果^[9-11]。相比而言,我国对于强电磁攻击防护的研究起步和布局较晚。但随着近年来国际上强电磁脉冲源的快速发展和成熟,我国也逐渐意识到了强电磁攻击的潜在威胁。

为应对愈发严峻的电磁安全形势,国内近几年不断提高了对于电磁安全和电磁防护领域研究的重视程度。2020年4月,中国工程院发布“中国电子信息工程科技发展十大技术挑战(2020)”,将电磁场与电磁环境效应列为其中之一,强调各类装备正面临严峻的电磁安全问题。同年8月,中国科协发布“十大前沿科学问题和十大工程技术难题”,将信息化条件下国家重大基础设施如何防范重大电磁威胁列为十大工程技术难题之一。另外,我国于2020年底通过了《国防法》修订,专门增加了电磁安全领域的防卫政策,这是电磁安全首次上升至国家法律层面。由此可见,电磁防护已然成为一项关乎国家安全的重大基础性问题,具有重要的学术研究价值和巨大的工程应用前景。

本文针对强电磁防护的迫切需求,对强电磁防护技术的发展现状进行了综述,同时对新的防护体系和防护技术进行了展望。首先从电磁波的耦合途径和电磁波的特征维度两个方面总结了电磁防护的技术原理,分析了前门防护和后门防护的重难点;随后梳理了限幅器技术、频域滤波技术、能域滤波技术在强电磁防护方面的发展现状;最后从前后门一体防护、场路一体防护、多域联合防护三个方面进行了技术展望。

1 典型前门防护技术发展现状

电磁防护的终极目的就是阻止“不相关”的电磁信号进入电子设备内部,防止电磁干扰信号影响设备的正常工作或强电磁攻击对设备中的敏感电子元件造成损伤。实现手段上,电磁防护的主要实现方式就是对电磁干扰信号或电磁攻击信号进行滤波或吸波,筛选出有用电磁信号“放行”的同时阻断无用电磁信号的传输过程,其本质可以看作是一种广义的“电磁滤波”。

根据电磁耦合三要素,实现电磁防护最常用的手段就是阻断电磁信号的传输耦合途径。从电磁波进入电子设备的耦合途径出发,常见的电磁防护方法可分为前门防护方法和后门防护方法两类。电磁攻击对电子设备的作用过程是电磁辐射耦合和传导耦合的交织作用。如图1所示,电磁辐射进入电子设备内部主要有“前门”和“后门”两种耦合途径。其中,“前门”耦合途径是指电子设备对外开放的信号通道,如射频信号通道、光电探测窗口等;“后门”耦合途径则是指电子设备的非信号通道,如通风孔、机壳的孔缝等。另外,由于电磁波对介质的穿透性,对

于一些非金属外壳的设备,其介质机壳、连接线缆等也是电磁波的“后门”耦合途径。

电磁攻击通过“前门”、“后门”等通道耦合进入电子设备内部后,视能量强度的大小,可对电子设备的工作状态造成干扰或者降级,严重情况下甚至可能会对内部的敏感电子元件造成物理损伤或者损毁。为确保电子设备在强电磁攻击下的生存和工作,必须对其进行全面的防护加固。根据电磁辐射的耦合途径,常见的防护手段大体上可以分为“前门”防护和“后门”防护两类^[12]。前门防护方法广义上是指从电子设备信号通道的角度进行“电磁滤波”的一种防护方法。根据电子设备信号通道的特征,前门防护的核心难点在于如何在不影响设备工作信号收发的前提下,实现对强电磁攻击的防护。目前,典型的前门防护方法包括限幅、频域滤波、环形器等。这些防护方法本质上都是将强电磁攻击与工作信号进行分离,然后区分处理。后门防护方法广义上是指从电子设备非信号通道的角度进行“电磁滤波”的一种防护方法。相比于前门防护方法,后门防护因为不用考虑工作信号的收发过程,故其防护设计相对简单,不用考虑不同电磁信号的区分,可直接通过屏蔽、吸波、接地等手段隔绝一切电磁波进入电子设备。

受益于以往电磁兼容与抗干扰等领域技术的快速发展,现有电子设备的后门防护措施一般比较完善,技术手段也相对成熟。相比之下,针对电子设备的前门防护一直是电磁防护领域的重点和难点问题。一方面,对于电子设备而言,信号通道一般都是普遍存在的。当强电磁攻击到达电子设备附近时,强电磁能量可直接通过设备的接收天线几乎无损地进入射频通道,从而破坏设备中的敏感电子元件。另一方面,对于电子设备的信号通道,既要实现针对工作信号的正常收发,又要实现针对强电磁攻击的自适应防护,如何实现两者的“功能兼容”是防护设计的核心难点所在,相关技术积累目前还较为薄弱。下面围绕几种典型的前门防护技术,综述其发展现状。

1.1 限幅器

限幅器是目前应用最广泛的强电磁脉冲防护器件之一,其功能是将接收到电路系统中的电平通过放电、接地等方式限制到安全阈值以下,保护后端电子设备。目前,限幅器主要有三种实现方式:固态半导体、等离子气体、高温超导体。受到使用环境以及技术成熟度影响,目前最常用的是半导体限幅器,等离子体限幅器近年来也有较大的发展。图2分别是由分立元件和集成电路两种方式设计的半导体限幅器^[13-14]。美国的半导体行业一直处于国际领先地位,MACOM、Skyworks、Qorvo、Aeroflex、TriQuint 等公司研制了一系列覆盖全波段的大功率限幅器及限幅芯片,针对各类防护需求具有良好的性能。典型的如美国 TriQuint 公司开发的 TGL 系列防护芯片,覆盖了 0.1~25 GHz 的超宽频段范围。该类型的防护芯片采用砷化镓(GaAs)基底单片微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)工艺,在电路设计时集成了多级垂直沟道 PIN 限幅二极管,峰值耐受功率可达数百瓦,脉冲耐受功率密度最高可达 100 W/mm³,主要应用于射频模块内部电路防护。此外,美国 Aeroflex 公司研发的 ACLM 系列防护芯片,使用频段范围覆盖 0.5~18 GHz,在宽频带内峰值耐受功率能够达到 100 W。该类型防护芯片采用陶瓷基底微带电路工艺,在电路设计时集成了多级硅基 PIN 二极管和肖特基二极管,最高峰值耐受功率能

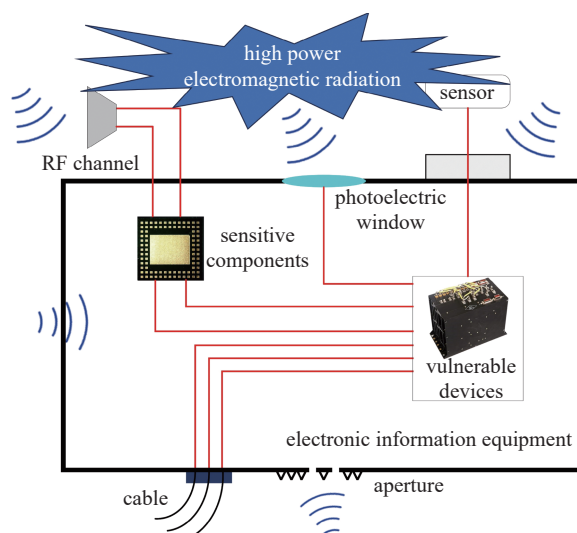
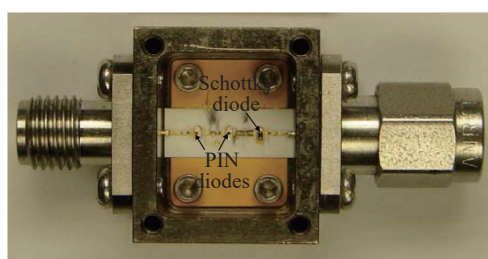
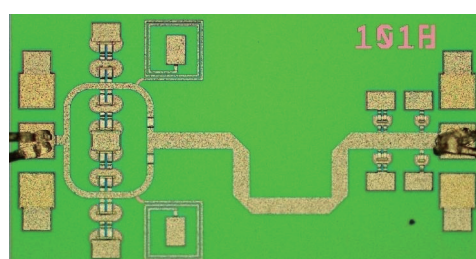


