

引用格式: 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 Shengquan, DENG Feng, WANG Dongdong, 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.

# 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

郑生全<sup>1,2</sup>, 邓峰<sup>1,2</sup>, 王冬冬<sup>1,2</sup>, 侯冬云<sup>1,2</sup>, 刘培国<sup>3</sup>

1 电磁兼容性重点实验室, 湖北 武汉 430064

2 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

3 国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

**摘要:** 高功率微波电磁脉冲辐射可以通过多种耦合途径进入敏感电子设备和系统, 导致严重的干扰、扰乱甚至损坏, 特别是通过天线耦合进入射频通道的电磁脉冲会破坏敏感器件。给出几种针对天线耦合的空间电磁脉冲场防护以及电路中敏感器件的电磁脉冲路防护新方法, 探讨敏感系统的电磁脉冲场一路综合防护设计方法。利用专门设计的防护表面和防护模块, 分别在天线前端对空间的电磁脉冲场和天线后端电路中的电磁脉冲电压或电流进行抑制, 保护电路中的敏感模块免遭损坏, 增加的场一路综合防护对工作信号的衰减控制在允许的范围之内。通过原理样件的测试表明, 防护方法对带内和带外的高功率微波电磁脉冲具有良好的防护效果。

**关键词:** 高功率微波; 电磁脉冲; 电磁防护; 敏感电子系统; 综述

中图分类号: U665.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2015.02.003

## Overview of the HPM field-circuit integrated protection methods for electronic equipment and system RF-channels

ZHENG Shengquan<sup>1,2</sup>, DENG Feng<sup>1,2</sup>, WANG Dongdong<sup>1,2</sup>, HOU Dongyuan<sup>1,2</sup>, LIU Peiguo<sup>3</sup>

1 Science and Technology on Electromagnetic Compatibility Laboratory, Wuhan 430064, China

2 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

3 College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

**Abstract:** High power microwave electromagnetic pulse radiation may easily be coupled with sensitive electronic equipments and systems through different entrances, resulting in disturbance, break down, or even destruction. Worse still, when the pulse is coupled with antennas, sensitive devices could be destroyed while the pulse enters into RF channels. In this paper, several new protection methods for antennas against space electromagnetic pulse radiation field as well as for sensitive devices in circuit against high pulse voltage or current are investigated. Moreover, the field-circuit integrated with the above protection design methods are proposed. Protection surfaces and modules which lie at the front and rearward of antennas are specially designed to restrain the space electromagnetic pulse field and voltage or current on the circuit, thus protecting sensitive modules from damage. Meanwhile, the attenuation for the operating signal within the circuit is controlled in an allowable range. For validation, samples tests are conducted, indicating that the proposed methods provide descent protection for both in-band and out-band high power microwave electromagnetic pulse.

**Key words:** high power microwave (HPM); electromagnetic pulse; electromagnetic protection; sensitive electronic system; overview

收稿日期: 2014-11-06

网络出版时间: 2015-3-30 15:15:41

基金项目: 国家级重大基础研究项目

作者简介: 郑生全(通信作者), 男, 1970年生, 硕士, 研究员。研究方向: 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。E-mail: zhengshengquan@hotmail.com

## 0 引言

按照国际电工委员会的标准规定,高于100 V/m的电磁环境均为高功率电磁环境(HPEM)<sup>[1]</sup>。典型的高功率电磁环境,除了雷电、静电放电等自然电磁脉冲和雷达、通信等电子设备正常工作时产生的高强度射频辐射外,还包括由高空核爆炸、电磁炸弹、高功率微波源等产生的旨在破坏敌方电子设备的有意电磁辐射。不同电磁脉冲所包含的频谱成分不一样,对电子设备的危害也不一样。高空核爆炸电磁脉冲的覆盖范围和破坏威力最大,爆高40 km时覆盖半径达712 km,主要对基础设施,如电力系统、通信系统、数字设备等构成危害<sup>[2]</sup>。超宽带电磁脉冲与核电磁脉冲损伤效应类似,但是由于其具有更陡峭的上升时间以及更窄的脉冲宽度<sup>[3]</sup>,可以突破很多防护电路,干扰甚至损坏短波、超短波和微波频段电子设备;窄带的高功率微波脉冲拥有较大的脉冲宽度和峰值场强,定向攻击时感应的瞬时大电流能够烧毁电子设备易损器件。

