

1.65~3 GHz 500 W 功率放大器设计与实现

薛 新,董 亮,吴佳倩

(中国电子科技集团公司第三十六研究所,浙江 嘉兴 314033)

摘要: 现代发射系统对功率放大器的工作频带和功率等级提出了越来越高的要求,而基于新型GaN功率器件的功放设计可以满足这些新的需求。采用GaN HEMT进行基本功放单元设计,并创新性地采用非对称结构的5路径向功率合成器实现整机所需功率同时提高整机效率。该功率放大器工作频率为1.65~3 GHz,实测输出功率大于500 W(CW),电源转换效率大于25%,较同类产品在效率体积等指标上有较大提升。该产品适用于高功率系统应用,如EMC测试、电子对抗等。

关键词: GaN 功率管;高功率;高效率

中图分类号: TN722

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.212199

中文引用格式: 薛新,董亮,吴佳倩. 1.65~3 GHz 500 W 功率放大器设计与实现[J]. 电子技术应用, 2022, 48(4): 113–116.

英文引用格式: Xue Xin, Dong Liang, Wu Jiaqian. Design and implementation of a 1.65~3 GHz 500 watts power amplifier[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(4): 113–116.

Design and implementation of a 1.65~3 GHz 500 watts power amplifier

Xue Xin, Dong Liang, Wu Jiaqian

(No.36 Research Institute of CETC, Jiaxing 314033, China)

Abstract: Modern transmission systems have put forward higher and higher requirements for the working frequency band and power level of power amplifiers, and the design of power amplifiers based on GaN power devices can meet these new requirements. In this paper, GaN HEMT is used to design the basic power amplifier unit, and the 5-path power synthesizer with asymmetric structure is innovatively used to realize the required power of the whole machine and improve the efficiency of the whole machine. The operating frequency of the power amplifier is 1.65~3 GHz, the measured output power is greater than 500 W(CW), and the power conversion efficiency is greater than 25%. Compared with similar products, the efficiency and volume index have been greatly improved. This product is suitable for high-power system applications, such as EMC testing, electronic countermeasures, etc.

Key words: GaN power device; high power; high efficiency

0 引言

近年来军民用通信技术更新步伐很快,与此对应的通信装备也在不断地更新换代。作为射频微波发射系统的主要设备,微波功率放大系统的主要发展趋势一直以来都是增大频谱宽度,增大功率及效率,减小器件和电路的体积、重量和制造成本。由于每一种射频器件在兼顾频率和功率时都存在极限,促使人们不断探索新的工作原理,新的器件结构,采用新型材料来突破原有的极限,同时在满足整机大功率输出方面也在不断探索新的技术实现方式,并已经取得了较大进展,采用新的功率器件和新的整机功率实现方式设计的固态功率放大器也已逐渐广泛使用。

本文设计的固态功率放大器主要功能是将系统信号发生器产生的1.65~3 GHz 各类调制信号放大至500 W以上射频连续波功率,可用于EMC测试、电子对抗等高功率系统应用。

1 总体组成方案

500 W 固态功率放大器组成框图如图1所示,整机由前级功放单元、推动级功放单元、末级功放单元、环路增益控制单元、电源监控单元以及定向耦合器等组成,每个独立的单元进行模块化设计,以提高可靠性,并增强实际使用的灵活性,提高可维修性。

为保证整机技术的先进性,整机射频通道的核心部分采用先进的第三代半导体材料器件GaN功率管,其效率和功率密度指标均远远超过Si和GaAs材料器件^[1];其次创新性地采用非对称结构的5路径向功率合成器来减小合成损耗,提高合成效率,保证整机输出功率与效率的最优化,进而实现性能提升。

图1中功放输入信号经前级模块增益补偿、均衡、放大等处理后,送推动级功放、隔离器,为末级功放提供足够的功率驱动和杂波抑制,再经5路末级功放放大、合成到所需的功率等级,在大功率滤波器滤除谐波后,最

