



·电磁防护与应用·

一种 C 波段雷达接收机防护技术研究*

刘 彬, 张海嫒, 王 旭, 陈冬伟, 陈 思

(中国电子科技集团公司第十二研究所, 北京 100015)

摘 要: 随着战场环境日益复杂, 尤其是高对抗环境下, 对现有各类装备均产生了极大威胁。设计了一款 C 波段雷达接收机保护器, 采用充气微波开关管+波导同轴转换的结构设计, 创新性地提出将固态限幅器芯片融合在波导同轴转换内部, 限幅芯片采用级联的形式, 提高了微带限幅器的承受功率。实现接收机保护器耐受功率 10 MW 以上, 响应时间 5 ns 以内, 不仅可用于雷达发射期间接收机防护, 还可应对外部电磁干扰、高功率微波攻击。

关键词: 复杂环境; 高功率微波; 电磁干扰; 接收机保护器; 微波等离子体

中图分类号: TN136

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230267

Research on a C-band radar receiver protection technology

Liu Bin, Zhang Haiman, Wang Xu, Chen Dongwei, Chen Si

(The 12th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: As the battlefield environment becomes increasingly complex, especially in high-confrontation environments, it poses a great threat to all types of existing equipment. This article designs a C-band radar receiver protector, which adopts the structural design of inflatable microwave switch tube + waveguide coaxial conversion, innovatively integrates the solid-state limiter chip into the waveguide coaxial convertor, while the limiting chip adopts a cascaded form to increase the power of the microstrip limiter. With a power resistance of over 10 MW and a response time of less than 5 ns, the protector is not only used for receiver protection during radar transmission, but also can cope with external electromagnetic interference and high-power microwave attacks.

Key words: complex environment, high-power microwave, electromagnetic interference, receiver protector, microwave plasma

近年来, 随着信息化程度的不断深入, 各类电子装备采用了大量的精密半导体器件, 增加了其对电磁干扰的敏感性和易损性。此外, 随着脉冲功率技术和核技术的不断发展, 战场的电磁环境日益复杂, 对现代军事行动中的信息化装备构成了巨大威胁, 一旦电子设备遭到破坏, 战斗力会立刻削减^[1-2]。针对高功率微波武器的攻击, 目前国内已经开展了相应的防护研究工作, 主要从屏蔽、滤波等方向展开^[3-4]。

在常规雷达系统中, 接收机前端防护主要采用充气微波开关管和固态限幅器两种形式的接收机保护开关。充气微波开关管和固态限幅器相比较各有优缺点, 充气微波开关管具有插入损耗小、耐受功率大、隔离度高的特点^[5]; 而固态限幅器具有插入损耗大、耐受功率小、响应时间快、体积小等特点^[6-8]。充气微波开关管和固态限幅器在接收机前端防护方面各有优势, 基于两者的各自优势, 国内已经研制出了充气微波开关管和固态限幅器组合(TRL)结构形式的接收机保护器, 该机器具有承受功率大、漏过功率小、恢复时间短等特点, 被广泛应用在目前机械扫描体制的各种雷达系统中, 用于雷达自身泄漏功率防护和电磁干扰条件下的高功率防护。

接收机保护器主要有插入损耗、电压驻波比、响应时间、峰值漏过功率、平坦漏过功率、幅度恢复时间等指标参数^[9]。在雷达接收状态期间, 由于进入保护器的雷达回波信号功率极低, 远远小于半导体限幅器的工作门限(约 1 mW)和放电间隙的“着火”功率(约 2 W), 此时接收机保护器中的各个部分都不工作, 因此回波信号可顺利通过

* 收稿日期: 2023-08-14; 修订日期: 2023-11-13

联系方式: 刘 彬, 31512721@qq.com。

通信作者: 张海嫒, 96227298@qq.com。

保护器,进入接收机,此时要求接收机保护器插入损耗和电压驻波比越小越好。雷达发射功率期间,入射到保护器前端的泄漏功率由零瞬间(取决脉冲前沿)上升到数千瓦。当脉冲功率小于放电间隙的点火功率时,半导体限幅器工作(反射功率),此时保护器内的电场分布呈驻波状态,放电间隙处的电场最强。随着功率的增加,放电间隙开始“着火”,放电间隙“着火”后,输入窗处的电场最强。当输入功率达到30 W左右时,输入窗处(管内一侧)开始放电,形成充满整个窗口的等离子体,对入射功率形成“全”反射,仅仅极少部分的入射功率(接收机可承受)可漏过保护器进入接收机。在整个过程中要求响应时间、峰值漏过功率、平坦漏过功率、幅度恢复时间等参数尽量低,有效保护雷达接收机的安全^[10]。

