

超宽带强电磁防护能量选择表面设计*

毋召锋,徐延林,刘培国

(国防科技大学电子科学学院,湖南长沙 410073)

摘要:为应对强电磁脉冲对电子信息系统的威胁,设计了一种具备收发兼容特性的超宽带强电磁防护能量选择表面,有效拓展了能量选择表面的工作带宽和工作频率,可为L、S、C波段的超宽带用频装备提供不低于14 dB的防护效果。该能量选择表面是一种周期结构,每个单元包含一对箭头形结构和一个开关二极管,可根据外界辐照电磁波的能量密度自适应切换反射或透波状态,从而实现强电磁防护与工作信号收发兼容。仿真研究表明,这一新型能量选择表面在L、S、C波段的插入损耗小于1 dB,强电磁防护能力达到22 dB。在波导中对设计的样件进行了性能验证,结果显示,该样件在波导中的平均插入损耗为1 dB,防护能力达到了14 dB,初步验证了设计结构的低插入损耗和高防护特性。

关键词:超材料;强电磁脉冲防护;能量选择表面;二极管阵列;超宽带

中图分类号:TN97 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)03-179-07



听语音
与作者互动
聊科研

Design of ultra-wideband energy selective surface for protection of high intensity EM fields

WU Zhaofeng, XU Yanlin, LIU Peiguo

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

Abstract: In order to deal with the threat of strong electromagnetic pulses to electronic information systems, an ultra-wideband strong ESS (energy selection surface) with transceiver compatibility was designed, which can effectively expand the operating bandwidth and frequency of the ESS, and can provide no less than 14 dB protection effect in L、S、C-band. The ESS was a periodic structure, with each unit containing a pair of arrow shaped structures and a switching diode. It can adaptively switch the reflection or transmission state according to the energy density of external irradiated electromagnetic waves, thereby achieving strong electromagnetic protection and compatibility with working signal transmission and reception. Simulation research shows that the insertion loss of this new ESS in the L、S、C band is less than 1 dB, and its protection effectiveness reaches 22 dB. Finally, the performance of the designed sample was verified in the waveguide. Results show that the average insertion loss of the sample in the waveguide is 1 dB, and the protection effectiveness reaches 14 dB, which preliminarily verifies the low insertion loss and high protection effectiveness of the designed structure.

Keywords: metamaterials; strong electromagnetic pulse protection; energy selective surface; diode array; ultra-wideband

近年来,随着信息技术的深度发展,各种军用电子信息系统的集成化、智能化程度越来越高。这种高度集成化的军用武器系统或平台在性能、体积、功耗方面均有极大的优势,但与此同时却大大增加了其对于强电磁脉冲攻击的敏感度和易损性。特别是随着高功率电磁脉冲技术的不断发展成熟,强电磁脉冲武器成为现今集成化军用平台或系统的“头号杀手”^[1]。有学者在对全球高功率微波武器专利梳理的基础上指出,在军事需求与技术进步的共同驱动下,高功率微波武器技术

发展迅速,正朝着小型化、脉冲参数可调化、高功率辐射、高机动性等方向发展^[2]。高功率微波可以通过天线、电缆等耦合途径进入电子信息系统,造成内部半导体器件击穿、器件毁伤,故而已经对雷达^[3]、导航接收机^[4]、通信设备^[5]等典型电子信息系统构成了严重的现实电磁威胁,亟须发展有针对性的强电磁防护手段。

根据电磁波的耦合途径,常规的电磁防护手段可以分为前门防护和后门防护两类^[6]。其中,后门防护主要针对设备的线缆、机壳孔缝等后门

* 收稿日期:2021-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62101564);湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ20045)

作者简介:毋召锋(1995—),男,陕西宝鸡人,博士研究生,E-mail:wuzhaofeng13@nudt.edu.cn;

徐延林(通信作者),男,安徽天长人,讲师,博士,E-mail:13298656824@163.com

耦合途径,通常采用屏蔽、滤波、接地等技术手段阻止高功率微波进入电子设备内部;前门防护则针对电子信息系统的电磁信号传输通路采取防护措施,防止高功率微波进入设备内部,主要有滤波^[7]、限幅^[8]、防护电路^[9]等技术手段。但是,当高功率微波能量集中于设备的工作频带内时,电子系统对强电磁攻击信号的防护与正常工作信号的收发兼容成为前门防护设计的难题。为了解决这一矛盾性问题,刘培国等^[10]提出了一种具有能量选择特性的电磁防护表面,对电磁波具有能量域的低通特性,该表面允许正常信号的收发,阻止高功率电磁脉冲的通过。随后,有学者针对能量选择表面的工作机理^[11]、结构设计^[12]、性能设计^[13-14]、实验方法研究^[15-16]等开展了一系列工作,证明了能量选择表面对于强电磁攻击威胁具有有效的防护能力。