目前,电磁脉冲武器技术已经成熟。从国外公开的几种典型的高功率微波电磁脉冲源的参数可以看出,电磁脉冲武器产生的脉冲场上升时间、脉冲宽度均在纳秒量级,辐射功率达到数十吉瓦(GW)甚至上百吉瓦,在1 km处的场强达到几十千伏每米(kV/m)<sup>[4]</sup>。而对典型装备的照射试验表明,在工作频段内使装备饱和的天线处场强小于1 V/m,使保护器件损坏的天线处场强小于1 kV/m。另一方面,巡航导弹、无人机都可用作电磁脉冲武器的投放平台,使电磁脉冲武器可以近距离对敌电子设备实施攻击,产生更大的破坏,并且可以回收重复利用,大大降低了攻击成本。电磁脉冲武器不仅能攻击敌方的通信、指挥和控制系统,还能用于末端防御,具有以光速传播、照射区域无缝且无需准确瞄准的优势,可干扰、引爆甚至摧毁敌方导弹的导引头和战斗部。因此,电磁脉冲武器将是未来信息化战争中指挥官进行攻击和防御的首选武器。对应的,针对敏感电子信息装备的高功率微波电磁脉冲防护就成为一个迫切需要解决的重大问题。

高功率微波电磁脉冲可通过多种耦合途径进入电子设备内部,对电子设备造成危害,如天线、互连电缆、舱室和机箱的孔缝等<sup>[5]</sup>。但是,能导致电子设备损伤的,主要还是通过收发电磁信号的天线耦合<sup>[6]</sup>。因此,本文将重点探讨敏感系统天线的高功率微波电磁脉冲防护方法。不同工作频

段、不同类型的天线对不同高功率微波电磁脉冲耦合功率大不一样。仿真和试验表明:若辐射场强为50 kV/m,短波/超短波通信天线对超宽带电磁脉冲以及窄带微波天线对带内的窄带高功率微波,耦合感应脉冲电压可达数千伏甚至上万伏;而宽带的微波天线,无论是对超宽带还是窄带电磁脉冲,感应电压均可达到千伏量级<sup>[7-8]</sup>。电磁脉冲进入设备内部的敏感器件后,可以使器件内部局部温度急剧上升,引起熔断和应力损伤。注入试验表明:几十伏的电磁脉冲就可将敏感器件损坏;不仅低噪声放大器、混频器等敏感模块会被损伤,现有设备内的限幅器、滤波器等保护器件在高功率微波电磁脉冲的作用下也会损坏,出现插入损耗增大、噪声系数变坏等永久的破坏效应。

由于现有各种限幅器件的脉冲功率承受能力有限,容易被天线耦合的高功率微波电磁脉冲信号损坏,另一方面,单一的防护方法不足以对设备的敏感模块提供充分的防护;因此,需要针对空间电磁脉冲场和电路中的传导电磁脉冲进行场一路综合防护设计。

## 1 针对天线耦合的电磁脉冲空间“场”防护

由于电路上单个防护器件或防护模块所能承受的脉冲功率远小于天线在高功率微波电磁脉冲场下耦合的脉冲功率,因此,需要在天线前端采用电磁防护罩,即采用分布式方法,对电磁脉冲在进入天线之前进行空间滤波和空间限幅,减小天线的高功率微波电磁脉冲耦合,保护射频前端的防护器件和敏感器件。针对不同电子设备高功率微波电磁脉冲防护需求,可以采用频率选择表面(FSS)和自重构频率选择表面2种不同类型的防护表面作为天线的防护罩。

### 1.1 频率选择防护表面

频率选择表面(图1)是一种二维或三维金属周期结构<sup>[9]</sup>,对通带内的电磁波可以自由穿过,而对通带外的电磁波,则会产生强烈反射。可以利用频率选择表面的选频通过特性,抑制电子设备通带外的高功率微波电磁脉冲,保护射频前端敏感模块免遭损坏。

基于Floquet定理的周期结构中的电磁波传播理论是频率选择表面的理论基础。主要的分析方法有等效电路法、变分法和点匹配法等近似法以及模式匹配法、谱域法和时域有限差分法等全波分析方法。开展频率选择防护表面设计,需要

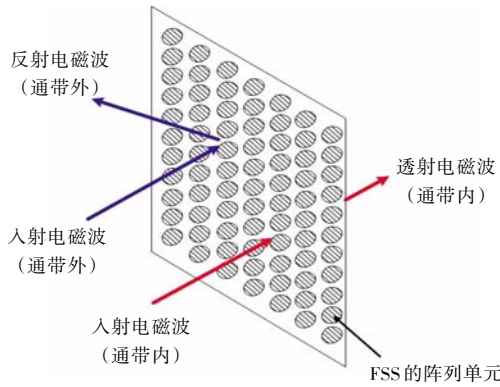


图1 频率选择表面结构示意图

Fig.1 Frequency selective surface structure sketch map

重点考虑多阶谐振、栅瓣和单元尺寸、大角度传输损耗以及功率承受能力等问题。

周期单元尺寸过大,导致频率较低时频率选择表面难以实现。常见的频率选择表面周期单元结构形式包括环形单元、中心连线形单元、板形单元以及组合形单元等,这些单元尺寸约为谐振波长的1/2~1/3<sup>[10-11]</sup>。如果制作一个谐振频率为1 GHz、单元阵列数为100×100的频率选择表面,此时单元尺寸达到10 cm,整个频率选择表面的尺寸可达10 m×10 m,其工程可实现性非常差。