由于雷达接收机系统安装空间有限,接收机前端通常采用同轴连接器,保护器和雷达系统连接时,需要通过波导同轴转换过渡,导致系统连接长度增加,驻波和插入损耗增大等问题;同时该类型的接收机保护器,限幅器采用管壳封装限幅二极管进行限幅,连续波耐受功率在1.5 W左右,对于高功率微波武器攻击,耦合功率超过雷达自身泄漏功率4个数量级以上,充气微波开关管的漏过功率增大,存在泄漏功率过大烧毁限幅二极管的风险。

本文针对高功率微波武器的前门耦合^[11],利用气体放电原理设计了一款C波段雷达接收机保护器(以下简称“保护器”)。相较于TRL一体化结构设计的接收机保护器,C波段雷达接收机保护器在结构和工艺上进行了设计改进,采用充气微波开关管+波导同轴转换的结构设计,创新性地提出将固态限幅器芯片融合在波导同轴转换内部,限幅芯片采用级联的形式,提高微带限幅器的承受功率。在MW量级大功率信号作用下,使得接收机保护器的漏过功率降至mW级,有效保护接收机免受高功率耦合信号的烧毁。

1 设计方案

本文设计的保护器由充气微波开关管、波导同轴转换和微带限幅器三部分组成,结构见图1所示。我们分别对保护器的低功率参数和高功率参数进行设计分析。

1.1 低功率参数设计

低功率信号模拟回波信号,此时保护器可视为带通滤波器^[12],要求保护器在带内“无损”通过。该保护器低功率参数设计要求插入损耗 ≤ 1 dB,电压驻波比 ≤ 1.4 ,保护器由充气微波开关管、波导同轴转换、微带限幅器三部分级联组成。通过指标分解,微波开关管插入损耗 < 0.3 dB、波导转换插入损耗 < 0.15 dB、微带限幅器 < 0.5 dB。充气微波开关管和波导转换设计仿真技术及生产工艺比较成熟,在满足高功率指标的前提下进行微波工作室软件(CST)设计仿真,完全可以实现设计要求。由于采用微带限幅器集成到波导转换上,在设计上需要解决微带限幅器芯片和半导体的封接技术,以及波导转换和微带限幅器的级联技术。

充气微波开关管采用两级放电间隙结构,各谐振单元之间采用 $\lambda/4$ 的设计,使放电间隙在电场最强处。通过仿真设计和实践经验,前后放电间隙距离控制在0.1 mm以内,通过优化模板和前后放电窗口的宽度,实现频带内电压驻波比最佳值,频带范围内电压驻波比 ≤ 1.2 ,满足设计要求。由于插入损耗受到材料、电镀层、零件配合和焊缝影响比较大,所以在工艺结构设计上腔体采用了可伐镀铜工艺,降低了零件的趋肤深度,损耗可以有效减小0.05 dB。

对于波导微带转换的设计,本文选择了E面结构的波导微带转换,同时在矩形波导内部采用了多级 $\lambda/4$ 的阶梯变换设计,拓展了频带宽度,降低了波导微带连接的反射系数^[13]。频带范围内电压驻波比 ≤ 1.15 。

在微带限幅器芯片的选择上既要考虑到低功率参数,还要保证高功率条件下的耐受功率和漏过功率要求。通过调研相关限幅器芯片研制单位,最终确认了一款采用4只限幅二极管前后混合连接的微带限幅器芯片(见图2),该芯片的带内插入损耗 ≤ 0.20 dB。