能量选择表面最初的结构比较简单,就是在条形金属栅格上加载 PIN 二极管,通过外部辐照场强控制 PIN 二极管的通断来实现针对线极化天线的强电磁防护^[10];随后,为了进一步扩展这一结构的应用范围,有学者先后设计了具备圆极化特性的十字结构^[16]和环形结构^[17],具备宽带特性的双层结构^[18]等,极大扩展了能量选择表面的种类。另外,基于能量选择这一防护机理,Zhang 等^[19]还针对性设计了一些具有强电磁防护功能的波导防护器件。然而,目前较为成熟且经过试验验证的能量选择表面工作频率大多在 L 波段或者耐受场强较低。

本文在传统能量选择表面的设计基础上,将频率选择结构^[20]引入能量选择表面的设计思想,通过加载高频开关二极管大幅度提升了传统能量选择表面的工作频率上限和工作带宽。基于这一设计思路,设计并加工制作了一种箭头形超宽带能量选择表面,仿真和实测结果表明,仿真条件下,实现了覆盖 L、S、C 频段的超宽带低插入损耗(平均小于 1 dB),防护性能大于 22 dB;波导测试条件下,在 L、S 波段平均插入损耗为 1 dB,防护能力达到了 14 dB,初步验证了本文所设计结构低插入损耗和高防护的特性。

1 单元结构与仿真

1.1 单元结构设计

能量选择防护表面的核心实际上是一种具备波阻抗非线性变换能力的电磁结构,自然界中一些具备非线性电磁特征参数的天然材料二氧化

钒、石墨烯等在理论上都可以为能量选择自适应防护装置的设计提供支撑,但是其存在响应速度慢、设计难度大等问题,而人工电磁材料为能量选择表面的设计带来了新的契机。能量选择表面的工作原理和理论分析已经比较完备^[10-13],本文基于这些原理设计了一种新型的箭头形结构。

能量选择表面的基本单元结构如图 1 所示,主要包含两个反向放置的箭头形金属结构,中间缝隙由二极管连接。其中,中间缝隙宽度由加载的二极管的封装尺寸决定,记为 d 。

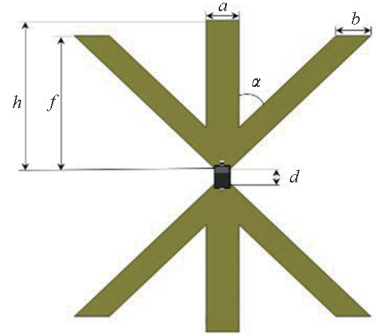


图 1 单元结构模型

Fig. 1 Unit structure model

当外界强电磁脉冲辐照到该表面时,将在上下两个金属之间感应出较强的电场,当感应出来的电场足以使二极管导通时,二极管由高阻状态变为低阻状态,连通上下两个金属枝节。此时,上下金属结构相对于入射波而言就是一个由低阻元件连接的整体,感应出来的电流就可以在整个表面流动,从而形成一个完整的金属网格对入射的强电磁脉冲进行屏蔽。当外界的电磁信号比较弱时,不能使二极管导通,此时整个结构就是一个个离散的金屬网格,呈现透波特性,从而使入射电磁波低损耗通过。

1.2 周期单元仿真

为了探究单元结构的透波特性和防护特性,首先基于三维电磁场仿真软件计算机仿真技术(computer simulation technology, CST)微波工作室的频域求解器对单元结构进行无限大周期仿真,边界条件设置为 Fluent 周期边界,单元周期为 q ,仿真模型和边界设置见图 2,对应的结构参数见表 1。

在仿真中,一般将二极管等效为集总元件的串并联来简化仿真或者使用二极管的 S 参数来代替实际的二极管。这里将二极管等效为集总元件,即当二极管导通时等效为一个小电阻和引线电感的串联,当二极管关闭时为一个电容与引线电感的串联^[21]。

