

X 波段 2KW 固态功率放大器设计

胡炳坤 喻先卫 袁振 成海峰

(南京电子器件研究所 南京 210016)

摘要: 本文介绍了 X 波段固态功率放大器的研究结果。设计了基于 X 波段波导转探针结构对 GaN 功率芯片进行 32 路功率合成, 实现在 7.9~10.0GHz, 脉冲输出功率 2KW 以上, 合成效率大于 90%, 功率附加效率大于 30%。

关键词: 固态功率放大器; X 波段; GaN; 功率合成;

Research of X-band 2KW Solid State Power Amplifier

Hu Bingkun, Yu Xianwei, Yuan Zhen, Cheng Haifeng*

(Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing, 210016, CHN)

Abstract: In this article, the research of X-band solid state power amplifier was presented. The design which was based on the X-band waveguide-to-microstrip transition structure, had realized 32 ways power combining using GaN power MMIC. The design had achieved 2KW output pulse power, 90% power combining efficiency and over 30% PAE.

Key words: Solid State Power Amplifier; X-band; GaN; Power Combining.

引言

功率放大器在现代无线通信、雷达系统中扮演着不可或缺的角色^[1]。随着科技的不断进步, 对功率放大器的也逐步提高, 而固态功率放大器作为一种高效、可靠的功率放大解决方案, 已经得到广泛的应用。

固态功率放大器的核心优势在于其高可靠性、长寿命、重量轻以及体积小等特点^[2]。与传统的行波管功放相比, 固态功率放大器具有更高的效率、更高的可靠性, 这使得它在高频率、大功率的应用场景中更具优势。此外, 固态功率放大器的集成度高^[3], 使用方便, 只需提供适当的工作电源和输入信号, 即可实现高效的功率放大。

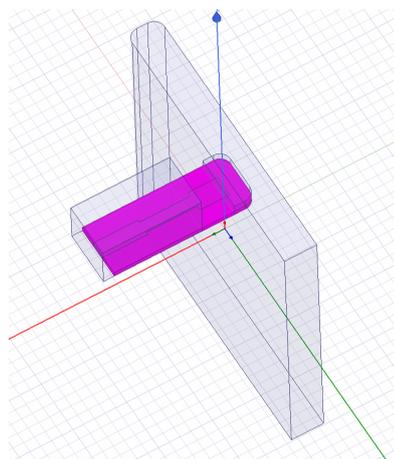
X 波段固态功率放大器的应用范围广泛, 可以用于卫星通信、雷达探测等多种领域^[4]。在卫星通信领域, 固态功率放大器的高可靠性和长寿命使得其成为卫星载荷的理想选择; 在雷达系统中, 固态功率放大器的高效率和大功率输出可以提高雷达的探测距离和分辨率。

本文采用了采用南京电子器件研究所自主研发的 70W GaN 功率 MMIC 芯片, 在 8.0~10.0GHz 的频率范围内实现了大功率、高效率合成网络, 实现 8.0~10.0GHz 频段 2KW 固态功率放大器的研制, 合成效率大于 90%。

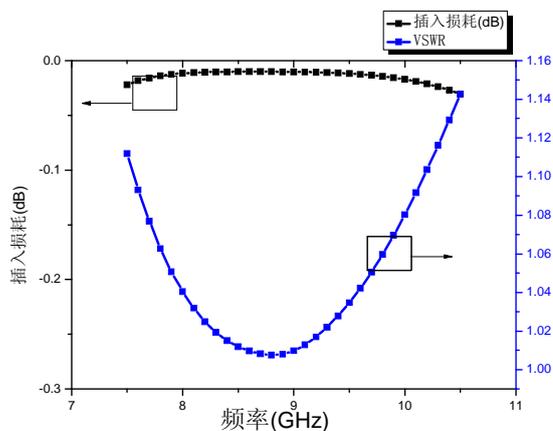
1. 波导转探针过渡结构设计

X 波段 SSPA 中一般采用 BJ84 波导实现信号传输, 而 GaN 功放 MMIC 芯片的输入、输出端口采用微带线形式, 因此, 芯片输入、输出需采用波导到微带过渡结构, 以便于信号的传输。