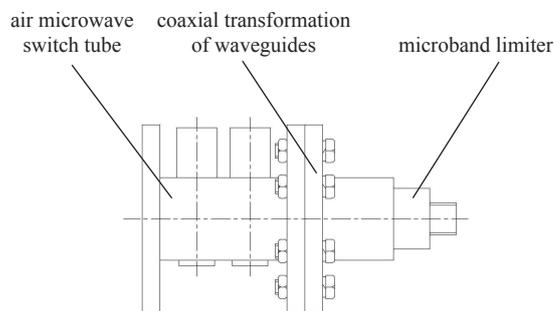


Fig. 1 Schematic diagram of the C-band radar receiver protector structure

图1 C波段雷达接收机保护器结构示意图

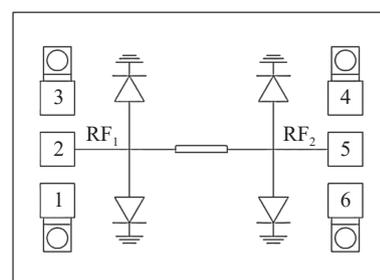


Fig. 2 Schematic diagram of chip structure

图2 微带限幅器芯片结构示意图

利用 CST 软件, 我们将该芯片进行了设计仿真, 微带线设计宽度 5.42 mm 宽度, 阻抗 50 Ω , 考虑到同轴微带转换阻抗匹配性, 我们选择的同轴内外导体直径分别为 4.1 mm 和 2.7 mm, 以降低微带线失配导致的驻波反射过大的问题。

在 CST 软件中对三部分进行级联, 并进一步设计优化波导阶梯渐变的长度和高度, 完成了整体的仿真设计, 设计仿真结果见图 3。

1.2 高功率参数设计

高功率参数设计主要考虑充气微波开关管设计和微带限幅器设计。充气微波开关管采用两级放电间隙结构, 要求着火功率和峰值漏过功率在 10 W 以内, 平坦漏过功率在 200 mW 以内。充气微波开关管的漏过功率不仅和气体压强有关, 还和气体组分和电极间距有直接关系。根据巴邢定律, 充气微波开关管压强和放电电极间距的关系式 $pd=2$ 。我们对充气微波开关管的电极间距和气体组分进行了设计优化, 电极间距控制在 0.1 mm 以内, 通过仿真软件可以计算出保护器放电间隙的电场强度为 113 V/m, 大于同波段产品。在大功率信号作用下, 管内气体极易电离产生等离子体, 电场强度仿真模型见图 4。主工作气体采用氙气, 同时内部充入微量的电离电位小于氙气的惰性气体, 根据彭宁效应, 混合工作气体可以有效降低工作气体的电离电位, 实现等离子体的快速形成, 缩短充气微波开关管的响应时间。

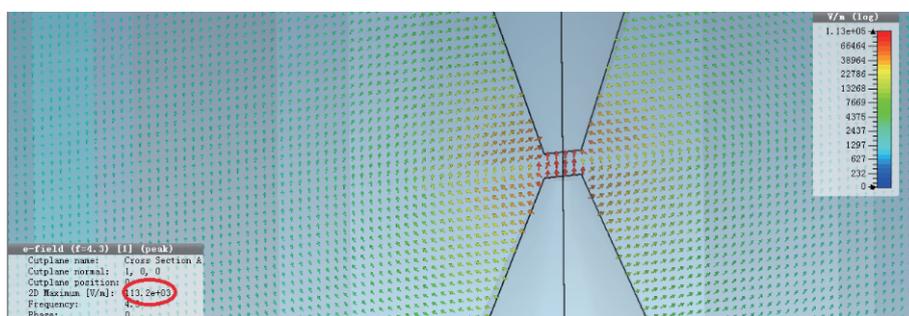


Fig. 4 Discharge clearance electric field intensity

图 4 放电间隙电场强度

由于输入脉冲宽度 50 ns, 重频 20 Hz, 脉冲截止期间的等离子体在下一脉冲功率通过时, 等离子体完全消电离, 导致每一次气体放电都不稳定。为了获得足够的初始电子, 我们使用含氙电极作为初始电子源, 当功率通过时, 能促进工作气体在电极间隙快速电离, 形成稳定的等离子体短路面^[14]。

在工艺设计上, 由于高功率条件下, 电极间隙属于辉光放电, 基本不存在气体消耗和电极材料溅射。微波开关管的薄弱环节主要是陶瓷密封窗, 可能存在高功率条件下, 陶瓷材料被击穿形成放电通路, 导致陶瓷窗慢性漏气失效, 我们针对密封窗进行了相关结构设计(见图 5)。充气微波开关管采用耐高温的 95% 氧化铝瓷作为输入输出窗的介质材料, 其介电常数为 9.6。对陶瓷窗的高度、宽度和厚度进行了设计优化, 在保证封接强度和高温击穿厚度的条件下, 确认陶瓷材料厚度 0.8 mm, 窗片采用 4J33 瓷封合金^[15]。考虑到密封窗需要和腔体进行二次封接, 所以在工艺设计上氧化铝陶瓷和窗片的焊接采用纯银焊料在氢炉中进行封接, 提高了微波开关管的气密性。