Fig. 1 Coupling pathways for electromagnetic attacks entering electronic devices

图1 电磁攻击进入电子设备的耦合途径示意图



(a) limiter composed of discrete components



(b) limiter processed by MMIC process

Fig. 2 Two types of solid-state semiconductor limiters^[13-14]

图2 两款固态半导体限幅器^[13-14]

表 1 美国主要厂商典型限幅器性能指标 (CW: 连续波; P: 脉冲)

Table 1 Performance of typical limiters from American (CW: continuous wave; P: pulse)

product model	frequency/GHz	insertion loss/dB	withstand power/W	manufacturer
TGL2201	2~25	1.0	5 (CW)	Qorvo
TGL2927-SM	2~4	0.5	200 (P)	Qorvo
TGL2210-SM	0.05~6	0.7	100 (P)	Qorvo
MALI-010365	2.7~3.8	0.5	100 (P)	Apitech
ACLM-4851	1.0~2.0	1.0	1000 (P)	Aeroflex
ACLM-4601	0.5~18	1.8	200 (P)	Aeroflex

够达到 1000 W, 脉冲耐受功率密度 10 W/mm^3 , 主要应用于有源相控阵雷达和导弹的高功率微波防护。表 1 展示了美国其他一些主要半导体器件厂商典型限幅器产品的核心性能指标, 此处不再一一展开介绍。近几年, 国内半导体限幅器在强电磁防护迫切需求的牵引下, 也取得了一些发展。基于第二代第三代半导体如 GaAs、GaN 的器件, 中国电子科技集团公司第五十五研究所研制的 X 波段限幅器, 占空比 40% 脉冲信号注入的耐受功率达到了 $100 \text{ W}^{[15]}$; 中国电子科技集团公司第十三研究所, 采用耦合检波的半有源限幅电路, 在 $0.3 \sim 2 \text{ GHz}$ 内实现了 1000 W 的脉冲 (0.1% 占空比) 功率耐受能力^[16]; 国防科技大学通过 Si 基、GaN 基、GaAs 基三级二极管的混合的方式设计的限幅器, 在 $0.1 \sim 4 \text{ GHz}$ 内实现了 1000 W 脉冲 (脉宽 $2 \mu\text{s}$, 占空比 10%) 耐受能力^[17]。

1.2 频域滤波

滤波器是一种选频装置, 可以选择特定频率或频段的信号通过, 而极大衰减其他频率成分, 适合用于抗带外电磁干扰和电磁毁伤。滤波器的设计理论已经非常成熟, 包括巴特沃斯、切比雪夫、椭圆滤波等理论可以直接用于设计不同需求的滤波器电路结构。滤波器在抗强电磁毁伤方面的作用主要是衰减工作带外的电磁能量。对于带外的窄带高功率微波, 滤波器可以提供极大的衰减, 从而阻止能量进入后端电路。而对于超宽带的宽谱电磁脉冲, 滤波器可以抑制带外部分的能量, 从而减小攻击信号进入后端电路的总能量。

例如, 核电磁脉冲是一种超宽频谱的强电磁攻击, 但其频率分量主要集中在低频段 (P 波段), 对于 L 波段及以上的射频系统的强电磁防护, 采用滤波器就可以将工作带外的电磁能量衰减至安全阈值以下。在核电磁脉冲学术研究中应用最广泛的时域波形表达式为^[18]

$$E(t) = E_0 k (e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

式中: E_0 是峰值场强, k 是修正系数, α, β 分别表征脉冲前后沿的参数, 其取值通常为 $\alpha = 2.6 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, $\beta = 1.5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, $k = 1.04$, $E_0 = 50 \text{ kV}^{[19]}$ 。图 3(a) 展示了核电磁脉冲的时域波形。设计一个中心频点 1 GHz 带宽 400 MHz 的带通滤波器, 如图 3(b) 所示。通过仿真计算核电磁脉冲通过滤波器后的时域波形, 我们可以看到最大的峰值电压已经从 50 kV 下降到 0.57 kV , 其峰值防护效能达到了 39 dB 。对于通带在更高频率的滤波器, 其峰值电压会更小。同样的, 对于超宽谱中的双极脉冲, 由于其频率分量主要集中在 200 MHz 到 L 波段^[20], 对于工作频率远大于这一频段的电子设备, 采用滤波器也可以实现有效的电磁防护。

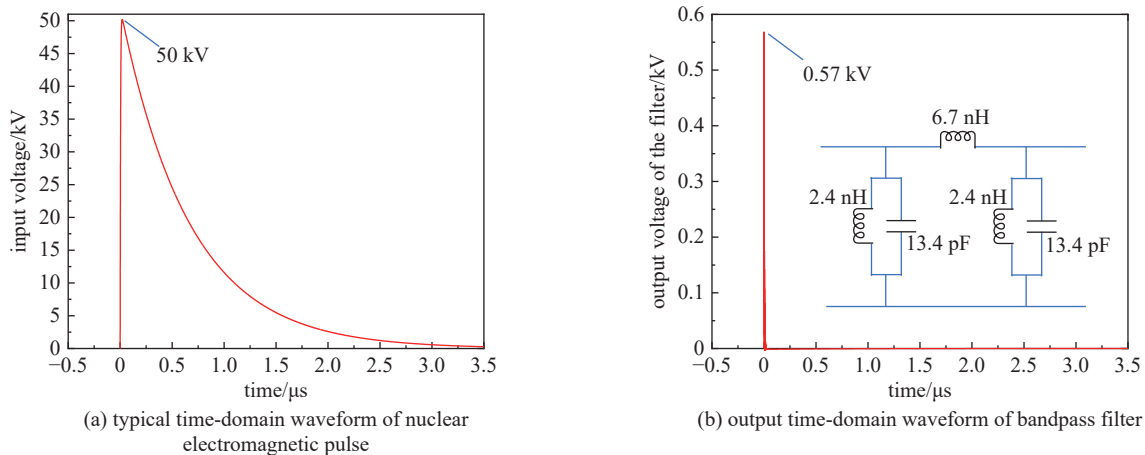


Fig. 3 Simulation results of bandpass filter protection against nuclear electromagnetic pulses

图 3 带通滤波器对于核电磁脉冲的防护效果仿真结果

当前, 滤波器的设计方法和技术已经相对成熟, 其中波导滤波器的研究历史可以追溯到 20 世纪 50 年代, 通过改变波导的几何形状和材料填充实现不同类型的滤波器, 如带通滤波器、带阻滤波器等。文献 [21] 中采用电铸工艺设计了一款 X 波段的带通滤波器, 其带外抑制能够达到 60 dB 以上; 文献 [22] 采用 TM 双模谐振腔的方式设计了一个八阶滤波器, 其带外抑制能力达到了 70 dB, 针对上述核电磁脉冲其输出残压可以降低到 16 V 以下。尽管波导型滤波器具有非常出色的性能表现, 但是其物理尺寸过大不易集成, 为了实现滤波器的小型轻便化, 研究人员通过在平面电路中采用微带线、共模线等结构来设计滤波器^[23-24]。随着微纳工艺和半导体技术的发展, 新的工艺和设计方法不断被应用到滤波器设计中, 如低温共烧陶瓷工艺(LTCC)^[25]、片上滤波器技术^[26-27]、声表面波滤波器^[28]等。基于 LTCC 工艺的滤波器通常具有较好的品质因数, 在高频段具有较小的插入损耗, 文献 [25] 中利用 LTCC 工艺加工的滤波器在 28 GHz 获得了 0.8 dB 的插入损耗, 带外抑制达到了 50 dB 以上。片上滤波器则是一种在集成电路芯片上实现滤波特性的器件, 具有更薄更小的尺寸和更高的加工精度, 文献 [26] 在 0.75 mm×0.43 mm 的芯片尺寸上实现了 33.5 GHz 中心频率插入损耗 1.06 dB, 带外抑制大于 26 dB 的滤波特性。声表滤波器是利用材料的压电效应, 在电-声-电转换过程中实现滤波特性的一种新型技术, 具有抗电磁干扰性能好、可靠性高、体积小的特性。文献 [28] 中利用声表器件加工的滤波器在 L 波段实现了 20 dB 以上的带外抑制。目前声表滤波器的插入损耗相对其他技术要大, 因此主要应用于低频段滤波器设计中。