本文采用了 H 面波导转探针结构, 图 1 给出了仿真模型及仿真结果。



(a)



(b)

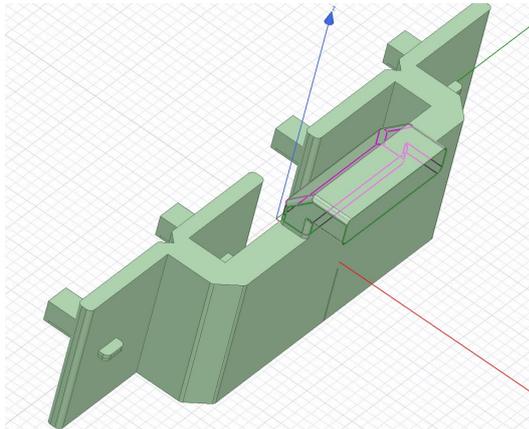
图 1 H 面波导转探针结构 (a) 仿真模型 (b) 端口驻波、损耗仿真结果

由图 1 的仿真结果可知, 在工作频带内, 输入驻波小于 1.1, 插入损耗小于 0.1dB。

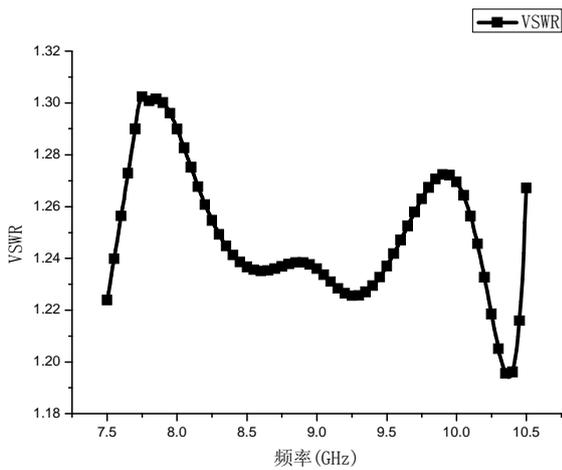
2. 270W 功放模块设计

基于波导转探针过渡结构，将 4 个 70W GaN 功率 MMIC 芯片采用 1 级 T 型波导合成器 2 级 H 面合成器，最终 4 路合成功放模块输出 270W。

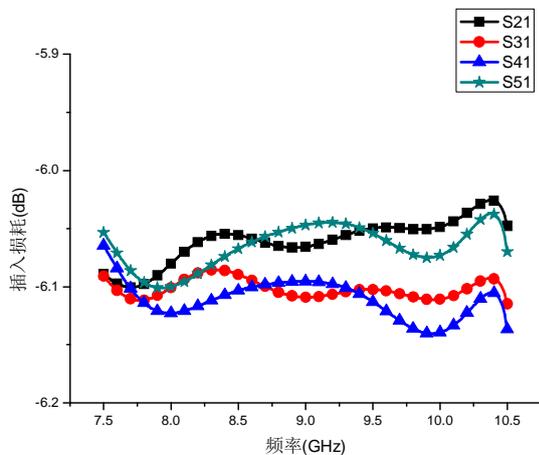
图 2 给出了两级波导合成器仿真模型、仿真结果及实物图片。



(a)



(b)



(c)



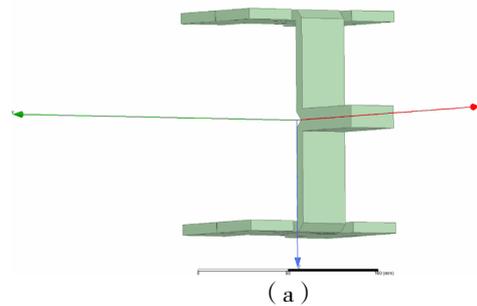
(d)