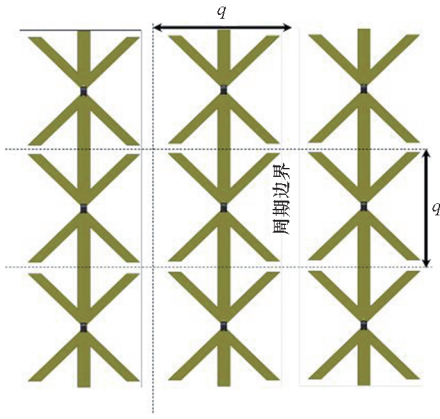


图2 理想周期边界仿真示意图

Fig. 2 Simulation diagram of ideal periodic boundary

表1 结构的尺寸参数

Tab. 1 Dimensional parameters of the structure

参数	仿真数值
a/mm	0.4
b/mm	0.42
d/mm	0.2
f/mm	1.7
h/mm	1.9
$\alpha/(\text{^\circ})$	45
q/mm	4

当二极管处于关断状态时,整个能量选择表面表现为透波模式,此时二极管总的电容会对透波的插入损耗产生较大影响,图3是不同等效电容下的插入损耗仿真结果。从图中可以看出,二极管电容越小,其在高频段的插入损耗越小,透波率越好,这是因为小电容的二极管对上下金属感应的电磁波具有较好的隔离作用。

当二极管处于导通状态时,整个能量选择表面切换为屏蔽模式,此时二极管等效为一个连接上下金属结构的小电阻。图4仿真了不同等效电阻值对屏蔽效果的影响,从图中可以看出导通电阻对屏蔽效果的影响比较小,电阻值从0.1~5Ω变化,屏蔽效能基本保持不变。

从上述分析可以看出,二极管的选择对能量选择表面的插入损耗有较大影响。首先应该选择具有小结电容的二极管,其次是对前向导通阻值比较小的二极管进行设计。本文选择MACOM公司的开关二极管,根据手册这款二极管的结电容只有0.018 pF,可以满足设计要求。

场路联合仿真按照真实的物理时空关系进行

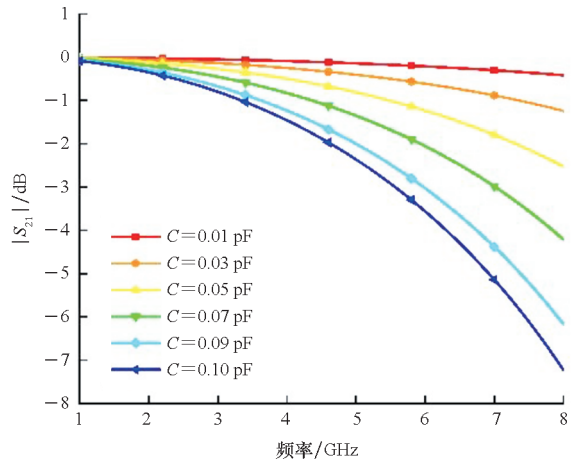


图3 插入损耗与二极管等效电容的关系

Fig. 3 Relationship between insertion loss and equivalent capacitance of diode

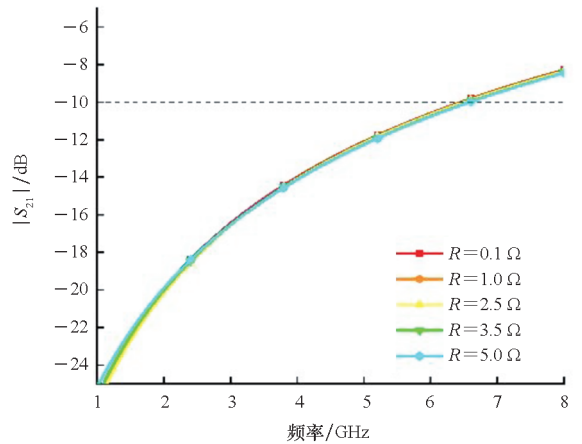


图4 防护效能随二极管导通电阻的变化关系

Fig. 4 Relationship between protection effectiveness and resistance of diode

仿真,而非场路分离的方法,这就使得仿真结果更加贴合实际,并在仿真过程中直接考虑了电路器件与电磁场的耦合^[11,15]。使用场路联合仿真,直接利用数据手册中二极管的S参数与金属结构联合仿真可以得到较为准确的仿真结果。场路联合仿真所选二极管在不同偏置电压电流下的S参数如图5所示,金属结构的仿真尺寸与表1中保持一致,分别用不同电流条件下的二极管S参数来等效关闭状态和导通状态的二极管进行仿真。