上述滤波器件都是针对射频通道内的导行电磁波进行滤波防护, 而针对空间传输的电磁波则可以采用频率选择表面(FSS)进行滤波。FSS 是一类利用周期性单元结构排列组成的人工电磁超材料, 对空间传输的电磁波实现滤波特性, 也可以称为“空间滤波器”^[29]。在近几十年的发展, FSS 从分析到设计的研究逐渐趋于完善。为抑制工作频带外的强电磁攻击能量, FSS 需要带内具有较好的透波特性, 更重要的是带外具有高抑制、边带具有高截止的传输特性。目前, 实现这种高选择性的主要方式是通过多层级联或构造带外传输零点。如文献 [30] 中采用 5 层 FSS 结构进行级联, 在 5.36 GHz 得到了 100 MHz 的传输通带, 该结构有较好的带外抑制, 且双边带滚降锐利, 带外抑制达到了 50 dB 以上。另一方面, 可以利用三维结构构造更多的传输零点来实现较好的选择特性, 如文献 [31] 中用三维多层结构在接近传输通带的两侧分别构造传输零点, 提高了边带处的截止性能, 传输零点处的隔离度达到了 40 dB 以上, 但是在零点之外传输系数又再次上升。总的来说, 目前 FSS 可以实现空间强电磁攻击的防护特性, 但是在隔离度和防护效果上相比前面电路级别的滤波器还有较大进步空间。

针对工作频带内的强电磁攻击, 传统的滤波器不能起到防护效果, 为此有学者提出了一种滤波限幅一体化设计的方案, 对于小功率信号是一种频域滤波器, 而对于高功率电磁波是一种限幅器, 具有集成度高的特点^[32-33]。美国托利多大学通过在梳状滤波器的耦合线上加载等离子体限幅器, 在 P 波段实现了滤波限幅一体化设计, 其耐受功率达到了 250 W, 防护效能达到了 33.5 dB^[32]。利用相似的原理, 有学者通过交指滤波器并联二极管的方式在 S 波段实现了滤波限幅一体化设计^[33]。为了实现更高的耐受功率, 在如图 4 所示的腔体滤波器设计中, 利用气体击穿而产生的等离子体, 将高功率电磁波反射, 从而实现强电磁防护的功能^[34-35]。文献 [34] 中设计了一种尖锥加载的波导滤波器, 当输入功率为 20 kW 时实现了隔离度大于 20 dB 的防护性能, 根据数值计算其功率容量不低于 100 kW。随后, 文献 [35] 通过仿真和测试研究了腔体滤波器的防护效果和时域响应特性, 实现了 32.6 dB 的防护效果, 且其响应时间与输入电磁波的功率呈反比关系, 最快的响应时间为数十纳秒, 因此存在功率泄露的风险。

总的来说, 滤波器作为一种选频装置, 在强电磁防护中可以有效应对带外电磁攻击。而针对带内强电磁防护, 虽然已经开展了一些滤波限幅一体的设计研究, 但是其耐受功率或响应时间难以满足现有防护需求。特别是针对

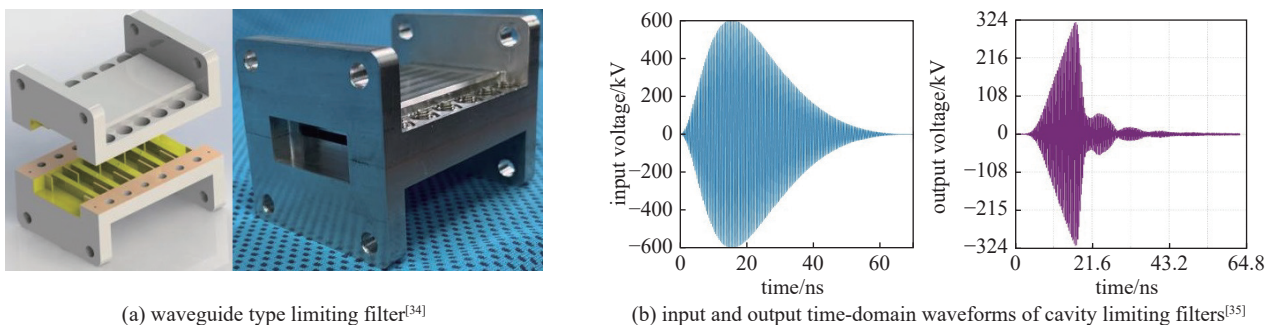


Fig. 4 Limiting filter and its time-domain response waveforms

图 4 限幅滤波器及其时域响应波形

超宽带的电磁攻击,其在超宽频带内都有较大的能量分布,其攻击频率可以覆盖电子装备的工作频率,此时滤波器不能提供有效的电磁防护能力。

1.3 能量选择强电磁防护技术

能量选择强电磁防护技术是一种新型的前门电磁防护技术,从能量域区分同频正常工作电磁波和强电磁攻击,具备低能量信号低损耗通过、高能强电磁波瞬时反射或吸收的能力,可以实现对强电磁攻击的防护,其工作原理如图5所示。根据使用场景和形态可以分为能量选择表面、能量选择防护天线、强电磁防护插件三类。其中,能量选择表面因其适用范围广、耐受功率大等特点而受到广泛研究。能量选择强电磁防护技术自2009年由国防科技大学刘培国教授团队首次提出以来^[36],因其在射频前端独特的强电磁防护潜力得到国内外的广泛关注和研究。在理论分析、设计方法、电磁结构设计、测试验证方法、装备应用等多方面已经取得了相应成果^[37-40]。

在能量选择的理论分析方面,万双林通过研究金属缝隙的表面阻抗对入射平面波传输的影响,研究了表面阻抗对电磁波传输效率的影响,提出了场致阻抗可变的能量选择表面概念^[41],并据此研究了金属网格^[42]和加载有二极管的金属网格对电磁波传输的影响。随后,杨成在其硕士论文中仿照阻抗边界条件中表面阻抗的定义,描述了阻抗表面切向电场和面电流密度之间的关系,从本质上对能量选择表面的防护机理进行了阐释^[43]。在设计仿真方法方面,因为能量选择表面通常为周期结构,最常用的仿真方法是周期边界法^[44],即在仿真中边界条件设置为周期边界以模拟无限大周期结构的电磁频域响应。但是这种仿真方法不能计算能量选择表面的时域或能域特征,为此,文献^[45]提出了一种场路混合联合仿真的方法,以解决有非线性器件加载的金属网栅阵列的时域特征计算的问题,通过二极管的非线性模型和电磁结构的混合联合仿真得到能量选择表面的非线性响应过程。另一种仿真分析方法是等效电路法^[46],通过分析能量选择表面上的电流电压分布,将电磁结构用集总元件如电感、电容等代替,再用电路仿真的方法得到能量选择表面的电磁响应结果。但是这种方法只适用于结构简单,电磁耦合路径清晰的电磁结构,对于电磁结构复杂的能量选择表面,精确的电路建模比较困难。