多阶谐振通带距主通带太近会影响防护效果。理想的频率选择表面应该为在设备的工作频带为通带,在工作频段以外全部为阻带。而实际上,除主通带外,还存在多阶谐振通带,频率选择表面在多阶谐振通带处的防护效能消失。出现多阶通带的原因包括:周期单元杂散分布引起高阶谐振,以及过大的单元尺寸导致结构谐振频率过低。

大入射角照射下传输特性恶化,主要表现为中心谐振频率偏移、通带插入损耗增大、通带带宽减小等。主要原因有2个:一是由于单元间距较大导致栅瓣过早出现,压缩了主谐振特性;二是单元尺寸过大,单元内不同部分的电流相位存在明显差异,导致频率选择表面的谐振特性恶化,如图2所示。

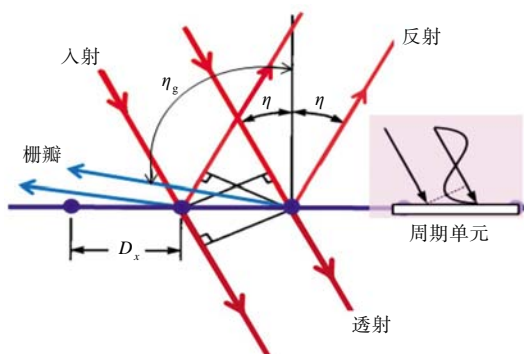


图2 频率选择表面的栅瓣

Fig.2 Grating lobe of frequency selective surface

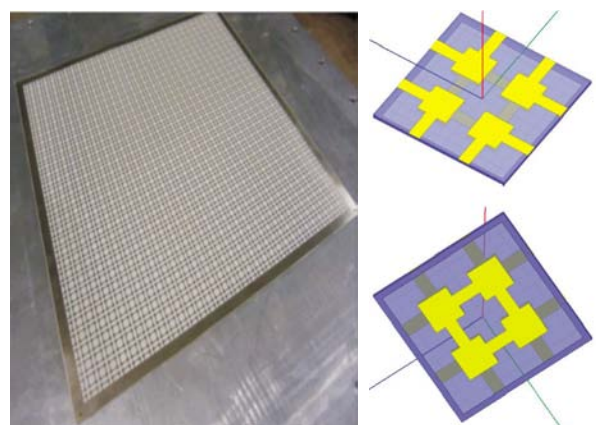
当单元间距  $D_x$  与入射角  $\eta$  满足式(1)时,会产生  $\eta_g$  方向的栅瓣。可见  $D_x$  越大,产生栅瓣的  $\eta$  越小,大角度照射性能越差。

$$\beta D_x (\sin \eta + \sin \eta_g) = 2\pi n \quad (1)$$

功率容量是频率选择防护表面设计需要考虑的重要因素。当空间电磁脉冲场高到一定程度时,会使防护表面击穿损坏。引起击穿的主要原因有2个:一是单元间缝隙电场的加强效应,使周期结构缝隙间的场强远大于入射电磁场,达几十甚至上百倍,形成高场强电场击穿;二是有耗介质和单元电导引起的热击穿。因此,需要控制单元间保持合适的间距,减小单元尺寸,并采用合适的介质进行封闭,同时考虑单元的散热问题。根据通量连续性原理,采用介质封闭可以降低单元间的电场强度。但是,在封闭时不能在芯层与介质层之间留空气间隙,否则起不到保护效果。

采用多面互耦合的方法可以大幅减小频率选择表面的单元尺寸<sup>[12]</sup>。这种方法不同于单面频率选择表面单元间通过边缘耦合形成分布电容,而是通过介质板上、下层金属片之间的面面耦合形成分布电容,可以明显降低谐振频率,由于其结构简单,杂散分布小,能够大大改善栅瓣、高阶谐振等问题。

图3所示为一种L波段的频率选择防护表面原理样件。采用贴片与线条复合互补方式,单元尺寸仅为谐振波长的1/16。仿真分析与测试结果表明,在入射角从0°增大至50°时,其通带插入损耗仅增加0.1 dB,且中心频率基本没有变化。除了1.6 GHz附近为通带外,一直到8 GHz都为阻带,也就是高阶谐振点在9 GHz以上,远离工作通带频率,如图4所示。