图 2 270W 功放模块合成结构 (a) 仿真模型 (b) 端口驻波仿真结果 (c) 端口损耗 (d) 实物图片

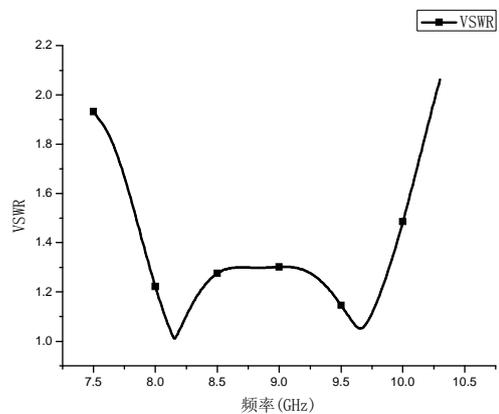
由图 2 的仿真结果可知，在工作频带内，合成器的输入驻波小于 1.3，插入损耗小于 0.2dB。

3. X 波段 8 路波导合成器设计

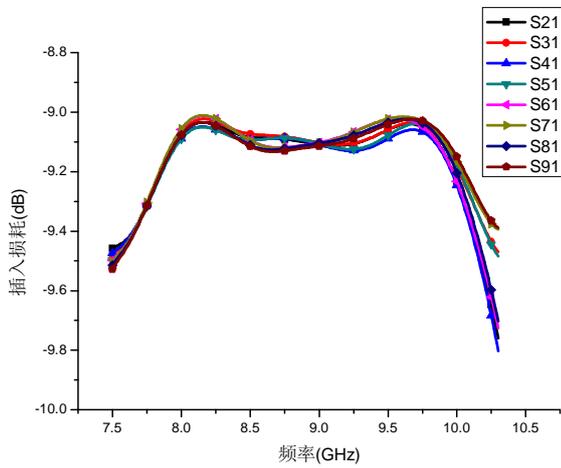
基于 270W 功放模块，考虑功放模块的安装、散热以及体积要求，采用 3 级波导合成结构进行功率合成。1、2 级波导合成结构均采用 H 面波导合成结构，将 4 个 270W 功放模块进行功率合成输出功率 1030W。最终第 3 级采用 T 型波导合成器，输出功率 2000W。图 4 给出了 8 路波导合成器的结构和仿真结果。



(a)



(b)



(c)

图3 X波段8路波导合成器(a)仿真模型(b)端口驻波仿真结果(C)端口损耗

由图3的仿真结果可知,在工作频带内,输入驻波小于1.5,插入损耗小于0.2dB。

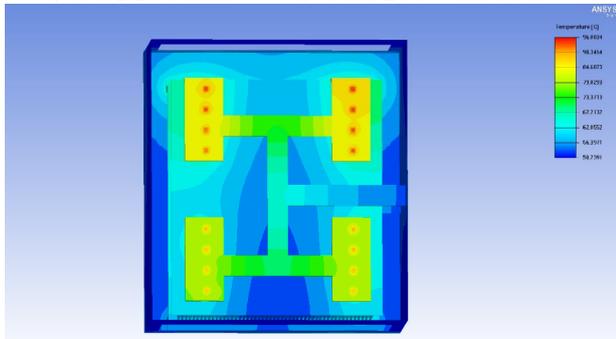
4. 热设计

每一个70W单片功率放大器的工作电压28V,按25%的工作占空比计算,单个芯片工作电流约1.75A,功耗49W,整个组件共32片芯片28V工作的总电流约56A,总功耗约1568W。整机常温输出峰值功率按2000W计算,实际整机中的热耗约为1568W-2000W*0.25=1318W。

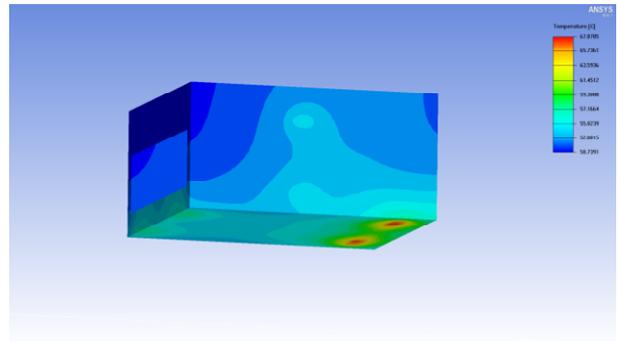
针对固态功率放大器进行系统散热设计,采用强迫风冷散热,选用4轴流风机吹风散热,散热器高度100cm,八个270W模块分为两组均布在散热器两个散热面,在不影响电性能的前提下尽量分散。

