

DOI: 10.3969/j.issn.1672-2337.2018.03.014

VHF 波段宽带连续波大功率双通道功放组件的设计

郑智潜, 杨志刚

(中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088)

摘要:首先针对VHF波段宽带连续波大功率固态功放组件的整体指标要求,分析主要指标间的关系和相互制约性,对指标之间相互制约问题折中考虑,优化设计。既能实现大功率、线性化指标要求,又解决了高热耗下的散热难题,同时满足组件的小型化要求。然后分别从功能模块化设计、电磁兼容设计、热设计等方面进行了分析,从功率放大方式的选择和结构布局安排等方面进行了较为详细的介绍。研制出一种双通道VHF波段宽带连续波大功率固态功放组件,满足机载平台对固态功放组件体积和重量的严格要求。最后给出了功放组件的实际测试结果,表明该组件完全满足总体指标要求。

关键词:固态功放组件; LDMOS 功率管; 热设计; 电磁兼容设计

中图分类号: TN721; TN722. 3⁺³ 文献标志码:A 文章编号:1672-2337(2018)03-0317-05

Design of VHF Band Broadband Continuous Wave High Power Dual-Channel Amplifier

ZHENG Zhiqian, YANG Zhigang

(The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

Abstract: Firstly, aiming at the overall specifications of VHF band broadband continuous wave high power dual-channel amplifier, the relations and constraints among the overall specifications are analyzed. Based on the trade-off of the constraints, the optimal design is conducted, which not only meets the specification requirements of high-power and linearity, but also meets the needs of thermal dissipation and structural miniaturization. Secondly, the analysis is made respectively from modular design, EMC design and thermal design. The power amplifier selection and structural configuration are described in detail. A VHF band broadband continuous wave high power dual-channel amplifier is developed, which meets the stringent requirements of volume and weight of the solid-state power amplifier for the airborne platform. Finally, the actual test results are given, which show that the amplifier fully meets the requirements of the overall specifications.

Key words: solid-state power amplifier; LDMOS power tube; thermal design; EMC design

0 引言

甚高频(Very High Frequency, VHF)频段因其作用距离远、反隐身性能好以及发现反辐射导弹(ARM)的能力强,因而在雷达和电子对抗领域得到了广泛的应用。

VHF波段作为反隐身的优选频段之一,设计VHF波段超宽带连续波高功率功放组件则是实现反隐身的重中之重。本功放组件应用于某机载电子对抗系统,满足机载平台小型化远距离干扰的要求,解决了对于超宽带、连续波大功率及线性

要求带来的电磁兼容、散热和小型化问题。对组件的电路设计、结构布局、电磁兼容设计、热设计等进行了详细的介绍。

1 设计方法

1.1 技术指标

- 1) 频率范围: VHF 波段
- 2) 工作带宽: 250 MHz
- 3) 工作方式: CW
- 4) 输出功率: 每个通道不小于 350 W(1 个组件 2 个发射通道)

- 5) 三阶交调抑制: $\geq 15 \text{ dBc}$
- 6) 带外谐波及杂散抑制: $\geq 60 \text{ dBc}$
- 7) 工作温度: $-40 \sim 55^\circ\text{C}$
- 8) 冷却方式: 液冷

1.2 电讯设计

从整体指标的要求看,难点在于功放组件多个技术指标之间相互制约,如有源器件增益-带宽积的制约,使得在 VHF 波段 110% 相对带宽内,组件的功率增益受限;要求组件在大功率连续波状态下工作,同时具有小型化和线性特性,采用功率回退的方式能够满足线性要求,必然会以牺牲功放的效率为代价,也给组件的热设计增加了相当大的难度。因此对于某些指标的相互制约,需要全局考虑,优化设计。

为了减小重量和体积,满足其他指标要求,本功放组件采用双面结构,即两个发射通道分别置于组件的两面,具有独立控制、独立工作功能。模块化设计中,组件组成包括驱动功放、功率分配、双管功放模块、功率合成、末级滤波和 BITE 单元。

电讯设计的目标是达到 1.1 节中技术指标要求,并考虑组件内部电磁兼容及热设计等,这就需要有一个合理的电路拓扑结构及合理的结构布局。本着结构简洁、工作稳定可靠的基本原则,组件采用两级放大,前级输出为 41 dBm 左右的驱动功放,末级为 450 W 的双管功放模块。组件组成框图如图 1 所示。