(a) 样片

(b) 双面单元的上面和下面

图3 双面互耦频率选择表面样片及其单元形状

Fig.3 Double coupling frequency selective surface sample and its unit shape

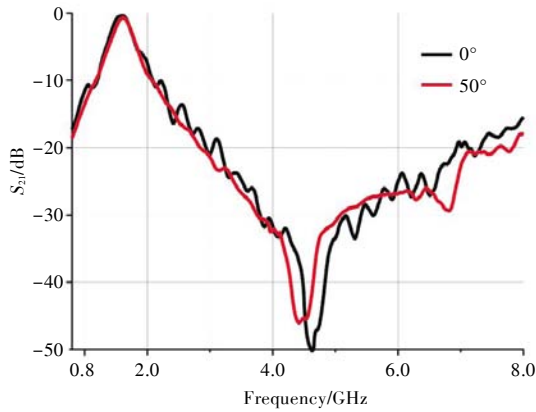


图4 不同入射角下的传输系数测试结果  
Fig.4 The transmission coefficient test results  
in different incidence angles

## 1.2 重构频率选择防护表面

频率选择防护表面相当于空间带通滤波器,能对通带外的高功率微波电磁脉冲起到防护的效果,但对通带内的高功率微波电磁脉冲则无能为力。自重构频率选择表面可以很好地解决通带内的高功率微波电磁脉冲防护问题。其防护原理是,当高功率微波电磁脉冲照射到可重构频率选择表面时,表面上加载的半导体器件在强电场的作用下导通<sup>[13-15]</sup>,改变原有的谐振频率,使其通带位置自动发生移动,让原通带变为阻带,反射强脉冲能量,如图5所示。而当高场强消失后,半导体截止,谐振频率复原,实现自重构。因此,自重构频率选择表面对通带内相对较弱的工作信号可以自由通过,而当通带内的信号达到一定幅值后,就阻止其通过。

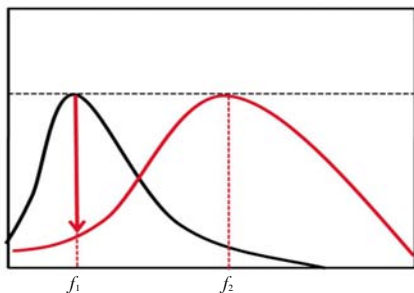


图5 自重构频率选择防护表面防护原理示意图  
Fig.5 The protection principle of self restructure  
frequency selective surface

设计自重构频率选择防护表面时需要考虑2个问题。一是防护启动场强固定,不能同时满足不同的工作需求。对收发共用情况,可能会被天线的辐射场强启动,影响天线正常信号辐射,甚至危及发射机的安全;而对于敏感设备要求防护场强较低时,防护表面可能起不到保护作用。解决方法是在半导体器件两端增加偏置电路<sup>[12]</sup>,调整

导通电压。二是半导体器件附加电容偏大,使得自重构频率选择防护表面在频率较高时难以实现。解决方法是使半导体器件与特殊结构的分布电容串联,降低单元的等效电容,从而提高防护表面的通带频率。

图6所示为研制的某自重构频率选择防护表面的原理样片。通过仿真设计和验证测试,其主谐振频率为3.6 GHz,带内插入损耗0.76 dB,1 dB带宽为200 MHz,在小场强条件下与普通频率选择表面功能相同,如图7所示。

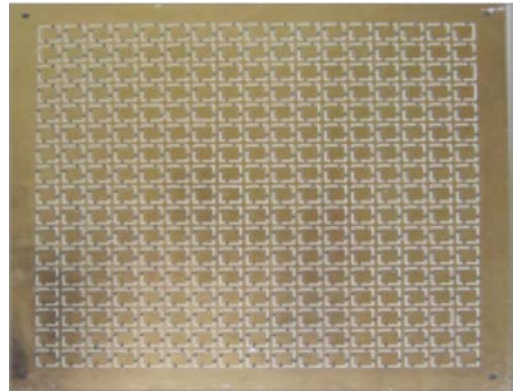


图6 自重构频率选择防护表面原理样件  
Fig.6 The principle sample of a self restructure  
frequency selective protection surface

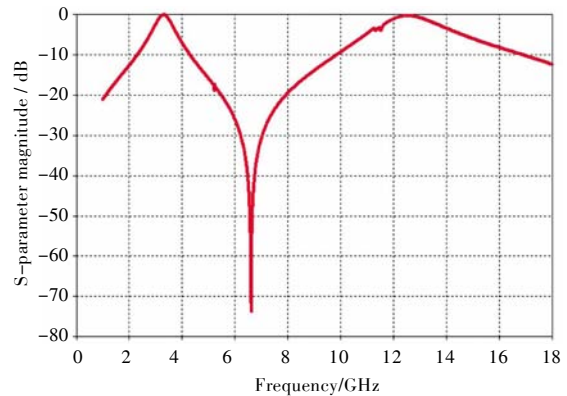
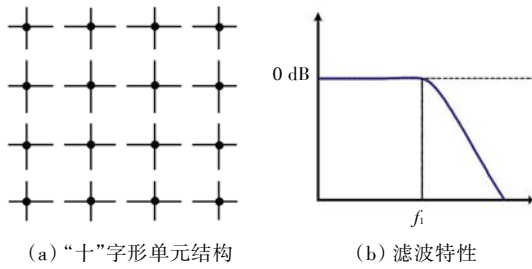