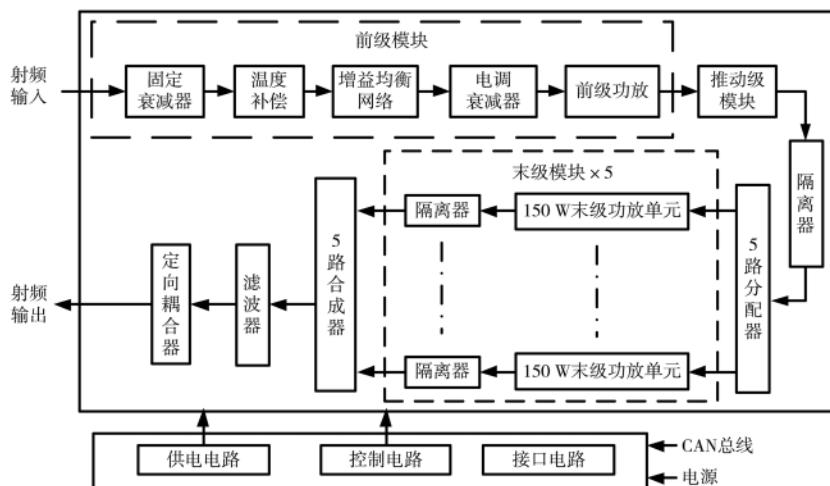


图 1 1.65~3 GHz 500 W 功率放大器组成框图

后经过定向耦合器进行耦合输出。本机还具有遥控和过热、失配保护功能以及输出功率分挡等功能,能够充分满足系统长时间功率发射需求。

2 关键部件设计

2.1 末级模块设计

作为射频功率放大器整机最核心的部分,图 1 中的 5 个末级功放单元均采用两路 80 W 功放模块合成的方式,以获得 150 W 左右输出功率。其原理框图如图 2 所示。

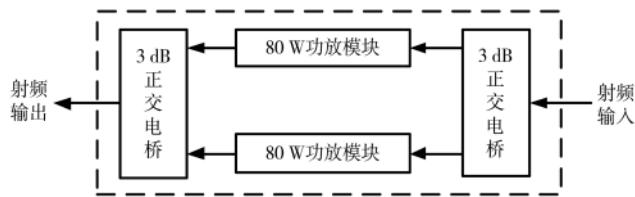


图 2 150 W 末级功放单元组成框图

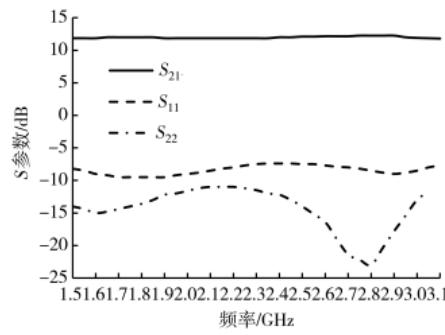
图 2 中 80 W 功放模块采用了 CREE 公司 GaN 功率管 CG2H30070F 设计,其器件的主要特性如表 1 所示,首

表 1 CG2H30070F 功放管主要特性

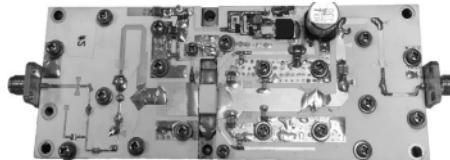
项目	指标
工作频率/MHz	500~3 000
输出功率/W	85(典型值)
功率增益/dB	≥ 10
漏极效率/%	≥ 58
工作电压/V	28

先利用其大信号模型建立电路仿真拓扑模型,如图 3 所示,ADS 软件仿真结果如图 4 所示,本文主要关注的模块 S_{21} 、 S_{11} 、 S_{22} 等参数均满足设计要求^[2]。

经过调整,最终完成的功放模块采用介电常数为 3.48 的 ROGERS 4350B 印制板,厚度为 0.508 mm,PCB 尺寸为 130 mm×50 mm,印制板左半部为输入匹配电路与栅极偏置电路、右半部分为输出匹配电路与供电电路,加电时序电路放在模块盒底部反面。PCB 上下两部分之间由大面积敷铜接地隔离,避免馈电部分受干扰引起自激,增强电路的工作稳定性。80 W 功放模块实物如图 4 所示,经过调整优化,采用 AB 类放大电路的末级模块^[3],实测在 1.6~3 GHz 范围内输出功率能达到 85 W 以上,增益大于 10 dB,漏极效率大于 50%,满足设计要求。



(a) 仿真结果



(b) 实物图

图 4 80 W 功放模块 ADS 仿真结果及实物图

2.2 五路径向合成器设计

目前常用的功率合成方式主要有空间合成、平面电路合成等几种^[4]。空间合成技术具有合成效率高,承受功率大、带宽性能好、可有效防止辐射损耗、散热特性良好等优点,但其体积大、质量重,不适宜小型化设计。平面合成技术采用平面电路加工技术,结构及装配简单,