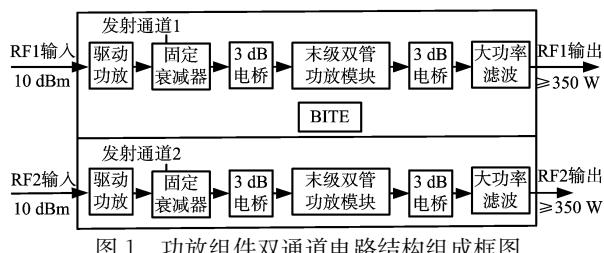


图 1 功放组件双通道电路结构组成框图

1.2.1 驱动功放设计

根据总体指标要求,采取两级级联放大,驱动功放的主要指标要求如下:

- 1) 输入功率: 10 dBm
- 2) 输出功率: $41 \text{ dBm} \pm 1 \text{ dB}$
- 3) 带内谐波抑制: $\leq -20 \text{ dBc}$
- 4) 三阶交调抑制: $\leq -30 \text{ dBc}$ (双音间隔为 5 MHz)

- 5) 输出功率控制: 调节范围 $0 \sim 30 \text{ dB}$, 调节步进 3 dB, 调节精度优于 0.5 dB(422 串口控制)
- 6) 输出信杂比: $\leq -65 \text{ dB}$
- 7) 工作电压: +28 V

驱动功放的主要功能是将收发系统送来的 10 dBm 左右连续波激励信号进行放大,得到幅度约为 41 dBm 的功率输出,然后送至末级驱动双管功放模块。考虑到 IMD3 抑制及带内谐波要求,为了避免驱动级的交调指标对后一级放大产生不利影响,一般情况下,采用回退法设计的级联放大器最终 IMD3 取决于末级 IMD3,驱动功放的 IMD3 不需要设计得很低,只要优于整体指标要求的 10~15 dBc 即可,这样对后一级功放的交调指标恶化影响较小,仅仅恶化 2 dB 左右,这是可以容忍的。通过实验分析和验证,驱动级三阶交调指标不大于 -30 dBc (双音间隔为 5 MHz),带内谐波抑制不大于 -20 dBc 确保不会对后一级造成指标恶化。

驱动功放位于放大链第一级,功率相对较小,易于控制处理。因此将射频开关和输出功率控制集成在驱动功放内,当功放组件出现严重故障时,驱动功放接收 BITE 单元送来的控制信号,关断射频和栅压,从而使整个组件停止工作,实现整个功放组件的故障保护功能。

1.2.2 末级功放设计

组件的关键部分是末级功放模块,而末级功放模块的核心器件是功率管。经过权衡比较,选用平衡推挽工作方式的 LDMOS 管作为末级功放的功放管,LDMOS 管的输入阻抗高、线性好、热稳定性高、抗失配能力强,抗驻波能力为 65:1 不会损坏,且器件内 180° 相位差虚拟地降低了共模电感,增加了稳定性和工作带宽,还能抑制偶次谐波^[1],适合作为本功放模块的功率放大管。

为了达到组件连续波输出功率不小于 350 W,如果选择 LDMOS 功率管单管来实现,单从输出功率要求来说,也能够满足要求,放大链中少了合成器的损耗,大功率滤波器的损耗为 0.65 dB,要求单管输出在 410 W 以上方能满足要求,考虑功放的线性要求,采取功率回退方式,若功率回退 3 dB,工作效率为 50%,那么单管热耗为 800 W 以上,以至于热量过于集中,若再采取双面结构小型化设计,通过热仿真计算分析,几乎不可能满足散

热要求,功放组件的可靠性也无法保证。若用双管合成的方式,由于功率合成器和大功率滤波器的总插损约为1.1 dB,末级功放模块输出功率达到450 W以上即可满足组件输出功率的要求,双管模块每个功率管的热耗还不到单管热耗的1/2,使热量得到分散,有效减小热流密度。同时适当提高驱动功放的线性指标,让末级功放尽量靠近饱和工作区,这样不仅可以提高效率,还可以进一步减小热耗,降低热设计难度。从上述对比分析可知,采取双管合成可以分散热点,大大减小热设计难度,更易于实现组件的双面结构,满足小型化要求。