图7 自重构频率选择防护表面正常传输特性  
Fig.7 Transmission characteristic of self restructure  
frequency selective surface in ordinary

进一步采用高功率的微波脉冲场进行测量,当入射脉冲场强低于300 V/m时,透射场强基本无变化;而当入射脉冲场强达到700 V/m时,通带内的插入损耗增大至12 dB;当入射脉冲场强增大到4 000 V/m时,通带内的插入损耗增大至18 dB,可以有效抑制高功率微波电磁脉冲信号。

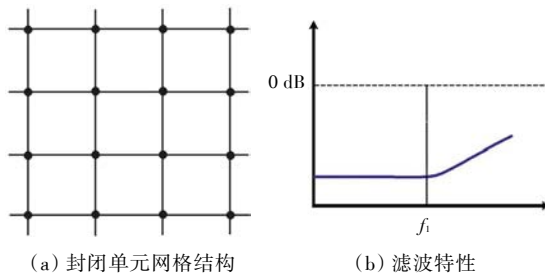
以上关于频率选择防护表面和可重构频率选择防护表面均是基于带通特性的防护表面。事实上,具有低通或高通特性的频率选择表面也可以作为特定频率的电磁脉冲防护表面。“十”字形单元的频率选择表面(图8)具有低通高阻的滤波特

性,它可以用于工作频率较低的接收天线,对较高频率的高功率微波具有较好的抑制效果。而将“十”字形单元的频率选择表面的各单元连接起来形成封闭的网格状表面时,则成为高通低阻的频率选择表面,允许较高频率的电磁波通过,较低频率的电磁波则无法通过,可以用于较高工作频率的微波接收天线,对频率较低的宽带电磁脉冲具有较好的防护作用,如图9所示。



(a) “十”字形单元结构 (b) 滤波特性  
图8 具有“十”字形单元结构的低通频率选择表面

Fig.8 Low pass frequency selective surface which has cross shape unit structure



(a) 封闭单元网格结构 (b) 滤波特性  
图9 具有封闭单元网格结构的高通频率选择表面

Fig.9 High pass frequency selective surface which has close grid shape unit structure

也可以借鉴可重构频率选择防护表面的原理,在“十”字形单元的纵向或横向,或者两个方向的缝隙处用半导体器件连接,当照射场强较小时,频率选择表面呈现单元为“十”字形结构的低通高阻滤波器,正常的工作信号可以自由通过;当照射场强达到一定强度时,由于单元上的感应电压使半导体器件导通,使原先表现为“十”字形单元的低通高阻频率选择表面变为单元间连通的呈网格状的低阻高通频率选择表面,原来的通带变成了阻带,隔离高功率微波电磁脉冲信号;而当高功率微波电磁脉冲场消失后,“十”字形单元上的感应电压降低,半导体器件重新回到断开状态,防护表面又变成了低通高阻的“十”字形频率选择表面。

这种防护表面也称能量选择表面(Energy Selective Surface, ESS),是一种利用强电磁效应改变阻抗特性、实现能量选择的电磁防护表面。图10和图11是采用L波段电磁脉冲场测试能量选择表面原理样片防护效果的波形图。比较两图

可以看出,能量选择表面对于3 455 V/m的电磁脉冲,其防护效果大于17 dB。

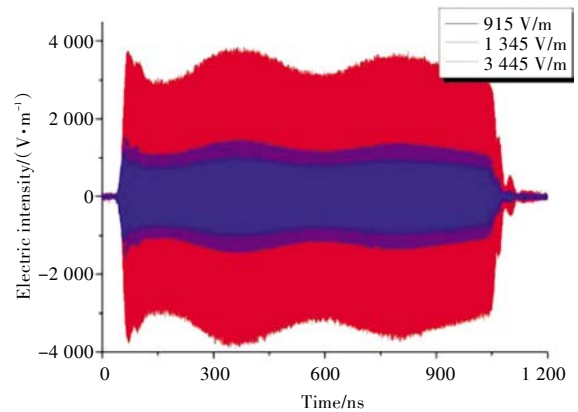


图10 不同强度的入射脉冲场波形  
Fig.10 Incidence pulse field wave shape in different magnitude