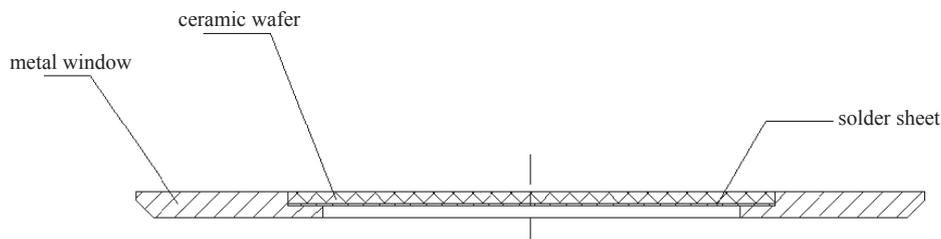


Fig. 5 Seal window structure

图 5 密封窗结构

通过和相关单位合作,采用半导体工艺,完成了微带限幅器芯片和微带基板的焊接。然后用焊锡工艺完成了波导微带转换、N型转换头的封接。通过对波导转换进行测试,电压驻波比 <1.3 ,插入损耗 <0.5 dB,连续波承受功率 >8 W,是原有管壳封装结构限幅二极管承受功率的5倍以上,满足设计要求。

2 测试结果

结合上述仿真设计,我们加工完成了两只样管,并进行了低功率和高功率测试。

2.1 低功率测试

通过采用矢量网络分析仪进行了保护器插入损耗和电压驻波比的指标测试,测试系统见图6,测试结果完全满足设计要求,具体结果见表1。

2.2 高功率测试

我们搭建了高功率测试系统,进行样管的漏过功率测试,高功率测试系统框图见图7。

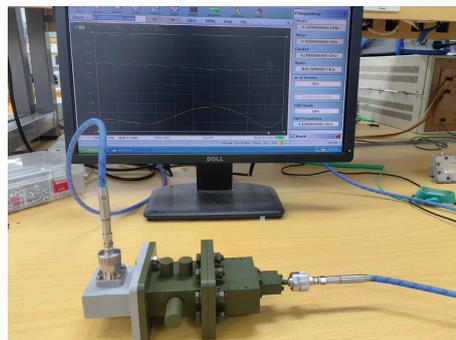


Fig. 6 Low-power test system

图6 低功率测试系统图

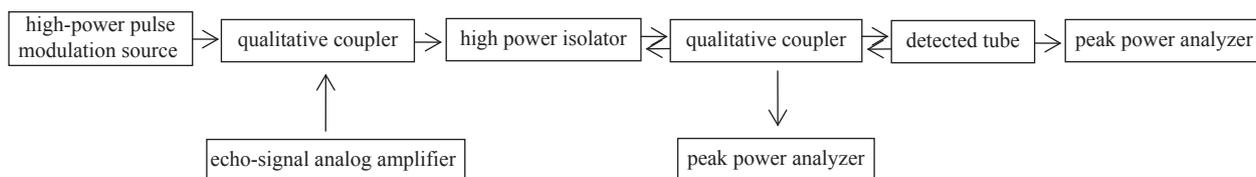


Fig. 7 High-power test system

图7 高功率测试系统

在测试过程中,我们首先用峰值功率分析仪实时采样,保证到保护器前端的功率达到10 MW以上。然后在系统内安装测试样管,用峰值功率分析仪完成了样管响应时间、峰值漏过功率、平坦漏过功率、恢复时间等相关指标的测试,测试结果见表1。

表1 测试结果

Table 1 Results of tests

	voltage standing wave ratio	total insertion loss/dB	response time/ns	peak leakage power/mW	recovery time/ μ s
sample tube 1#	≤ 1.35	≤ 0.8	4	≤ 30	≤ 0.7
sample tube 2#	≤ 1.37	≤ 0.7	4	≤ 35	≤ 0.6

通过以上低功率和高功率测试,在工作带宽内,电压驻波比 <1.4 ,总插入损耗 <1 dB;高功率(峰值功率10 MW,脉宽50 ns,重频20 Hz)测试条件下,响应时间 <5 ns,峰值漏过功率 <40 mW,幅度恢复时间 <1 μ s。通常情况下雷达接收机前端可以耐受100 mW以上的泄漏功率,通过以上测试结果可以看出两只样管的测试数据符合设计要求,完全可以有效保护雷达接收机的安全。