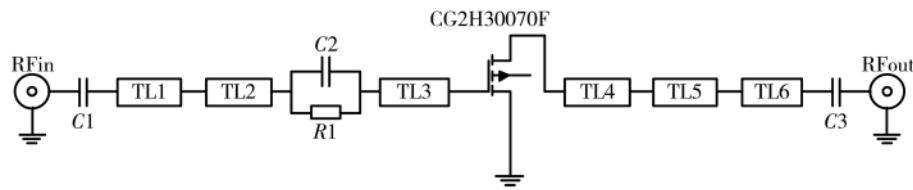
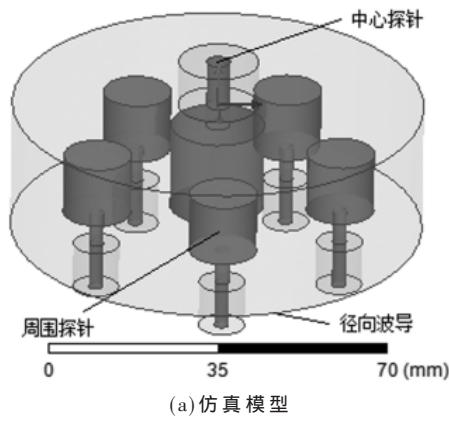


图 3 80W 功放模块 ADS 仿真电路模型

体积小,质量轻,容易与电路中其他器件互连,但其合成效率不高,承受功率受限,不适宜超大功率合成。

综合几种合成方式的优缺点并结合本功放需求,本方案在具体实施中充分考虑体积、质量、效率等因素,采用空间合成方式,考虑末级模块功率等级,最后采用非对称结构5路径向合成器。

径向波导是一种非均匀传输线,由上下两个圆形导体组成,其内部示意图及外形如图5所示。



(a) 仿真模型



(b) 实物图

图5 5路径向功率合成器仿真模型及实物图

图6是仿真的合成器各个端口的场分布图,由场分布图可以直观地看出电场能量被均分到周围探针。从仿真的电场分布图中可以看到,在选取合适的结构参数情况下,5路径向功率合成器可以完成将中心探针中的电场均匀分布到径向分布的周围探针中去^[5]。

本文利用HFSS软件对该合成器分别进行了仿真设计,仿真结果如图7所示,可以看出在1.6 GHz~3 GHz频段内,各个支路的振幅基本相同, S_{11} 小于-20 dB, S_{21} 小于0.15 dB。

经过加工后对实物进行测试,实物图及测试结果如图5和图8所示,在1.6 GHz~3 GHz频段范围内的回波损耗优于-11 dB,插入损耗小于0.3 dB。各个支路相位基本一致,相位差不到0.5°,所以相位差对这种合成系统的合成效率影响也非常小。通过以上仿真及测试结果,根据式(1),可以推算出本径向波导合成器理论上的