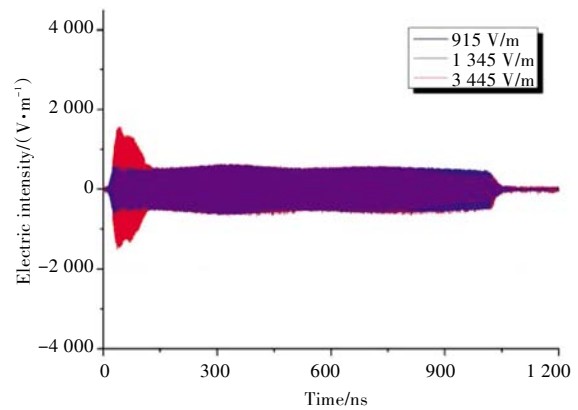


图11 通过能量选择表面后的透射脉冲场波形  
Fig.11 Transmission pulse field wave shape through energy selective surface

## 2 电磁脉冲“路”防护

目前,高功率微波电磁脉冲路防护主要有以下几个难点:一是脉冲防护响应时间不够,防护器件的导通响应时间通常在纳秒甚至几十纳秒,而电磁脉冲的上升时间则在亚纳秒和纳秒量级;二是脉冲功率承受能力不够,主要是器件的通流容量不够<sup>[16]</sup>,在高功率微波电磁脉冲作用下容易损坏。短期内实现器件的全面突破难度较大。因此,需要采取其他措施来应对超快上升沿的高功率微波电磁脉冲对敏感器件的危害。

针对器件响应时间不够的问题,有2种解决方法。一是滤波整形方法。我们知道,波形的上升沿越陡,所包含的高频成分能量越多。在防护模块前端增加一个低通或带通滤波器,抑制电磁脉冲的高频能量后,到达半导体防护器件处的上升沿会变缓。仿真结果表明,对于截止频率为300 MHz的低通滤波器,可以将0.1 ns上升沿的脉冲波形延为2.5 ns,将0.5 ns上升沿的脉冲波形

延为 3 ns。按照这种思路设计的滤波限幅相结合的通信频段防护模块原理样件,经测量表明,在 10 kHz ~ 400 MHz 频率范围内,模块的插入损耗不大于 0.3 dB,对上升时间为 0.3 ns、峰值电压 898 V 的电磁脉冲,防护效果可以达到 38 dB 以上,如图 12~图 14 所示。

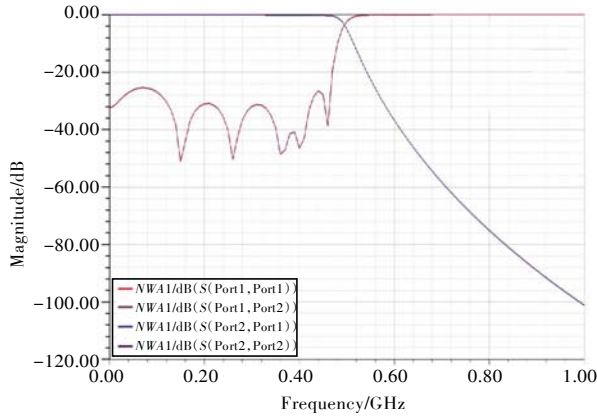


图 12 滤波限幅防护模块的频率传输特性

Fig.12 The frequency transmission characteristic of filter-limitation protection module



图 13 防护模块输入端脉冲(峰值电压 898 V)

Fig.13 Pulse voltage at input end of protection module (peak voltage is 898 V)

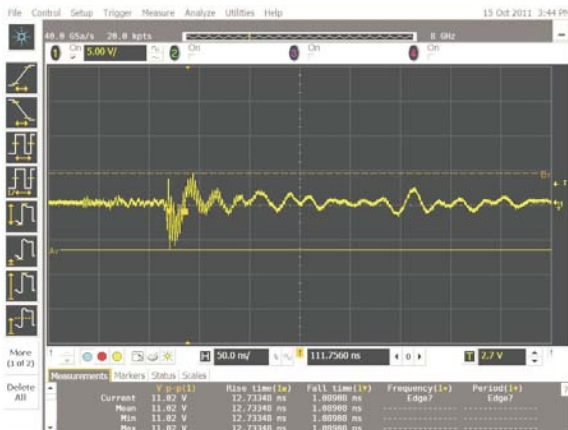


图 14 防护模块输出端脉冲(峰值电压 11 V)

Fig.14 Pulse voltage at output end of protection module (peak voltage is 11 V)

解决响应时间不够的另一个方法是采用延时防护方法。即在主信号通道引入延时线,位于延时线前端的耦合器耦合的脉冲信号经检波电路后提前到达位于延时线后端的控制开关,在主通道上的强脉冲到达开关之前,提前将开关断开,以保护开关后方的敏感电路模块。开关具有一定的延时功能,当电磁脉冲消失后,开关自动恢复,信号通道恢复正常。此种方法存在一定的缺陷,在主信号通道中引入延时线会导致信号通道的插入损耗增大,因此,要尽量减小延时线的长度,或采用精心设计的延时电路来实现。