图6是场路联合仿真的计算结果,从图中可以看出二极管在不同的电压电流偏置下具有不同的传输系数。当电压为-5 V和0 V时,二极管中没有电流流过,此时二极管没有导通,设计的单元结构表现为低插入损耗的透波结构。从图6中可以看出,当二极管中的电流逐渐增大时,就会呈现对强电磁信号的屏蔽,当电流为5 mA时,二极

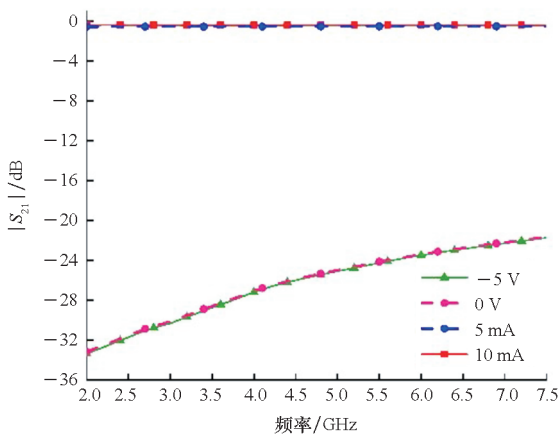


图 5 二极管在不同偏置下的传输曲线

Fig. 5 Transmission curve of diode with different DC bias

管已经导通,此时具有最大的屏蔽效能。同时,从图中的仿真曲线来看,偏置电压 -5 V 和 0 V 的曲线基本重合,导通电流 5 mA 和 10 mA 的曲线基本重合,这说明只要二极管完全导通或者关断时,结构的传输系数与二极管两端的电压和电流大小无关。

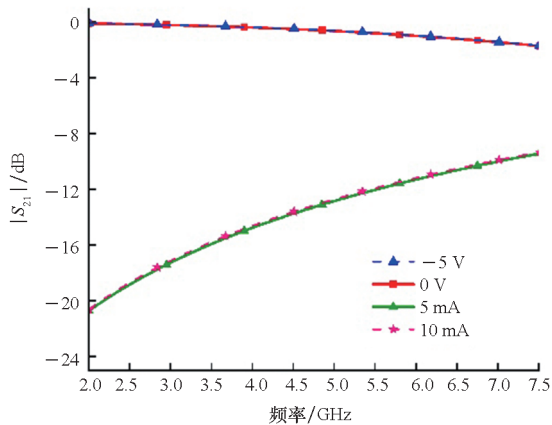


图 6 场路联合仿真传输曲线

Fig. 6 Transmission curve of field and circuit co-simulation

从以上仿真可以看出,不论是将开关二极管等效为集总元件还是使用场路联合仿真,都能够证明所设计的能量选择表面可以用于强电磁防护。

2 波导内有限边界设计与仿真

2.1 有限边界设计

实际加工制作的能量选择表面不可能是无限周期,需要根据实际使用场景和实验条件来确定整个表面的尺寸和形状。有限大与无限大周期边界的不同主要有两点:一是靠近边界的单元结构具有边界效应,二是二极管是电流导通型半导体

器件,需要提供直流回路来使二极管处于稳定的导通状态。当整个表面比较大或者电磁场的主要能量不在边界处时,可以忽略边界效应的影响。因此,这里只考虑二极管直流回路的完整性设计。

图 7 是有限边界的设计示意图,在整个能量选择表面的外围添加了一个矩形的金属框,将整个二极管阵列的正负极直接连接起来。当二极管导通后,电流可以沿着外围的金属框由正极流向负极,从而形成一个完整的直流回路。由于实际使用中,可能有个别二极管损坏或者焊接不可靠,从而使这个二极管所在的一整列都无法形成完整的直流回路,影响导通后的强电磁防护能力。因此,在外围边框的基础上,将每个二极管都通过中间导线连接到一起,即所有二极管都有自己单独的直流回路,不会被其他二极管影响,这样具有更高的可靠性。