在电磁结构设计方面。为了满足各种应用场景的强电磁防护需求,学者们提出了很多新型的能量选择电磁防护结构,并通过仿真和试验对其性能进行了验证。最开始,能量选择表面的设计是由条型^[47]或十字型^[43,48]阵列加载二极管构成,分别应用于线极化天线和圆极化天线前端。当二极管没有被外界电磁场触发时,条型或十字型阵列被二极管分割为独立的单元,此时电磁波可以低损耗通过;当外界电场足以触发二极管开始导通,此时独立的条型或十字型阵列被二极管联通,形成一张完整的金属网,从而对电磁波屏蔽,实现强电磁防护的功能。文献^[41]是在金属网格分析基础上加工的一种网栅型能量选择表面的测试样品和测试结果,通过外加直流电源的方式模拟高功率攻击后二极管导通的测试方法,在0.8 GHz到1.6 GHz实现了能量低通的特性。由于当前能量选择表面的设计大多采用金属结构加载二极管的方式实现,为了探究能量选择表面对高功率电磁辐射的响应机理,文献^[48]中选用PIN二极管通过场路协同仿真的方式研究了能量选择表面的瞬态响应机理,分析了能量选择表面的尖峰泄露,揭示了PIN二极管的I层厚度、少数载流子寿命与能量选择表面瞬态响应时间的关系。此外,军械工程学院的张龙从理论方面研究了不同辐照场强下入射场强和透射场强之间的关系,并通过试验对能量选择表面的防护性能和响应时间进行了研究,提出通过外加偏置的方式加快能量选择表面的响应速度的方案^[49]。这种结构是一种频率低通转高通的电磁结构,即在二极管没有导通时类似于一个频率低通器件,而当二极管导通后自动转变为频率高通特性,适合于L/S波段以下的工作频段。

为了在L波段以上实现低插入损耗和高防护效能的电磁性能,一些谐振型能量选择电磁结构被设计和提出^[46,50-53]。中国船舶重工集团公司第701研究所的邓峰等人,通过在方环孔缝中加载肖特基二极管的方式,在中心频点3.3 GHz的窄带范围内实现了能量低通的特性,当外界电磁波辐照功率小于70 V/m时插入损耗为0.9 dB,当外界电场幅度增加到5 kV/m时,防护效能达到了23 dB^[53]。新加坡国立大学的王朝甫教授团队用同样的结构加载PIN二极管,在中心频点3.8 GHz的窄带范围内实现了18 dB的防护效能^[52]。新加坡南洋理工大学的Lin Zhou和国

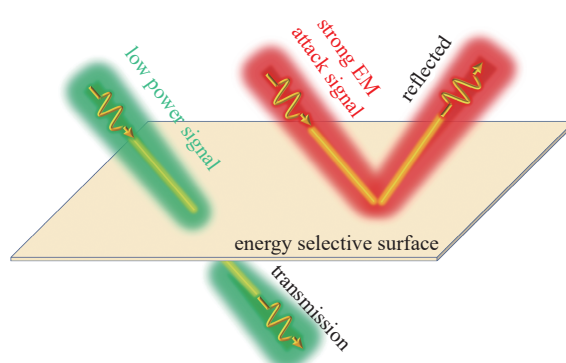


Fig. 5 Schematic diagram of energy selective surface

图5 能量选择表面的工作示意图

防科技大学的虎宁博士利用双谐振的设计方法, 即把能量选择表面在低能量时设计为一个频率带通, 在高功率电磁波来临时设计为频率带阻, 从而同时满足低插入损耗和高防护效能的电磁防护性能^[46,51]。利用双谐振的设计方法, Lin Zhou 在中心频点为 3 GHz 的窄带范围内实现了插入损耗 0.7 dB, 防护效能 24.4 dB 的能量选择表面样件^[51], 虎宁在 5.2 GHz 到 7.2 GHz 范围内设计了插入损耗小于 1 dB, 防护效能大于 30 dB 的测试样件^[46]。此外, 还有中国工程物理研究院的吴欢成利用场路协同仿真的方式研究了单层和双层能量选择表面的瞬态响应, 在 L 波段实现了防护门限 300 V/m, 插入损耗小于 1.6 dB, 防护效能大于 18 dB 的能量低通特性^[54]。山西大学的高扬通过在耶路撒冷十字的两侧臂上加载二极管的方式, 在以 5.3 GHz 为中心的 150 MHz 带宽内仿真得到了 20 dB 的防护效能^[55]。如图 6 所示, 文献 [38] 中利用电磁结构与集总电路之间的等效关系, 设计了一个三层结构实现了从 4 GHz 到 12 GHz 的宽带化防护结构, 在宽带范围内实现了插入损耗小于 1 dB, 防护效能大于 20 dB 的电磁防护特性。进一步, 为了解决现有器件在高频段的寄生效应大, 金属结构加工精度低的问题, 文献 [56] 提出了一种微纳集成化的设计方法, 利用微纳半导体工艺, 将二极管器件与金属结构进行一体化加工设计, 实现了 DC 到 12 GHz 的超宽带能量低通传输特性。

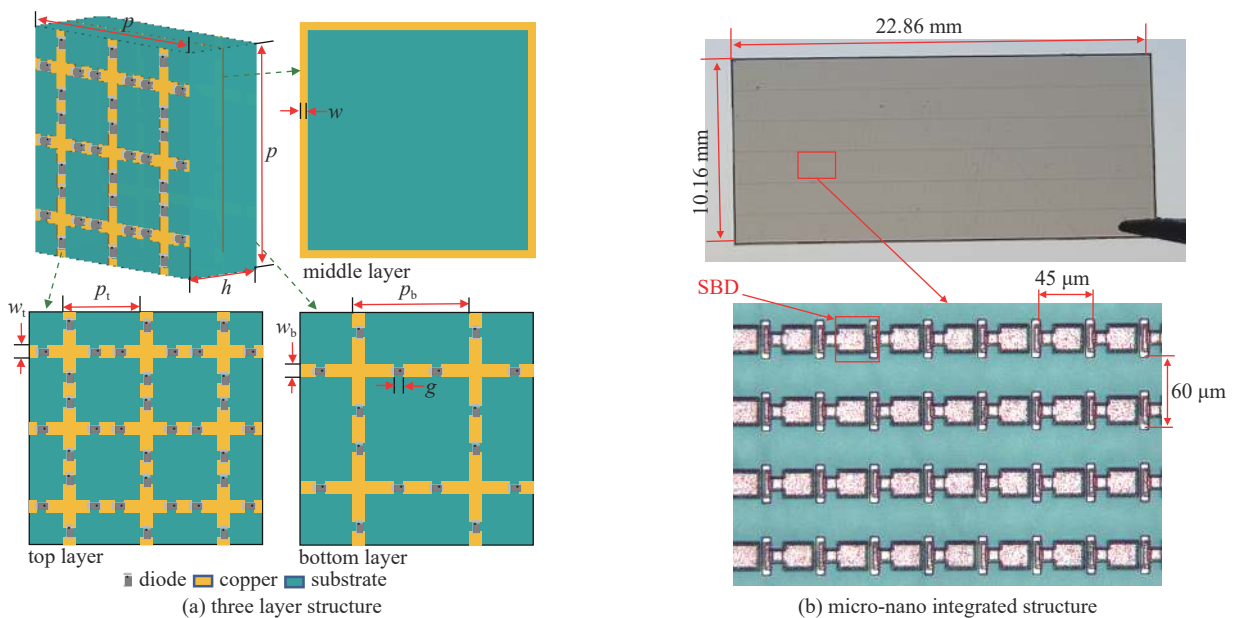


Fig. 6 Two types of ultra wideband energy selective protection structures^[38,56]

图 6 两种超宽带能量选择防护结构^[38,56]