解决功率承受能力不够的方法有 2 种:一是在防护电路前端加一个大通流容量的放电管,但是其响应时间较慢时对快上升时间的电磁脉冲防护效果较差;二是采用响应时间快、功率容量相对较小的半导体器件阵列,通过并联分布的方式,提高防护模块的功率容量。采用这种方法研制的用于微波频段波导接收通道内的电磁脉冲防护膜片如图 15 所示。

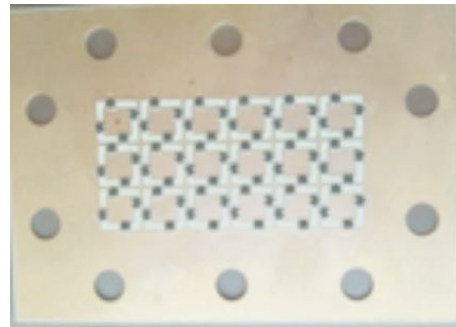


图 15 波导限幅阵列防护膜片原理样件

Fig.15 Principle sample of waveguide limitation array protection flake

通过对防护膜片样件的防护效果测量表明,膜片在通带内插入损耗小于 1 dB,电磁脉冲防护效果大于 20 dB。

### 3 场一路综合防护设计

针对敏感系统射频通道的高功率微波电磁脉冲场一路综合防护设计,其流程如图 16 所示。首先要明确系统可能要应对的电磁脉冲威胁环境,简单的做法就是参照相关的标准要求,如果标准不适用,则需要根据系统在全寿期内可能遇到的电磁脉冲威胁环境进行要求,这是进行系统防护设计的顶层输入要求。通过仿真和试验,可以获得系统的天线在此环境下的耦合脉冲电压或功率,与系统中敏感模块的损伤阈值(可以通过手册查阅,也可以通过注入试验获得)对比后,获得敏感系统射频信号通道的防护总要求。

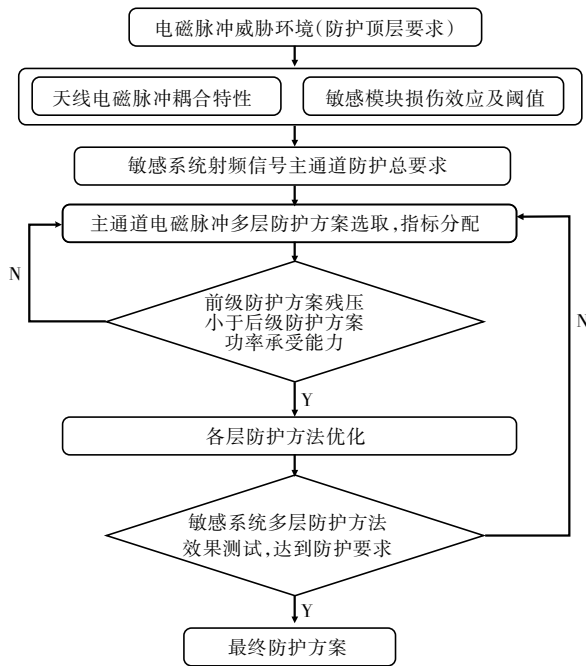


图16 场一路综合防护设计流程图

Fig.16 Flow chart of field-circuit integrated protection design

根据敏感系统射频信号通道的防护总要求以及威胁场环境,按照选取的频率、功率、抑制效果等初步形成多层综合防护方案以及对每一层防护措施指标分配,根据每一层防护措施的输入—输出的传递关系,分析前级防护措施的残压是否小于后级防护措施的最大承受能力,否则,需要重新选取方案和指标分配;在满足传递关系的基础上,优化每一层的具体方案,可以构建原理系统进行防护效果测试,既要满足高功率微波电磁脉冲的防护要求,也要保证防护措施的综合插入损耗在系统允许的工作范围之内,否则,还得继续优化多层防护方案和指标分配,以便最终形成系统的场一路综合防护方案。

举例来说,工作于微波频段的某窄带系统,接收机前端的低噪声放大器输入端能承受的最大功率为20 mW(针对50 Ω系统,电压为1 V),通过仿真分析和模拟测试,该系统的天线对准带内50 kV/m的脉冲场(防护要求)时,天线可以感应到1 000 V的脉冲电压,对带外的电磁脉冲场以及超宽带电磁脉冲的耦合电压远小于带内脉冲场的耦合值。因此,对该系统进行防护设计时,应重点针对带内的微波脉冲场,且场一路综合防护效果至少需要60 dB。根据其工作频率和天线结构、防护要求,拟定的场一路综合防护方案第1级为可重构频率选择表面,防护效果19 dB,可以将照射至天线的空间场从50 kV/m降至5.6 kV/m,此时天线感应的电压约为112 V;第2级选用波导限幅阵列防护膜片,可以将天线感应的脉冲电压再降至