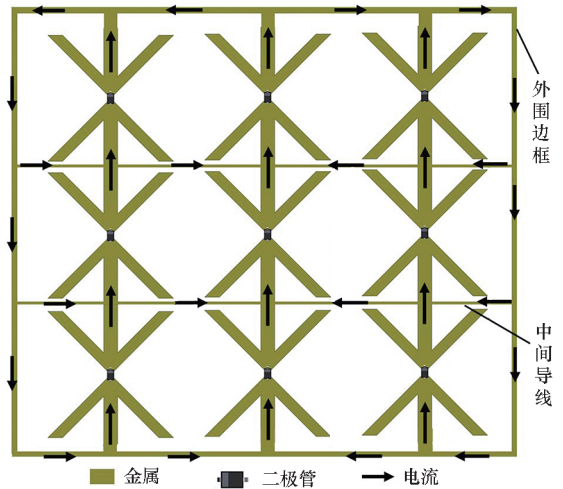


图 7 有限边界设计示意图

Fig. 7 Diagram of limited boundary design

2.2 波导内有限边界仿真

为了测试有界模型的防护性能,需要模拟一个强电磁辐照的环境。在波导内容易获得较大的电场强度,用于验证设计的能量选择表面。在实际测试前,将上节设计的有界模型放置到波导中进行仿真。波导选择 $1.72 \sim 2.61\text{ GHz}$,内壁尺寸为 $109\text{ mm} \times 54\text{ mm}$ 。在 CST 的微波工作室中,建立波导模型,采用时域计算工具,其仿真模型如图 8 所示,设计的模型将波导的上下金属内壁进行电连接,利用波导金属壁为二极管提供直流回路。

用电磁全波仿真软件计算二极管在关断和导通两种状态时波导的传输系数,仿真结果如图 9 所示。从图 9 的仿真结果可以看出,当二极管关断时,波导中的插入损耗和无限大周期结构的仿

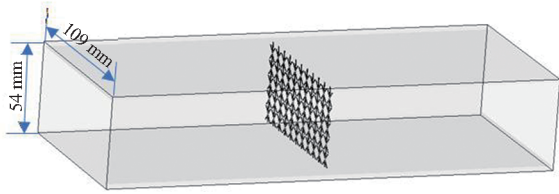


图8 波导仿真模型

Fig. 8 Simulation model in waveguide

真结果有所增大;当二极管导通时,屏蔽防护性能变好。但是从整体上看,在波导中设计的能量选择表面依然可以满足小信号传输和强电磁防护的性能。因此,设计的结构可以在波导中进行测试。

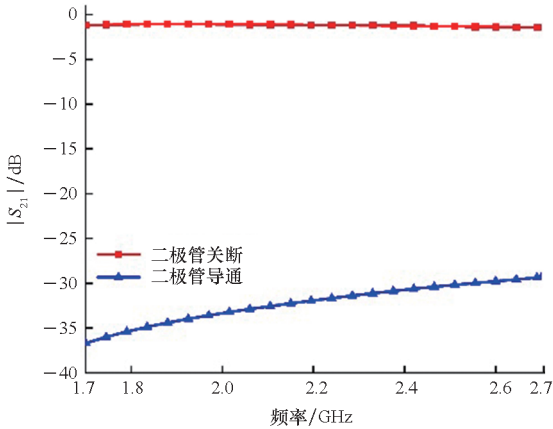


图9 能量选择表面在波导中的仿真结果

Fig. 9 Simulation results of energy selective surface in waveguide

3 透波特性和防护特性测试

为了验证提出的新型能量选择表面可以实现强电磁防护与信号正常收发的兼容性,即对小信号有良好的透波特性,对大功率信号有隔离作用。在标准波导 BJ22(内壁 109 mm × 54 mm,工作频率 1.72 ~ 2.61 GHz)内,加工制作了一个能量选择表面样品,波导内进行插入损耗和防护性能的测试。图 10 是使用柔性介质基板(FPC 基板)加工的一个波导内能量选择表面测试样品,外围金属边框与波导的法兰边尺寸一致,通过波导法兰可以更好地与波导壁进行电连接。

小信号测试直接使用矢量网络分析仪,测试安装有能量选择表面波导的插入损耗就可以得到加工的样品在波导内的透波特性。防护性能测试则需要用到信号源、功率放大器、频谱仪以及防止功率反射保护功放的隔离器,通过测量注入波导与透过能量选择表面后的能量就可以计算出屏蔽性能。测试连接方式如图 11 所示,同时可以用定向耦合器监测注入的功率和反射功率。