为了满足宽带线性大功率的要求,解决集中

元件匹配无法满足要求的宽带匹配问题,在整个带宽内获得最大的线性输出功率和足够的增益,末级功放模块采用同轴巴伦宽带匹配技术,用同轴巴伦作为功率管输入输出匹配,扩展带宽。1:1巴伦结构的传输线变压器应用于推挽功率放大电路作为功率分配和功率合成,由1:1巴伦构成的4:1巴伦TLT作为输入、输出匹配,高频端的级间匹配还需要加上电容、电感集中匹配网络实现宽带线性功率匹配。为了避免产生电路谐振,特别是引起复数负载实质上的幅度波动增加,传输线巴伦的长度应不大于最高频率的1/8波长,双管模块中单个功率管的输入、输出匹配电路图如图2所示。

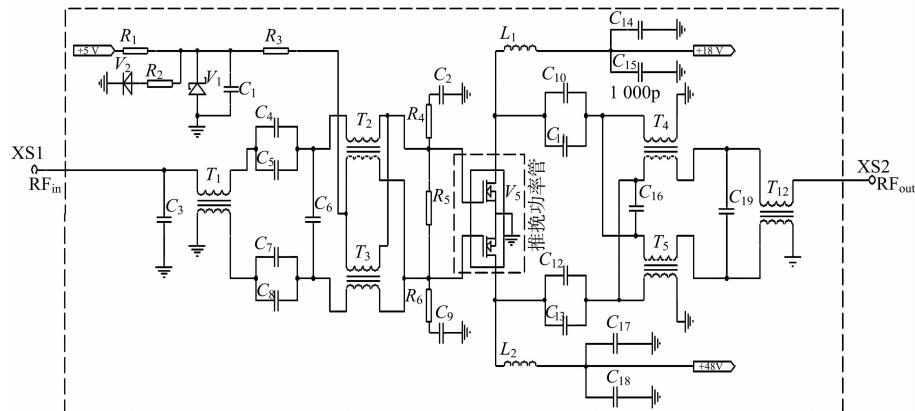


图2 末级功率管输入输出匹配电路图

输入巴伦 T_1 特征阻抗为 50Ω ,将驱动功放送来的驱动信号均分成两路送给末级双管模块,巴伦 T_2, T_3 特征阻抗为 12.5Ω ,实现1:4的阻抗变换,将功率管输入阻抗与源阻抗 50Ω 匹配。 T_4 和 T_5 特征阻抗为 25Ω ,实现4:1的阻抗变换,将功率管的输出阻抗匹配到负载阻抗 50Ω 。功率管输入、输出之间增加负反馈电路,改善功放的平坦度,降低功率起伏。参考电路仿真结果以及双管模块在实际工作情况来确定最佳静态工作点,最终将栅极电压设为 $V_g=1.8\text{ V}$,为了提高末级双管功放模块的可靠性和线性指标,将漏极工作电压降额到 $+48\text{ V}$ 。末级双管模块的每个功率管的输出连续波功率在280 W以上,双管合成输出连续波功率不小于450 W。图3为实际研制完成的LDMOS末级双管功放模块实物图。

为了实现组件小型化,将两个发射通道分置于组件两面的双面结构设计,每个发射通道的末级功放模块输出后经3 dB电桥完成宽带大功率合成,分

散热量,从而降低组件的热设计难度。对于带外杂散抑制要求,采取在末级输出端进行滤波,减少驱动级后滤波设计,其优点是减小了组件的尺寸和重量,还可直接滤除末级功放模块产生的杂散信号,缺点是增加了宽带大功率滤波器的设计难度。

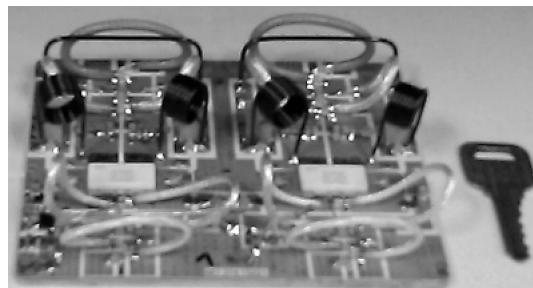


图3 末级双管功放模块实物图

2 组件的BITE与电磁兼容设计

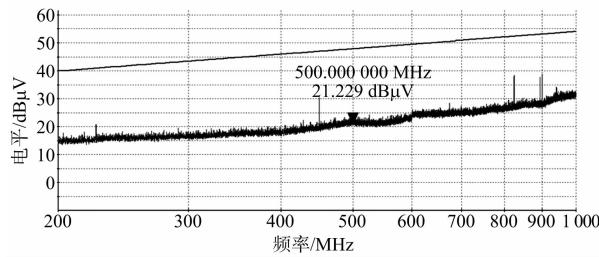
该固态功放组件内有完善的BITE。由于空间的限制,对组件的BITE进行模块化设计,将微