7.3 V,防护抑制效果23.7 dB;此电压仍然高于低噪声放大器的损伤电压,需要再实施第3级防护措施,在低噪声放大器前端采用一个小功率的精密限幅器,将脉冲电压限制在0.7 V以内,防护效果20.4 dB。此时,通过三级的场一路综合防护,对电磁脉冲的抑制效果达到了63 dB,对正常工作信号的插入损耗约1.5 dB,满足了系统的防护设计要求。

## 4 结 语

针对敏感系统射频前端的电磁脉冲攻击可以使射频通道中低噪声放大器、限幅器、混频器等敏感器件的增益降低,插入损耗增大,甚至出现电热击穿等不可恢复的危害效应。采用场一路综合的高功率微波电磁脉冲防护方法,可以有效保护射频前端敏感模块和器件免受高功率微波电磁脉冲的危害。电磁脉冲除了对射频前端构成危害外,通过敏感系统的后门,如连接电缆、机箱的孔缝等途径耦合至电路后,会干扰系统的控制和显示电路,造成系统死机、误动作或控制失灵等严重干扰。因此,针对敏感系统的后门防护也同样重要。

## 参考文献:

- [1] GIRI D V, TESCHE F M. Classification of intentional electromagnetic environments (IEME)[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3):322-328.
- [2] IEC Technical Committee No. 77. IEC 61000-2-11 Electromagnetic compatibility (EMC) -Part 2-11: environment-classification of HEMP environments[S]. International Electrotechnical Commission, 1999.
- [3] BENFORD J, SWEGLE J A. 高功率微波[M]. 吴诗信, 莫伯锦, 译. 成都: 电子科技大学出版社, 1996.
- [4] MIL-STD-464C Electromagnetic environmental effects requirements for systems[S]. Washington: US Department of Defense, 2010.
- [5] 郑生全, 吴晓光, 朱英富. 舰船平台强电磁脉冲威胁与防护要求[J]. 微波学报, 2010, 26(增刊2): 101-104.  
ZHENG Shengquan, WU Xiaoguang, ZHU Yingfu. Electromagnetic pulse threats to ship-flat and requirements of protection[J]. Journal of Microwaves, 2010, 26(Supp 2): 101-104.
- [6] LIU Q F, ZHENG S Q, DENG F, et al. Wideband pulse response of monopole antenna under impact of an EMP[C]//Proceedings of 2011 4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and

- EMC Technologies for Wireless Communications. Beijing: IEEE, 2011: 136–139.
- [7] 赖祖武. 高功率微波及核电磁脉冲的防护问题[J]. 微波学报, 1995, 11(1): 1–8.
- LAI Zuwu. The protection of HPM and NEMP[J]. Journal of Microwaves, 1995, 11(1): 1–8.
- [8] ZHENG S Q, HOU D Y, LIU Q F, et al. Electromagnetic pulse threats to electronic information system and corresponding protection measures [C]//Proceedings of 2011 4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Beijing: IEEE, 2011: 5–10.
- [9] YANG H Y, GONG S X, ZHANG P F, et al. A novel miniaturized frequency selective surface with excellent center frequency stability [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2009, 51(10): 2513–2516.
- [10] YANG G H, ZHANG T, LI W L, et al. A novel stable miniaturized frequency selective surface [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 1018–1021.
- [11] LI W, ZHANG T, YANG G, et al. A novel frequency selective surface with improved miniaturization performance [J]. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2012, 4(3): 108–111.
- [12] PARKER E A, SAVIA S B. Active frequency selective surfaces with ferroelectric substrates [J]. IEE Proceedings – Microwaves, Antennas and Propagation, 2001, 148(2): 103–108.
- [13] CHANG T K, LANGLEY R J, PARKER E A. Active frequency-selective surfaces [J]. IEE Proceedings – Microwaves, Antennas and Propagation, 1996, 143(1): 62–66.
- [14] DENG F. Design of a new kind active frequency selective surface (FSS) [C]//Proceedings of 2013 IEEE 5th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Chengdu: IEEE, 2013: 332–334.
- [15] 杨成, 黄贤俊, 刘培国. 基于压控导电结构的能量选择表面防护机理和仿真实验研究[J]. 中国舰船研究, 2012, 7(3): 98–103.
- YANG Cheng, HUANG Xianjun, LIU Peigu. Protection and simulation of energy selective surface based on voltage conductive structure [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2012, 7(3): 98–103.
- [16] DENG F, DING F, ZHENG S Q. Research on FREMP protection module in RF channel of HF/VHF band [C]//Proceedings of 2011 4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Beijing: IEEE, 2011: 520–523.

[责任编辑: 易基圣]