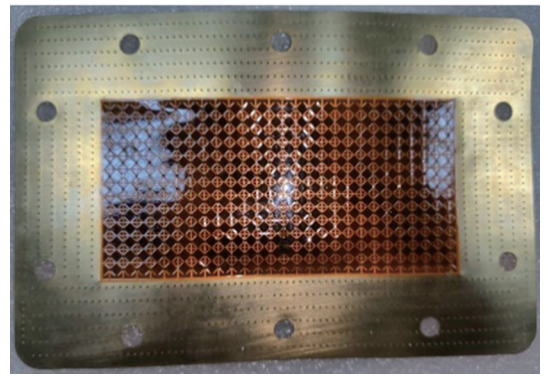


图10 能量选择表面波导样件

Fig. 10 Prototype of energy selective surface in waveguide

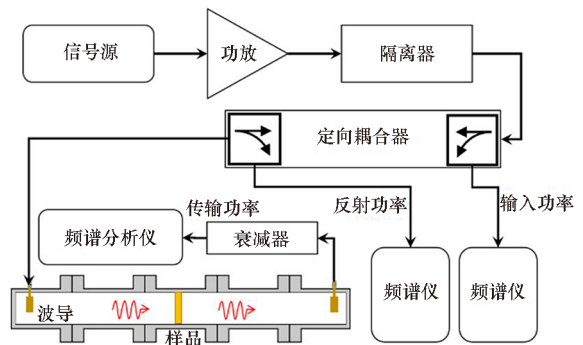


图11 大功率注入测试连接框图

Fig. 11 High power injection test connection block diagram

3.1 小信号透波特性测试

利用矢量网络分析仪测试加工的样品在波导中的插入损耗,输入功率为 -20 dBm。可以得到在整个频段内插入损耗如图 12 所示。从图中可以看出,设计的样品在 1.7 GHz 到 6 GHz 的插入损耗最小有 0.2 dB,最大有 1.4 dB。因此,设计的样品在波导中对小功率信号具有较好的透波特性。

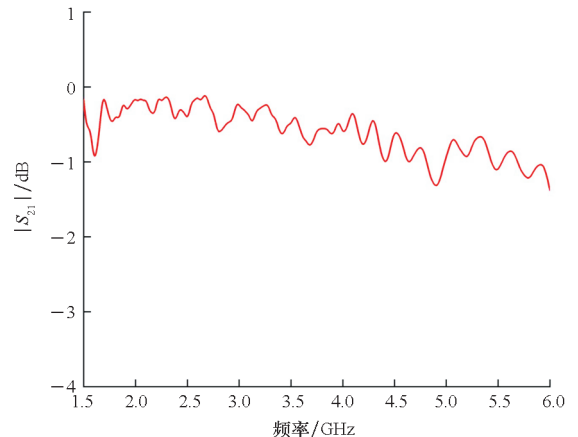


图12 小信号插入损耗测试曲线

Fig. 12 Small signal insertion loss test curve

3.2 大功率注入防护特性测试与结果分析

大功率防护性能测试按照图 11 中的连接方式进行测试。逐渐增大信号源的输出功率,直至功率放大器接近饱和。测量透过能量选择表面的功率随着输入功率增大的变化,可以计算出在不同入射功率下的屏蔽效能。通过波导中 TE₁₀ 主模的功率计算公式可以计算出波导中心位置的场强峰值。

$$P = \frac{abE^2}{4\eta} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}$$

式中, P 为注入波导的电磁波功率, a 和 b 分别为波导内壁的长和宽, E 为波导正中间的电场, η 为波阻抗, λ 为电磁波的波长。

测试结果如图 13 所示,当注入功率小于 31 dBm(0.62 kV/m)时,信号以较小的损耗通过波导;当输入功率达到 34 dBm(0.89 kV/m)时二极管已经开始导通,此时对信号的屏蔽性能在 4 dB 左右;随着注入功率的增大,屏蔽效能随着增加,当注入功率达到 46 dBm(3.5 kV/m)时,屏蔽效能平均有 14 dB。由于在 46 dBm 时,功率放大器已经接近饱和,因此没有进一步增大注入功率。从测试结果已经可以看出,设计的样件在小功率时呈现透波性能,在大功率时呈现屏蔽性能。