在强电磁防护应用方面。由于能量选择表面的应用场景是加装在天线前端提供强电磁防护功能, 必然对原始天线的工作性能产生影响。为此周奇辉运用场路联合仿真的方法研究了能量选择天线罩对天线方向图和雷达反射截面积的影响, 并分别以一个四元微带天线和一个单极子天线为例开展了能量选择表面与天线一体化设计, 初步验证了能量选择表面在天线前端应用的可行性^[57]。王轲针对北斗导航接收天线的强电磁防护应用需求, 开展了能量选择表面与原天线罩一体化设计的研究, 实现了原天线罩的原位替代如图 7 所示, 并通过测试验证了能量选择防护天线罩对天线的性能、定位精度等关键指标没有显著的影响^[58]。此外, 易波采用三维电磁仿真的方式, 分别研究了高空核爆、超宽带电磁波、高功率微波条件下, 加装能量选择表面的导航天线端口的时域输出波形, 证明了能量选择表面在导航天线前端对瞄准式高功率微波具有较好的防护效果^[59]。



Fig. 7 Strong electromagnetic pulse protective radome for Beidou navigation receiver

图 7 北斗导航接收机的强电磁防护罩

能量选择电磁防护技术除了能量选择表面, 为了适应不同的应用场景, 基于能量选择的工作原理还有能量选择防护天线和能量选择防护插件。能量选择防护天线就是直接在天线端进行器件加载, 使天线具备常规的信号收发能力以外, 还具有强电磁防护的功能。文献 [60] 中通过在阵子天线的馈线上并联 PIN 二极管的方式, 实现了对天线的防护加固, 在 13 kV/m 的高功率辐照环境中其隔离度达到了 19 dB, 但是这种天线对于大功率发射信号同样

会进入防护状态,因此不适用于大功率发射的信息装备前端。而能量选择防护插件,则是指将能量选择表面以插件的形式放置在波导中心,以实现波导的强电磁防护功能^[61-62],因其具有可插拔可更换的能力,适合现有装备中波导端的强电磁防护加固升级,而不需要更换或破坏原有电子系统形态。相比能量选择表面,防护天线和防护插件的研究还不够深入,还需要重点解决防护天线自身的大功率发射问题和提升波导防护插件的耐受功率。

2 电磁防护技术展望

电磁防护技术对基础科学和工程应用都十分依赖,在基础科学需要重点解决关键器件的耐受功率、响应速度等核心技术指标,而在工程应用中则需要重点关注系统级的电磁防护方法应用,因此本文从新型电磁防护技术和系统级电磁防护作一展望。

2.1 新型电磁防护技术

2.1.1 新型屏蔽材料

前文虽然重点论述了射频前端的前门强电磁防护技术,但是对于电子信息系统后门耦合通道的防护同样重要。后门防护主要考虑电磁屏蔽,良好的电磁屏蔽性能可以最大程度减小外界强电磁攻击能量的进入同时也避免系统自身的电磁能量泄露。传统工业中,比如雷达方仓等屏蔽效能可以达到 60 dB 甚至 100 dB 以上,但是这种传统的电磁屏蔽材料存在密度大、体积大、质量重的局限性。因此具有轻质、高效、可共形、耐久性的新型电磁屏蔽材料是下一阶段后门防护材料的研究重点。

新型轻质电磁屏蔽材料的研究主要有碳/聚合物电磁屏蔽材料,金属/聚合物电磁屏蔽材料等。其中碳材料具有高比面积、低密度、低成本、优异的导电性、良好的柔韧性等优点,被广泛应用于电磁屏蔽领域。但是不同维度的碳材料与聚合物复合时,也具有不同的特点。比如:一维碳/聚合物通常具有低密度、高拉升强度和突出的长径比,可以以较少的填充实现导电网络,文献 [63] 中使用质量分数 0.5% 多壁碳纳米管和质量分数 20% 碳纤维作为聚丙烯的填充材料,抗拉升强度提高了 31.14%,屏蔽效能达到了 51.9 dB;二维碳则主要指的是石墨烯材料,具有柔韧性、导热性等优点,文献 [64] 中通过石墨烯/聚吡咯纳米复合材料在实现 33 dB 屏蔽效能的同时也获得了较好的吸波特性,避免了二次电磁反射污染;三维碳则主要指碳泡沫材料,文献 [65] 通过超临界 CO₂ 发泡还原氧化石墨烯-短切碳纤维/环氧树脂制备的屏蔽材料,其屏蔽效能高达 95.5 dB。金属/聚合物则是利用金属材料 and 聚合物进行混合制成的屏蔽材料,文献 [66] 中制备 AgNWs 和聚合物的混合,其平均屏蔽效能达到 41.4 dB 时,同时还具有一定的透光特性,其透光率达到 81.1%。

总的来说,新型轻质电磁屏蔽材料的研究已经取得了较好的电磁屏蔽性能,兼顾了轻质、高效、低成本的特点,同时还具有一些吸波、透光等传统屏蔽材料所不具备的性能,是下一步电磁后门防护加固研究的重点。

2.1.2 新型防护器件

在前门防护中,不论是限幅器还是能量选择电磁防护技术,其中最重要的非线性器件是 PIN 二极管或限幅二极管。在下一步的研究中应该要提高前门防护的耐受功率、加快响应速度、减小插入损耗,需要引进新的防护器件。如高通流、快响应的新型电磁防护器件,最具代表的就是高通流(高焦耳)压敏电阻器,具有响应速度快、工作电压范围广,能够承受较高的电流冲击。相比限幅器和能量选择表面中使用的 PIN 二极管的最大电压从几伏到几十伏,高通流器件的耐受电压通常高达百千伏,瞬间电流达到了千安量级。如东沃电子 3220 系列的高通流贴片压敏电阻的最大峰值电流可以达到 1000 A 以上,4032 系列的最大峰值电流可达 2500 A 以上。如果这种具有高通流、快响应器件可以应用到微波限幅器和能量选择防护技术中,可以大幅度提升强电磁防护的功率耐受能力。另一方面,可以考虑采用电光转换、电声转换等新型器件实现电磁防护加固设计。电光转换元件可以利用光信号频带宽、瞬时带宽大、无电磁干扰等特点,将外界的电磁信号转换为光信号,经过处理后再转换为电信号进行信息处理,只要提高电光转换元件的功率耐受值,就可以保证后端电路免受电磁攻击的威胁。

2.2 系统级防护

电磁防护的终极目的是全面、彻底地解决电磁能量效应问题,从而保证电子信息系统不受强电磁攻击的损伤或损毁。而另一方面,我们当看到,强电磁攻击具有隐蔽突发、大范围等典型特征,其对集成化电子信息系统的攻击效果往往呈现出“由点及面”的态势,任何一个电磁薄弱环节都可能成为强电磁攻击的突破对象。这意味着针对电子信息系统的电磁防护往往存在“短板效应”,任何一个潜在电磁漏洞都可能成为决定防护成败的关键因素,这就给防护工作带来了前所未有的挑战。因此,针对信息化设备的电磁防护必然是一项系统性工程,统筹多种防

护手段, 建立系统级综合防护体系是该领域今后一段时间内发展的总体趋势。可以预见, 未来的电磁防护技术必然会呈现出从单个技术或手段向多技术手段综合的“电磁综合防护”方向发展。