3 结论

本文介绍的C波段接收机保护器是一款无源被动式防护器件,采用充气微波开关管+波导同轴转换的结构设计,创新性地提出将固态限幅器芯片融合在波导同轴转换内部,提高了限幅器的承受功率,同时通过优化放电单元和内部气体组分,实现了10 MW测试条件下,响应时间 <5 ns,峰值漏过功率 <40 mW;不仅可用于雷达发射期间泄漏功率的自身接收机防护,也可用于外来高功率电磁脉冲对接收机的攻击防护,提升了雷达整机系统在电磁干扰条件下的实战生存能力。

参考文献:

- [1] 牛卉, 伍洋, 李明. 国外高功率微波武器发展情况研究[J]. 飞航导弹, 2021(8): 12-16,23. (Niu Hui, Wu Yang, Li Ming. Research on the development of foreign high power microwave weapons[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(8): 12-16,23)
- [2] 刘振林, 杨光, 段难, 等. 高功率微波导弹对战场环境的影响及对抗技术研究[J]. 微波学报, 2020, 36(s1): 358-361. (Liu Zhenlin, Yang Guang, Duan Nan, et al. Research on the impact of CHAMP on the battlefield environment and the countermeasure technology[J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(s1): 358-361)
- [3] 周璐, 刘恩凯. 电子设备的高功率微波防护技术[J]. 电子元器件与信息技术, 2022, 6(4): 14-17. (Zhou Lu, Liu Enkai. High power microwave protection

- technology for electronic devices[J]. *Electronic Components and Information Technology*, 2022, 6(4): 14-17)
- [4] 许彤. 高功率微波防护研究[J]. *无线通信技术*, 2021, 30(4): 52-55. (Xu Tong. Research on high power microwave weapon protection[J]. *Wireless Communication Technology*, 2021, 30(4): 52-55)
- [5] 刘彬. C 波段宽带接收机保护器的设计仿真[J]. *真空电子技术*, 2013(4): 99-100,105. (Liu Bin. Design and simulation of C-band broadband receiver protector[J]. *Vacuum Electronics*, 2013(4): 99-100,105)
- [6] 余稳, 聂建军, 郭杰荣, 等. PIN 二极管的高功率微波响应[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(2): 299-301. (Yu Wen, Nie Jianjun, Guo Jierong, et al. The response of the PIN diode to the high power microwave[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(2): 299-301)
- [7] 王波, 黄卡玛. 温度对 PIN 二极管限幅器功率响应特性的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(4): 645-648. (Wang Bo, Huang Kama. Effect of temperature on power response of PIN diode limiter[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(4): 645-648)
- [8] 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. Experimental study and PSpice simulation of PIN diode limiter[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(1): 88-92)
- [9] 电子管设计手册编辑委员会. 天线开关管设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983. (Editorial Board of the Electronic Tube Design Manual. *Antenna switch tube design manual*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1983)
- [10] 冯英, 段博, 陆波. 关于雷达接收机的保护技术研究[J]. *信息通信*, 2014(3): 264. (Feng Ying, Duan Bo, Lu Bo. Research on the protection technology of radar receiver[J]. *Information & Communications*, 2014(3): 264)
- [11] 刘国靖, 潘泉, 张洪才, 等. HPM 短脉冲雷达接收机保护装置设计方法探讨[J]. *电子机械工程*, 2001(4): 8-12. (Liu Guojing, Pan Quan, Zhang Hongcai, et al. The designing of HPM short pulse radar receiver protectors[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2001(4): 8-12)
- [12] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994. (Liao Cheng'en. *Microwave technology foundation*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1994)
- [13] 陈宪龙, 罗勇. 波导带通滤波器与微带转换装置的设计[J]. *现代电子技术*, 2012, 35(21): 68-70. (Chen Xianlong, Luo Yong. Design of transition device between waveguide bandpass filter and microstrip[J]. *Modern Electronics Technique*, 2012, 35(21): 68-70)
- [14] 杨耿, 谭吉春, 盛定仪, 等. 等离子体对高功率微波的防护[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2008, 28(1): 90-93. (Yang Geng, Tan Jichun, Sheng Dingyi, et al. Protection against high power microwave using plasma[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2008, 28(1): 90-93)
- [15] 张荣华. 宽带高功率矩形陶瓷密封窗封装结构及工艺[J]. *真空电子技术*, 2002(3): 46-47,50. (Zhang Ronghua. Seal structure and technique of broad-band high power rectangular ceramic hermetic windows[J]. *Vacuum Electronics*, 2002(3): 46-47,50)