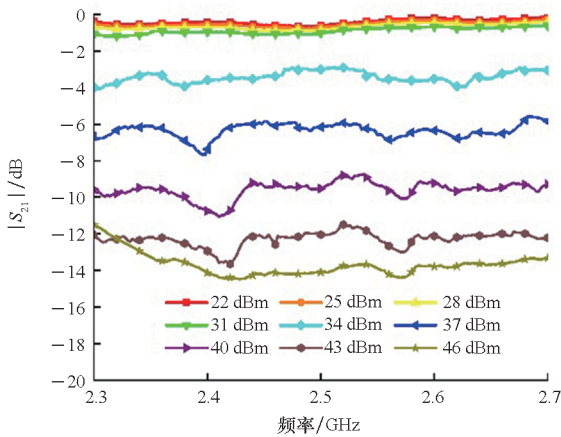


图 13 波导中不同功率注入时的屏蔽效能
Fig. 13 Shielding effectiveness of waveguide with different power injection

从大功率注入实验结果来看,设计的新型能量选择表面在空间电场小于 0.6 kV/m 时,处于透波状态;当空间电场大于 0.9 kV/m 时,二极管开始工作,能量选择表面起到防护作用,即该能量选择表面的防护门限为 0.9 kV/m。

这里测试的屏蔽效能与图 9 的仿真结果(35 dB)相比要小,主要原因是波导中电场的均匀性以及注入功率不够大。矩形波导中的主模

是 TE₁₀ 模,简单描述就是电场在波导中间位置场强大而在两边小,靠近窄边金属壁处的电场最小为 0。为了简便,在图 9 仿真中假设所有阵列中的二极管同时导通,因此具有 35 dB 的屏蔽效能。实际测试中,由于波导中电场的均匀,阵列中二极管随着注入功率的增大从最中间到两侧依次导通,也就出现了图 13 测试的中间态。

加工的样件一共有 27 列周期阵列,由于波导中电场主要集中在中间位置,因此靠近中间列的二极管最先导通。设最先导通中间的二极管列数为 N ,在波导中进行了仿真,其结果如图 14 所示。从图中可以看出,随着二极管导通列数 N 的增加,屏蔽效能是在不断增加的。图 13 的仿真结果与 $N=9$ 的曲线比较类似,也就说明实验注入波导中的能量只能使靠近中间的 9 列单元阵列导通。若注入功率进一步增大,则实验测试到的屏蔽效能会更大。

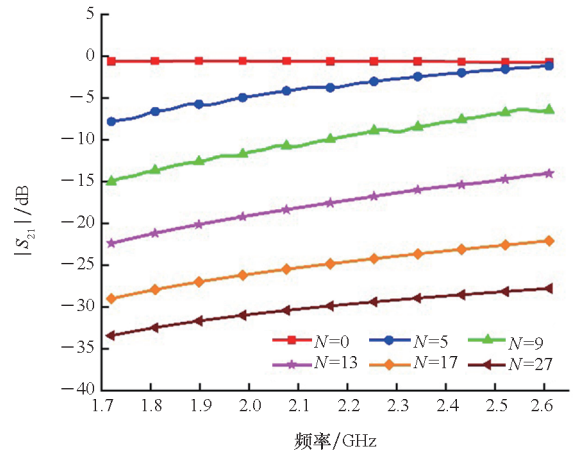


图 14 屏蔽效能随二极管导通列数的变化
Fig. 14 Variation of shielding effectiveness with the number of conducting columns of diodes

4 结论

本文通过加载二极管的方法,将典型的频率选择表面设计成具有能量选择特性的强电磁防护结构。首先,用无限大周期结构仿真验证单元结构的强电磁防护的可行性;随后,通过添加外围边框实现了有限大表面的设计;最后,在波导中仿真,加工,并用实验验证了这种设计方法。在波导中,实验测试插入损耗平均小于 1 dB,强电磁防护能力有 14 dB。

实验结果表明,能量选择表面的设计可以借鉴现有的频率选择表面结构,通过加载非线性(对电场功率敏感)器件,实现对小信号的低插入损耗透波和强电磁的屏蔽防护,从而保护后端敏感易损电路。

参考文献 (References)