2.2.1 前后门一体防护

前后门一体防护主要从强电磁攻击进入电子设备的不同耦合途径来统筹各类防护技术和方法。根据电磁波的传播耦合特征, 强电磁攻击进入电子设备的潜在耦合通道可分为前门耦合通道和后门耦合通道两类。其中, 前门耦合通道主要泛指电子设备与外界交互的所有信号通道, 包括射频信号通道、光电窗口、传感器等。通常, 对于某一特定的设备, 其信号通道是相对明确的, 故前门防护的对象比较明确。但是, 由于前门耦合通道要兼顾电子设备的工作信号收发, 如何在隔绝强电磁攻击的同时尽量消除对工作信号的影响是前门防护的核心难点所在。目前典型的防护手段包括: 能量选择自适应电磁防护罩、限幅器等。与前门耦合通道的定义相互补, 后门耦合通道则泛指电子设备所有可产生电磁耦合的非信号通道, 包括非金属的机壳、机壳上的孔缝、外接线缆、玻璃视窗、可视化屏幕等。从单纯的技术手段来说, 后门防护要相对简单, 由于其不需要兼顾射频信号的收发, 故而直接采用吸波材料或金属材料隔绝一切电磁信号即可, 典型手段包括: 屏蔽、吸波、滤波、接地等。但是, 考虑到后门耦合通道分布广泛、潜在漏洞多, 如何准确定位所有的潜在后门耦合通道是实际工程应用的难点所在。特别是对于大型的电子信息系统或平台, 想要全方位的梳理出潜在的后门耦合通道是一项十分繁杂的工程问题, 往往需要经过大量的仿真和测试。

图 8 展示了一种典型的前后门一体防护实施方案示意图。从技术体系上来说, 前后门一体的电磁防护是一种完备的电磁防护解决方案, 理论上可在隔绝外部强电磁攻击的同时不影响电子设备的正常工作。但是, 从具体的工程实现角度而言, 该技术方案仍面临着诸多实际问题, 例如: 如何结合防护对象具体形态开展防护总体设计、如何根据防护对象的组成和架构确定实际的防护部位、多种防护手段如何有机搭配实现防护效能最大化、防护手段与防护对象如何进行集成或一体化设计以尽量降低对原本设备形态的影响等。

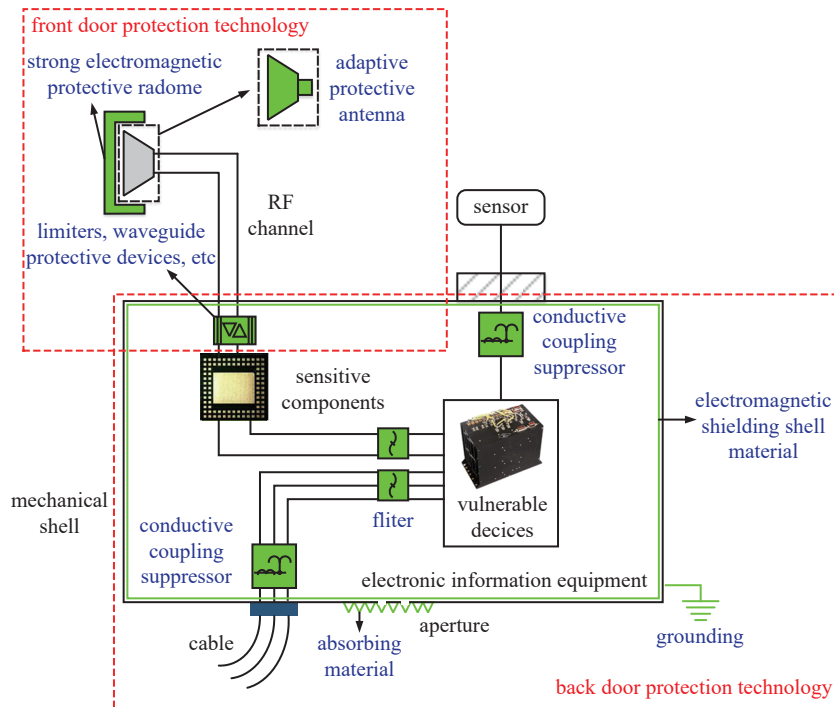


Fig. 8 Front and back doors integrated protection method of electronic information equipment

图 8 电子信息设备前后门综合防护方案

2.2.2 场路一体防护

场路一体防护主要从强电磁攻击在不同环境下的不同表现形态来统筹各类防护技术和方法。其中, 场防护技术主要泛指针对空间波形式的强电磁攻击进行防护, 一般发生在电磁攻击进入电子设备之前。典型的场防护技术包括空间自适应滤波、频率选择滤波、能量选择滤波、屏蔽、吸波等。路防护技术主要泛指针对导行波形式的强电磁攻击进行防护, 一般发生在电磁攻击进入到电子设备之后。典型的路防护技术包括限幅器、脉冲抑制器、频域滤波器等。从单纯的技术体系角度来说, 场路一体的电磁防护也是一种完备的电磁防护解决方案, 理论上可实

现对任意强电磁攻击的有效抑制。但是,在实际的工程实现中,仍然存在诸多难点,例如:如何根据防护对象的结构形态梳理出所有潜在的辐射耦合和传导耦合途径、不同耦合方式下的防护手段如何进行综合设计与指标分配、场防护与路防护如何实现有机结合与优势互补、场防护和路防护手段如何降低对防护对象设备形态和原有工作性能的影响等。

以某一电子设备的射频信号收发通道为例,一种典型的场路集成防护方案如图9所示。其中,“能量选择+频率选择”电磁防护罩、自适应空间滤波等属于空间场层面的防护手段,由于此类防护装置需要直面高强度的电磁攻击,故而防护装置本身对于强电磁攻击的耐受阈值是防护设计所需要关注的重点;而滤波防护器件、限幅防护器件等属于电路层面的防护手段,此类防护装置一般集成于设备的射频通道中,故而防护装置的小型化、信号稳定性、高防护效能等设计关注的重点。另外,在整体的防护方案中,不同的防护手段如何相互配合,谁先谁后、防护指标如何分配等都是需要在实际工程中反复迭代优化的。而这些仅是针对单个射频通道防护所需考虑的问题,若进一步上升到设备层级或者更大的设备系统和设备平台层级,可以想象,其防护设计必然更为复杂。

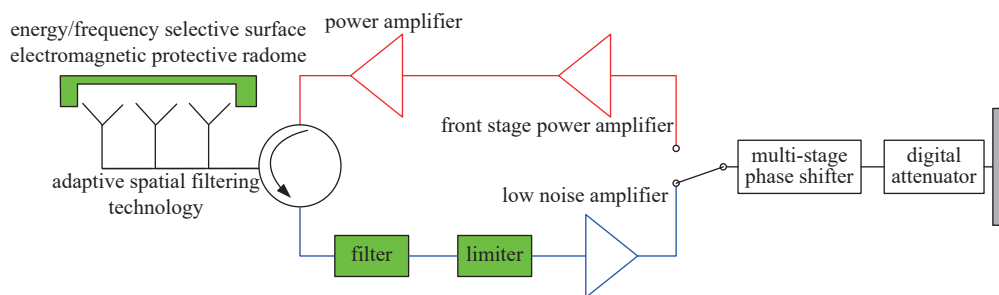


Fig. 9 Field-circuit integrated protection method for transmitting and receiving RF channels