使用有限元技术,按实体建模,使用spare求解器完成瞬态热分析。热仿真结果见图4。

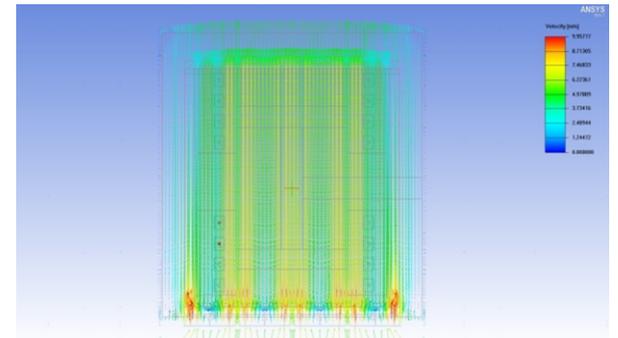
从图4的仿真结果可以看出,最高亮温约96℃,组件其他部分温度均在90℃以下,固态功率放大器内部使用的氮化镓芯片热阻约为2℃/W,单个芯片热耗约为32W,因此芯片结温160℃,满足芯片工作要求。



(a)



(b)



(c)

图4 固态功率放大器热仿真(a)内部温度分布图(b)表面温度分布图(c)流场矢量图

5. 固态功率放大器测试

图5给出了固态功率放大器的测试框图。

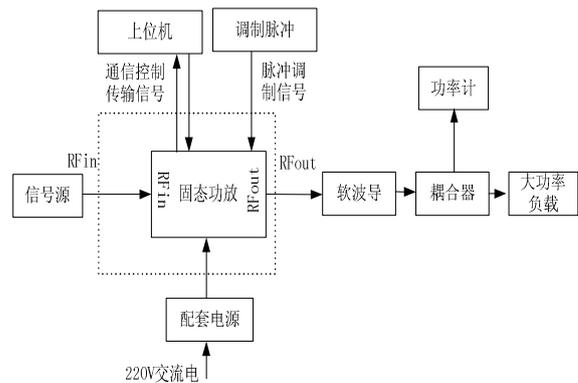


图5 固态功率放大器测试框图

固态功率放大器的配套电源通过电缆连接放大器,将220V交流电进行电平转换,为固态功率放大器提供供电。固态功率放大器通过上位机控制并监控工作状态。射频输入采用SMA接口,输出采用BJ84波导接口,接软波导后,连接耦合器。耦合器的直通端连接大功率负载,耦合端口连接功率计。