波检测信号和小信号处理电路一体化集成。除了能够检测组件内部 RF 的输入/输出故障、过温故障、过反射故障及组件过/欠压故障,还能在主监控控制下完成开、关机,且输出功率还可通过 BITE 接收主监控的输出功率调节命令,可分别实现双发射通道的独立调节功能,当 BITE 检测到组件过温、过压或者过反射故障时,能够及时关断该功放组件的工作电压和射频激励,停止工作,达到故障保护的目的。

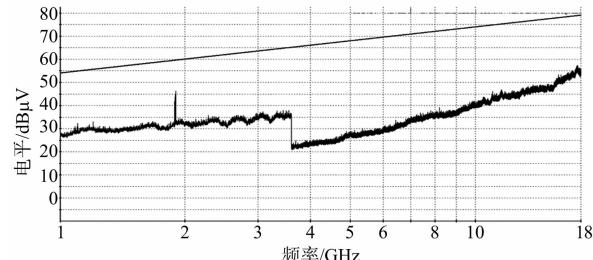
功放组件内部信号复杂,既有模拟信号,又有数字信号,既有微波大功率信号,又有低频大电流信号。设计时必须考虑不同信号之间可能产生的干扰,否则会影响功放组件甚至是整个系统的正常工作。电磁兼容设计的基本思路是良好的接地设计,严格区分数字地、模拟地、信号地;数字信号和模拟信号分腔隔离屏蔽设计;切断电磁场耦合带来线上干扰。

由于本功放组件使用于机载设备,电磁兼容需要通过 10 项试验,难度最大的为“RE102 电场辐射发射”项。首先要消除内部电磁环境对功放组件的影响,提高功放组件自身的抗干扰能力,重点从内外部电磁环境情况及结合功放组件的电路布局、组件壳体屏蔽、接地和滤波设计等几方面进行考虑^[2]。微带电路板上的射频信号与数字信号分开布局,射频信号和数字信号之间尽量用地隔离^[3]。固态微波功放组件的传输线是微带线电路,微带电路的上方是开放的空间,不可避免地会产生电磁场辐射干扰,尤其在 VHF 这种较低的微波频段大功率信号对组件内其他电路的影响更加明显,增加了组件电磁兼容设计和调试的难度,为了消除这种不确定的因素,在电路设计中对 RF 信号的传输尽可能采用屏蔽性能好的同轴电缆,减少半开放微带线的使用,降低辐射干扰;对各功能模块进行分区设计成一个独立的盒体屏蔽腔,以降低不同功能模块之间相互影响。组件电压取样、过温取样、输出功率检波取样等信号线远离大功率微带传输线,减小射频辐射干扰,从而避免辐射干扰导致有用信号幅度明显降低^[4],发生误报故障现象出现。电源线采用有金属网屏蔽层结构的 QLA 线缆,电源连接器采用具有滤波功能的低频连接器,可以滤除通过电源线耦合的射频信号及其高次谐波信号。通过对组件内部的良好接

地,采取完善的屏蔽措施,以及对耦合到线缆的高频信号尽心滤波等方法,实现组件的电磁兼容要求,经过上述设计,结果全部达到指标要求。RE102 测试结果如图 4(a) 和图 4(b) 所示。符合机载设备电磁兼容国军标要求。