图9 射频收发通道的场路一体防护方案

2.2.3 多域联合防护

多域联合防护的核心思想是从电磁波的时域、空域、频域、能域、极化域、编码域等多个维度出发,基于多域交叉的电磁防护方法,隔绝除工作信号之外的一切电磁信号进入电子设备内部。因此,多域联合防护从理论上讲也是一种完备的电磁防护技术体系。典型地,针对电子设备的射频前端,多域联合防护就是要同时兼顾能量域的强电磁防护和信息域的电磁干扰抑制,通过“能量域+信息域”的双重防护,隔绝所有的外部强电磁能量攻击和干扰电磁信号,从而保证电子设备在复杂强电磁环境下生存和有效工作。这是电子设备电磁防护当前面临的诸多挑战之一。从单纯的技术手段来说,针对单独的电磁干扰或强电磁攻击,目前都有较为成熟的处理方法。然而,如何将不同维度的防护手段进行有机结合,消除相互影响、发挥协同防护效能是防护设计的核心难点所在。以“能量选择+频率选择”防护罩为例,通过“能域+频域”的双重滤波特性,理论上可防护所有的带内/带外强电磁攻击,同时还能够抑制带外的电磁干扰。但是,该防护罩对于带内的电磁干扰信号一般难以有效滤除,还需结合一些信号滤波手段,如空间自适应滤波(空域)、抗饱和和干扰抑制(空域)、极化匹配滤波(极化域)等。在防护设计过程中,如何降低不同维度防护手段的相互影响实现指标最优设计、不同防护手段如何与防护对象的结构形态一体化集成等都是实际工程应用中不可回避的挑战性问题。除此之外,对于一些红外电子设备的光电窗口,如何在保证窗口透光率的同时实现对强电磁攻击的防护也是一种典型的多域交叉防护问题。针对此类问题的防护设计必须从光学、电磁学的角度出发,寻找电磁攻击与光电信号的特征差异性,然后从不同的维度进行区分处理。从上述的分析不难看出,多域联合防护设计的核心就是要找准不同维度的特征差异性,实现功能或指标上的解耦。虽然设计思想比较明确,但在实际工程应用中却是一项富有挑战性的工作,必须以丰富的工程经验为支撑。

3 结 论

本文针对复杂电磁对抗环境中电子信息装备面临的强电磁环境威胁以及防护加固需求,对强电磁防护技术的发展现状进行了综述,并从系统级防护方面对强电磁防护技术进行了展望。首先从电磁波的耦合途径分析了前后门防护技术的难点和重点;然后分别从限幅器技术、频率滤波技术、能量选择防护技术三个方面对前门防护技术的发展现状进行了分析总结。最后,对未来电磁防护技术进行了展望,为了最大程度的提升信息化设备的电磁防护能力,需要统筹多种防护手段,建立系统级综合防护体系。从前后门一体防护、场路一体防护、多域联合防护三个角度对强电磁防护进行了展望,为电子信息装备在复杂电磁环境下的电磁防护加固设计提供了支撑。

参考文献:

- [1] 郑浩月, 贺宇, 何小东, 等. 电控单元强电磁安全威胁分析及电源防护研究[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 073003. (Zheng Haoyue, He Yu, He Xiaodong, et al. Analysis of safety threat from high electromagnetic pulses and power protection research of vehicle electronic control unit[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 073003)
- [2] 刘昌, 李瀚宇, 鲍献丰, 等. 面向超短波接收机射频前端的电磁脉冲效应仿真与效应分级方法[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 123016. (Liu Chang, Li Hanyu, Bao Xianfeng, et al. Electromagnetic pulse effect simulation and rating of RF front-end of super-heterodyne receiver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 123016)
- [3] 宋捷, 鲁祖坤, 刘哲, 等. 卫星导航时域自适应抗干扰技术综述[J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(4): 1164-1176. (Song Jie, Lu Zukun, Liu Zhe, et al. Review on the time-domain interference suppression of navigation receiver[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(4): 1164-1176)
- [4] 许辰人, 马翔天, 徐昊天, 等. 5G 抗干扰技术综述[J]. *电子学报*, 2023, 51(3): 765-778. (Xu Chenren, Ma Xiangtian, Xu Haotian, et al. A survey of 5G anti-interference technology[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(3): 765-778)
- [5] Wang Huida, Song Wei, Xiao Renzhen, et al. A dual-frequency high-power microwave generator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(9): 4287-4291.
- [6] Zhang Haoran, Shu Ting, Li Zhiqiang, et al. A compact 4 GW pulse generator based on pulse forming network-Marx for high-power microwave application[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92: 064707.
- [7] 姚斌. 低噪放电电磁脉冲前后门联合耦合效应研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022. (Yao Bin. Research on the joint coupling effect of front door and back door of electromagnetic pulse on low noise amplifier[D]. Xi'an: Xidian University, 2022)
- [8] 冯寒亮, 武晓龙, 李勇. 美国国会“电磁脉冲攻击对美国的威胁评估委员会”及其评估报告简析[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(6): 132-137. (Feng Hanliang, Wu Xiaolong, Li Yong. Review of the U. S. Congress' commission to assess the threat to the United States from electromagnetic pulse attack and its reports[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(6): 132-137)
- [9] 吴琦, 刘元安, 闻映红, 等. 重大基础设施非核强电磁脉冲威胁与防护策略研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(4): 249-258. (Wu Qi, Liu Yuanan, Wen Yinghong, et al. Non-nuclear electromagnetic pulse threat of critical infrastructures and protection strategies[J]. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, 2022, 24(4): 249-258)
- [10] Arnesen O H, Hoard R. Overview of the European project 'HIPOW' [J]. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2014, 3(4): 64-67.
- [11] Van De Beek S, Dawson J, Flintoft I, et al. Overview of the European project STRUCTURES [J]. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2014, 3(4): 70-79.
- [12] 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)
- [13] 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.
- [14] Li Shifeng, Ma Lijun, Wang Leiyang, et al. High power 10-18 GHz monolithic limiter based on GaAs p-i-n technology[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2022, 32(9): 1107-1110.
- [15] 彭龙新, 李真, 徐波, 等. X 波段 100W GaAs 单片大功率 PIN 限幅器[J]. *固体电子学研究与进展*, 2017, 37(2): 99-102,139. (Peng Longxin, Li Zhen, Xu Bo, et al. 100 W X-band GaAs monolithic high power PIN limiter[J]. *Research & Progress of SSE*, 2017, 37(2): 99-102,139)
- [16] 邓世雄, 高长征, 陈书宾, 等. 小型化大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)
- [17] 毋召锋. 高速大功率限幅技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019. (Wu Zhaofeng. Study of quick-response and high-power limiting technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019)
- [18] 谢彦召, 王赞基, 王群书, 等. 高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(8): 781-787. (Xie Yanzhao, Wang Zanji, Wang Qunshu, et al. High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards: a review[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(8): 781-787)
- [19] Ricketts L W, Bridges J E, Mileta J. EMP radiation and protective techniques[M]. New York: Wiley, 1976.
- [20] 李强兵, 刘丹. 一种电磁脉冲辐射系统设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2021, 19(3): 453-457. (Li Qiangbing, Liu Dan. A design of electromagnetic pulse radiation system[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2021, 19(3): 453-457)
- [21] Lee S, Yoon S, Lee J. Electroformed dual-mode waveguide filter with no tuning screws[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2023, 13(1): 138-141.
- [22] Eskandari A R, Kheirdoost A, Haghparast M. Improvement of passband flatness for a compact, narrowband, and highly selective TM dual-mode filter[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(4): 1591-1597.
- [23] Xu Kaida, Lu Sen, Guo Yingjiang, et al. Quasi-reflectionless filters using simple coupled line and T-shaped microstrip structures[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2022, 6: 54-63.
- [24] Dong Jiancheng, Shi Jin, Xu Kai. Compact wideband differential bandpass filter using coupled microstrip lines and capacitors[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2019, 29(7): 444-446.
- [25] Huang Xiaolong, Zhang Xiuyin, Zhou Liang, et al. Low-loss self-packaged Ka-Band LTCC filter using artificial multimode SIW resonator[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2023, 70(2): 451-455.