- [1] 刘培国, 刘翰青, 王轲. 石墨烯材料在舰船强电磁防护技术中的应用[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(4): 1-8.
LIU P G, LIU H Q, WANG K. Application of graphene in strong electromagnetic protection technology for ships [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(4): 1-8. (in Chinese)
- [2] 王永芳, 于槟恺, 王凌云. 基于专利分析的高功率微波武器技术发展研究[J]. 航空兵器, 2019, 26(5): 19-25.
WANG Y F, YU B K, WANG L Y. Research on the development of high power microwave weapon based on patent analysis[J]. Aero Weaponry, 2019, 26(5): 19-25. (in Chinese)
- [3] 张龙, 田明宏, 宋正鑫, 等. 雷达装备强电磁脉冲防护现状及发展考虑[J]. 现代雷达, 2020, 42(5): 13-16.
ZHANG L, TIAN M H, SONG Z X, et al. Current situation and development consideration of strong electromagnetic pulse protection for radar equipment [J]. Modern Radar, 2020, 42(5): 13-16. (in Chinese)
- [4] 范宇清, 程二威, 魏明, 等. 北斗接收机强电磁脉冲前门耦合仿真研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2020, 32(3): 426-433.
FAN Y Q, CHENG E W, WEI M, et al. Simulation research on front door coupling of strong electromagnetic pulse for BeiDou receiver[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2020, 32(3): 426-433. (in Chinese)
- [5] 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 X D, WANG Z, WU H, et al. Analysis and protection of strong EMP coupling in VHF communication system [J]. Communications Technology, 2020, 53(6): 1538-1545. (in Chinese)
- [6] 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 P G, LIU C X, TAN J F, et al. Analysis of the research development on HPM/EMP protection[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(2): 2-6. (in Chinese)
- [7] KANCHANA D, RADHA S, SREEJA B S, et al. A single layer UWB frequency selective surface for shielding application [J]. Journal of Electronic Materials, 2020, 49(8): 4794-4800.
- [8] 邓世雄, 高长征, 陈书宾. 线性限幅器的设计与研究[J]. 微波学报, 2020, 36(3): 97-100.
DENG S X, GAO C Z, CHEN S B. Design and research of linear limiters [J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(3): 97-100. (in Chinese)
- [9] HAO R, ZHANGX D, GAO H, et al. A novel high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) protection circuit for RF applications [J]. Microelectronics Journal, 2019, 84: 1-8. (in Chinese)
- [10] 刘培国, 万双林, 李高升, 等. 一种电磁能量选择表面: CN201766807U[P]. 2011-03-16.
LIU P G, WAN S L, LI G S, et al. Electromagnetic energy selective surface: CN201766807U[P]. 2011-03-16. (in Chinese)
- [11] 杨成. 能量选择表面防护机理与分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
YANG C. Energy selective surface protection mechanism and analysis [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [12] 杨成, 黄贤俊, 刘培国. 基于能量选择表面的电磁防护新方法[J]. 河北科技大学学报, 2011, 32(增刊2): 81-84.
YANG C, HUANG X J, LIU P G. A new method of electromagnetic protection based on energy selective surface[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2011, 32(Suppl 2): 81-84. (in Chinese)
- [13] 杨成, 刘培国, 刘继斌, 等. 能量选择表面的瞬态响应[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(4): 1045-1049.
YANG C, LIU P G, LIU J B, et al. Transient response of energy selective surface [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(4): 1045-1049. (in Chinese)
- [14] 刘晨曦. 能量选择表面设计与仿真[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
LIU C X. Design and simulation of energy selective surface [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)
- [15] 周奇辉. 能量选择表面研究与天线一体化设计分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2016.
ZHOU Q H. Research on energy selective surface and analysis of antenna integrated design [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)
- [16] 王轲. 能量选择结构与导航防护应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
WANG K. Research on energy selective structure design and navigation protection application [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] YANG G H, LI Y, WU Q, et al. Design of L-band energy-selective surface with circular ring gap [J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2020, 35(5): 551-555.
- [18] HU N, WANG K, ZHANG J H, et al. Design of ultra-wideband energy-selective surface for high-power microwave protection [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(4): 669-673.
- [19] ZHANG J H, LIN M T, WU Z F, 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.
- [20] ZENG X L, GAO M, ZHANG L X, et al. Design of a tuneable and broadband absorber using a switchable transmissive/reflective FSS [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2018, 12(7): 1211-1215.
- [21] 杨成, 万双林, 刘培国. 微波激励 PIN 二极管的时频响应研究[J]. 微波学报, 2011, 27(3): 9-12, 16.
YANG C, WAN S L, LIU P G. Research on the time-frequency response of PIN diodes with microwave exciting [J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(3): 9-12, 16. (in Chinese)