(a) 200 MHz~1 GHz 测试图



(b) 1~18 GHz 测试图

图 4 RE102 测试图

3 组件的热设计

为了保证固态功放组件稳定可靠工作,良好的散热设计是必须的。据有关资料表明:晶体管的结温每降低 10℃,其寿命将增加一倍^[5]。本功放组件具有双发射通道,在大功率连续波状态下同时工作,组件双通道同时正常工作时总热耗约为 1 100 W,主要的散热部位在于热耗最大的末级功放模块中的功率管,也是主要热源所在。末级功放模块使用的是 LDMOS 功率管,单管最大热耗为 212 W,热流密度最高达 69 W/cm² 左右, LDMOS 管允许结温为 250℃左右,为保证管子的可靠性,实现降额设计。取管壳温度为 90℃,此时管子的最大结温约为 150℃,单管最大热流密度已接近风冷的临界值,还要考虑到在整机实际使用中宽带天线较大驻波带来较大的反射功率产生的热耗。风冷已经难以完成散热要求,最终采用液冷方式散热,液冷比风冷散热效率高得多,可以处理近 100 W/cm² 高热流密度^[6]。

通过实验模型分析,使用液冷时在每秒流量约为 1 mL 的情况下,单管壳温比风冷时降低约

12℃,散热效果明显优于风冷,功率管的可靠性、稳定性和使用寿命都得到极大提高。另外,功率管安装采用大面积焊接工艺直接焊接在纯铜板底上,提高散热效率,为了减轻纯铜底板重量,底板厚度尽量薄,最后利用 ANSYSicepak 软件,进行热仿真分析,确定水道结构模型及冷却媒质的流速、流量等,以及纯铜底板的最小厚度以及散热翅片的尺寸和工艺要求。最终实现结构紧凑,工作可靠,用最小的重量和体积达到最大的散热要求,既能满足热性能指标,又能达到电性能要求。图 5 为功率管焊接安装后 X 光检测图,焊接面之间无气泡,保证功率管法兰与底板之间良好接触,减小热阻。

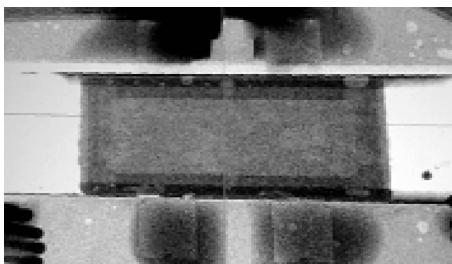


图 5 功率管焊接安装 X 光检测图

图 6 为组件正常工作时用成像测温仪测得的功率管实际工作温度,完全达到设计的预期目标。图 7 为实际研制完成的功放组件实物图,其外形尺寸长宽高为 298 mm×200 mm×88 mm,重量为 5.4 kg。



图 6 实际测试功率管的管壳温度



图 7 功放组件实物图

4 结果测试

发射系统通过了随机振动、温度冲击和高低温等环境试验测试,证明该系统稳定可靠,各项技术指标均满足要求,在整个工作频带内,组件的工作效率在 40% 以上,达到了预期目标。单一通道处于不同环境温度的输出功率测试数据如图 8 所示。图 9 为三阶交调和带外杂散测试值。

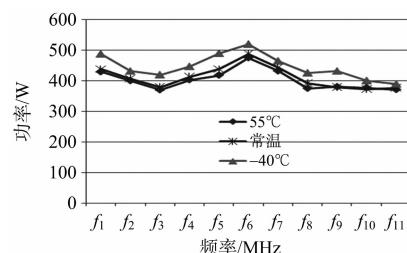


图 8 环境试验输出功率测试数据

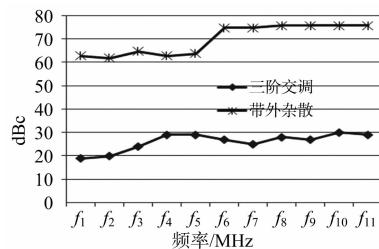


图 9 三阶交调和带外杂散测试数据

5 结语

本文对 VHF 波段宽带大功率连续波线性功放组件的组成、工作原理、设计思路进行了较详细的阐述,针对整体指标进行了分析,优化设计,选用合适的器件,运用仿真手段完成电讯设计、结构布局和热设计,折中考虑指标间的相互制约影响,使功放组件的可靠性和功率输出等各项指标得到最佳发挥。目前已完成各项试验,并通过用户验收,应用于某对抗设备,实际测试结果表明该组件工作稳定可靠,完全满足系统要求。

参考文献:

- [1] 谢嘉奎,宣月清,冯军. 电子线路(非线性部分)[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2000: 101-102.
- [2] 申胜起,张强. 微波收发组件的电磁兼容研究[J]. 舰船电子对抗, 2013, 36(2): 96-99.

(下转第 326 页)