图6给出了固态功率放大器以及配套电源实物图、连线图以及测试图。

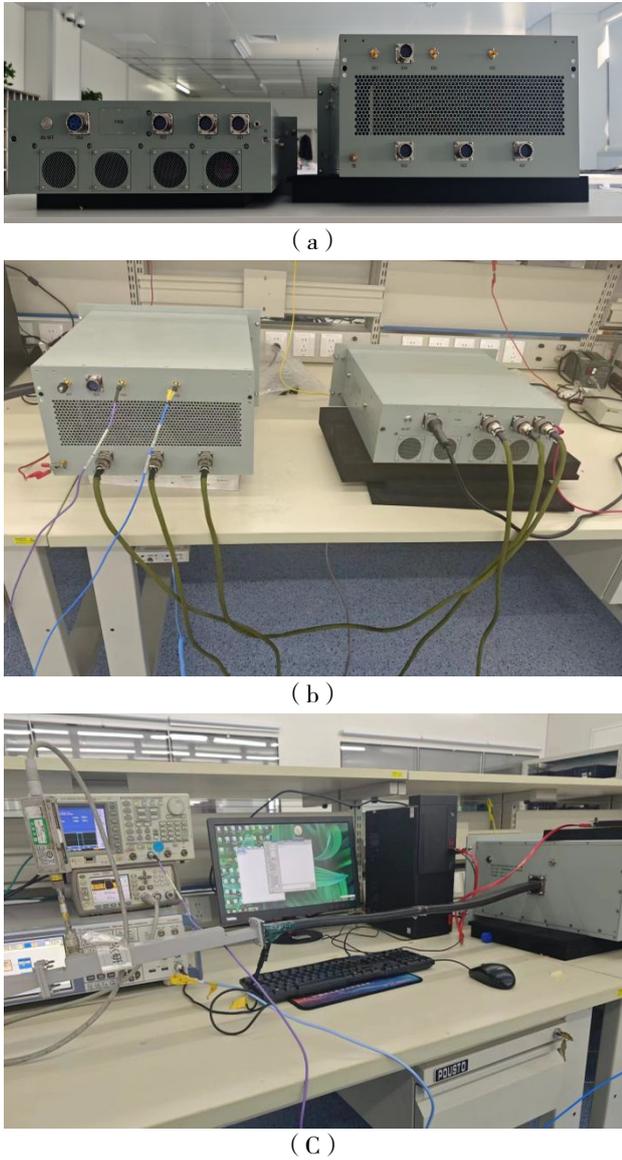
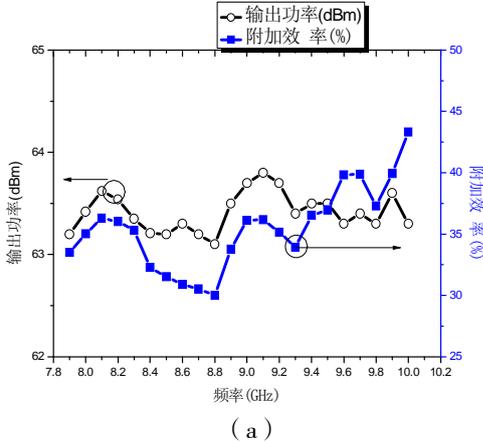
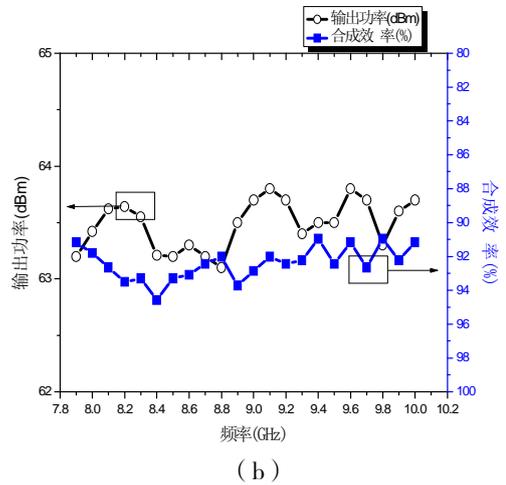


图 6 (a) X 波段固态功率放大器功放及配套电源实物图 (b) 连线图 (c) 测试图
 固态合成功放的输出功率、效率曲线如图 7 所示。



(a)



(b)

图 7 固态功率放大器(a)输出功率及附加效率曲线图 (b) 输出功率及合成效率曲线图

从图 7 的测试结果可以看到, 固态功率放大器在 7.9GHz-10.0GHz 的输出功率均 $\geq 63\text{dBm}$, 功率附加效率大于 30.0%。固态合成功放和功放单元模块的数据对比, 合成效率大于 90%。

4. 结论

本文利用 X 波段波导转探针过渡结构技术实现了 X 波段 7.9GHz-10.0GHz 内的大功率合成。结合 32 只自主研发的 X 波段 GaN 功率 MMIC 芯片, 通过 32 路合成网络合成后, 在 7.9GHz-10.0GHz 的频率范围内输出功率达到 2KW 以上, 附加效率大于 30.0%, 合成效率大于 90%。本文为 X 波段固态功率合成提供了一种大功率、高效率的技术方案。

参考文献:

- [1] David M Pozar.微波工程[M].3 版.北京: 电子工业出版社, 2006.
- [2] 杨迎.微波固态宽带功率合成关键技术研究[D].成都: 电子科技大学, 2018.
- [3] 成海峰,徐建华. C 波段 GaN 空间合成固态功率放大器[J]固体电子学研究与进展,2016,36(1):17-20
- [4] 星载氮化镓功率放大器设计[D]. 陈炽; 胡涛; 陈俊; 菊卫东; 汪蕾. 《固体电子学研究与进展》(5)