- [26] Zhu Haoran, Wang Wentao. High selectivity millimeter-wave on-chip band-pass filter with semi-lumped dual-mode resonator by using GaAs technology[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2023, 44(5): 729-732.
- [27] Xu Kaida, Xia Shengpei, Jiang Yannan, et al. Compact millimeter-wave on-chip dual-band bandpass filter in 0.15- μm GaAs technology[J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2022, 10: 152-156.
- [28] Shen Junyao, Fu Sulei, Su Rongxuan, et al. A low-loss wideband SAW filter with low drift using multilayered structure[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, 43(8): 1371-1374.
- [29] Panwar R, Lee J R. Progress in frequency selective surface-based smart electromagnetic structures: a critical review[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 66: 216-234.
- [30] Reis J R, Caldeirinha R F S, Hammoudeh A, et al. Electronically reconfigurable FSS-inspired transmitarray for 2-D beamsteering[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(9): 4880-4885.
- [31] Tao Keya, Li Bo, Tang Yiming, et al. Analysis and implementation of 3D bandpass frequency selective structure with high frequency selectivity[J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(5): 324-326.
- [32] Cross L W, Almalkawi M J, Devabhaktuni V K. Theory and demonstration of narrowband bent hairpin filters integrated with AC-coupled plasma limiter elements[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(6): 1100-1106.
- [33] Phudpong P, Hunter I C. Frequency-selective limiters using nonlinear bandstop filters[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, 57(1): 157-164.
- [34] 胡飞. 滤波器自击穿效应及 HPM 防护应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2021. (Hu Fei. The self-breakdown effect of filter and HPM protection application[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021)
- [35] 刘墨楠. 腔体滤波器高功率微波击穿特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019. (Liu Monan. Research on high power microwave breakdown characteristics of cavity filter[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019)
- [36] 刘培国, 万双林, 李高升, 等. 一种电磁能量选择表面: 101754668A[P]. 2009-12-31. (Liu Peiguo, Wan Shuanglin, Li Gaosheng, et al. Electromagnetic energy selection surface: 101754668A[P]. 2009-12-31)
- [37] 毋召锋, 徐延林, 刘培国. 超宽带强电磁防护能量选择表面设计[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(3): 179-185. (Wu Zhaofeng, Xu Yanlin, Liu Peiguo. Design of ultra-wideband energy selective surface for protection of high intensity EM fields[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2023, 45(3): 179-185)
- [38] Wu Zhaofeng, Xu Yanlin, Liu Peiguo, et al. An ultra-broadband energy selective surface design method: from filter circuits to metamaterials[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(7): 5865-5873.
- [39] Wu Zhaofeng, Liu Peiguo, Deng Bowen, et al. An ultrabroadband energy selective surface with nonreciprocal performance for HIRF protection[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2023, 65(4): 1202-1210.
- [40] Tian Tao, Huang Xianjun, Cheng Kai, et al. Flexible and reconfigurable frequency selective surface with wide angular stability fabricated with additive manufacturing procedure[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(12): 2428-2432.
- [41] 万双林. 电磁能量选择表面的结构设计及其在强电磁脉冲防护中的应用分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010. (Wan Shuanglin. The design of electromagnetic energy selective surfaces and its applications in high power EMP protection[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010)
- [42] 万双林, 刘培国, 何建国. 金属栅网对线极化电磁波的屏蔽效能研究[J]. 安全与电磁兼容, 2010(2): 66-68. (Wan Shuanglin, Liu Peiguo, He Jianguo. Study on the shielding effectiveness of metal mesh to linear polarized electromagnetic wave[J]. *Safety & EMC*, 2010(2): 66-68)
- [43] 杨成. 能量选择表面防护机理与分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011. (Yang Cheng. Energy selective surface protection mechanism and analysis[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011)
- [44] Goncalves B M F, Afonso M M, Coppoli E H R, et al. Periodic boundary conditions in the natural element method[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, 52(3): 1-4.
- [45] Yang Cheng, Wendt T, De Stefano M, et al. Analysis and optimization of nonlinear diode grids for shielding of enclosures with apertures[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, 63(6): 1884-1895.
- [46] Hu Ning, Zhao Yuting, Zhang Jihong, et al. High-performance energy selective surface based on equivalent circuit design approach[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(6): 4526-4538.
- [47] 刘晨曦. 能量选择表面设计与仿真[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015. (Liu Chenxi. Design and simulation of energy selective surface[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015)
- [48] Yang Cheng, Liu Peiguo, Huang Xianjun. A novel method of energy selective surface for adaptive HPM/EMP protection[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12: 112-115.
- [49] 张龙, 魏光辉, 胡小锋, 等. 能量选择表面材料防护性能研究[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(11): 1165-1170. (Zhang Long, Wei Guanghui, Hu Xiaofeng, et al. Protection ability analysis on energy selective surface[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(11): 1165-1170)
- [50] Chen Zhenzhen, Chen Xing, Xu Guanghui. A spatial power limiter using a nonlinear frequency selective surface[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2018, 28: e21205.
- [51] Zhou Lin, Liu Liangliang, Shen Zhongxiang. High-performance energy selective surface based on the double-resonance concept[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(11): 7658-7666.

- [52] Zhao Chen, Wang Chaofu, Aditya S, et al. Power-dependent frequency-selective surface: concept, design, and experiment[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(5): 3215-3220.
- [53] Deng Feng, Xi Xiujuan, Li Jing, et al. A method of designing a field-controlled active frequency selective surface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 630-633.
- [54] 吴欢成, 胡进光, 钟龙权, 等. 电磁能量选择表面的场路协同仿真与实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 093203. (Wu Huancheng, Hu Jinguang, Zhong Longquan, et al. Field-circuit co-simulation and experiment of electromagnetic energy selective surface[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 093203)
- [55] 高扬, 陈新伟. 一种新型电磁能量选择表面结构与仿真分析[J]. *测试技术学报*, 2021, 35(1): 79-83. (Gao Yang, Chen Xinwei. Structure design and simulation analysis of a novel electromagnetic energy selective surface[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2021, 35(1): 79-83)
- [56] Wu Zhaofeng, Liu Peiguo, Lin Mingtuan, et al. A microwave field-induced nonlinear metamaterial with wafer integration level[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(12): 16189-16197.
- [57] 周奇辉. 能量选择表面研究与天线—体化设计分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016. (Zhou Qihui. Research on energy selective surface and analysis of antenna integrated design[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016)
- [58] 王轲. 能量选择结构设计及导航防护应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2017. (Wang Ke. Research on energy selective structure design and navigation protection application[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017)
- [59] 易波, 李丽英, 陈紫琪. 加载能量选择表面的导航天线强电磁辐射响应研究[J]. *舰船电子对抗*, 2022, 45(6): 95-99. (Yi Bo, Li Liying, Chen Ziqi. Research into strong electromagnetic radiation response of navigation antenna with loaded energy selective surface[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2022, 45(6): 95-99)
- [60] Deng Boweng, Lin Mingtuan, Zhang Jihong, et al. PIN-diode-based high-intensity radiation fields (HIRF) protection of a printed dipole antenna[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, 63(1): 198-205.
- [61] Zhang Jihong, Hu Ning, Wu Zhaofeng, et al. Adaptive high-impedance surface for prevention of waveguide's high-intensity wave[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(11): 7679-7687.
- [62] Zhang Jihong, Lin Mingtuan, Wu Zhaofeng, et al. Energy selective surface with power-dependent transmission coefficient for high-power microwave protection in waveguide[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(4): 2494-2502.
- [63] Kaushal A, Singh V. Excellent electromagnetic interference shielding performance of polypropylene/carbon fiber/multiwalled carbon nanotube nanocomposites[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(6): 3708-3715.
- [64] Gill N, Gupta V, Tomar M, et al. Improved electromagnetic shielding behaviour of graphene encapsulated polypyrrole-graphene nanocomposite in X-band[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 192: 108113.
- [65] Fan Xun, Gao Qiang, Zhang Yu, et al. Anisotropic microcellular epoxy/rGO-SCF aerogel foam with excellent compressibility and superior electromagnetic interference shielding performance[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 230: 109718.
- [66] Qin Feng, Yan Zhiyang, Fan Jinfeng, et al. Highly uniform and stable transparent electromagnetic interference shielding film based on silver nanowire-PEDOT: PSS composite for high power microwave shielding[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2021, 306: 2000607.