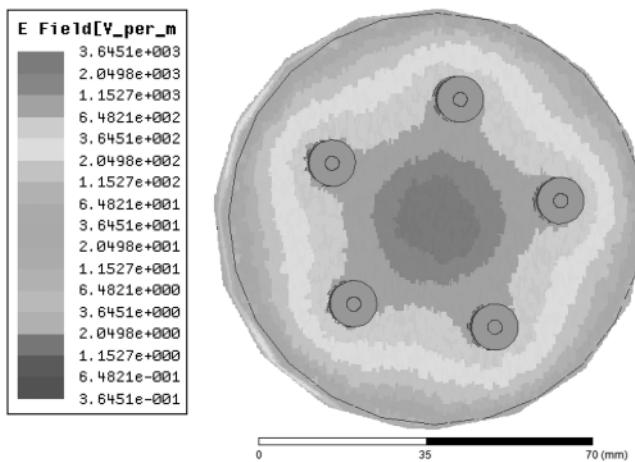


图6 5路径向合成器各端口场分布图

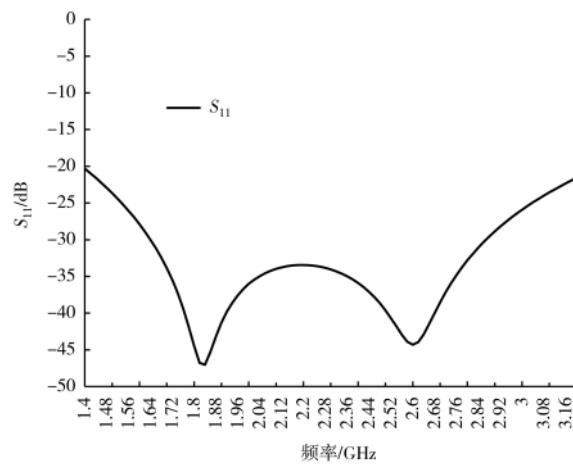
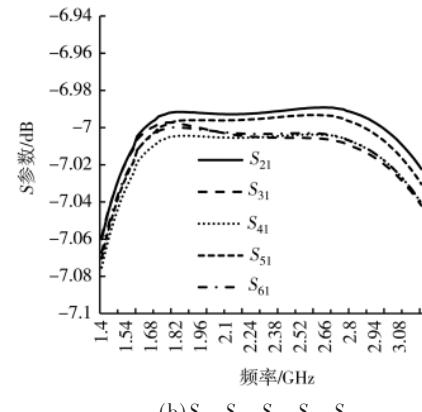
(a) S_{11} (b) S_{21} 、 S_{31} 、 S_{41} 、 S_{51} 、 S_{61}

图7 径向功率合成器各端口S参数仿真曲线

合成效率在93%以上^[6]。

$$\eta \approx N \cdot \sqrt{\frac{|S_{21}^2|}{1 - |S_{11}|^2}} \quad (1)$$

其中, η 为合成效率, N 为5路, S_{21} 与 S_{11} 均为合成器S参数。

3 实测结果

本方案设计的射频功率放大器如图9所示,供电采

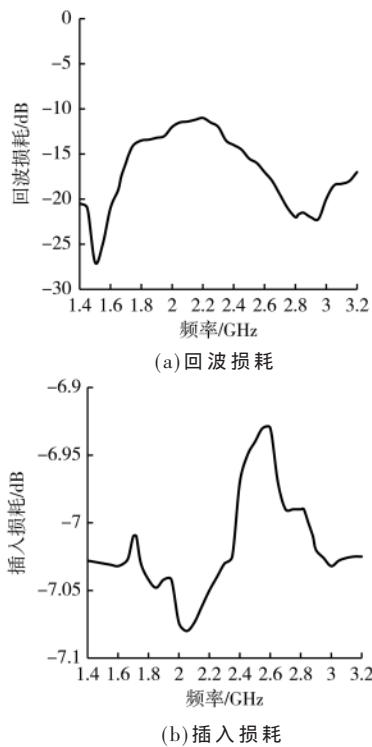


图 8 径向功率合成器端口回波损耗与插入损耗实测曲线

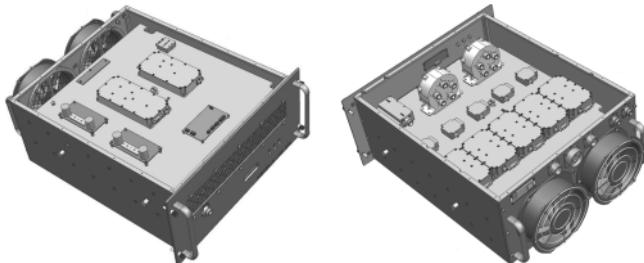


图 9 1.65~3 GHz 射频功率放大器内部布局图

用 28 V DC, 实测数据如表 2 所示, 在 1.65~3 GHz 工作频段上, 输出功率大于 500 W, DC-RF 转换效率大于 25%, 整机重量小于 35 kg。与同类产品的比较见表 3, 可见在采用了高效率的 GaN 功率器件和高合成效率的径向合成器后, 本设计较同类产品在整机效率、体积、重量等指标均有较大提升。

4 结论

本文采用 GaN 射频功率管和非对称 5 路径向功率

表 2 射频功率放大器实测数据

频率/MHz	输出功率/W	谐波抑制/dBc	杂散抑制/dBc	电流/A	效率/%
1 650	528	52	60	71.4	26.4
1 800	513	55	60	70.2	26.1
2 000	520	55	60	72.3	25.7
2 200	535	55	60	75.8	25.2
2 400	535	55	60	70.8	27.0
2 600	553	55	60	63.5	31.1
2 800	580	55	60	66.0	31.4
3 000	533	55	60	67.5	28.2

合成器来完成 1.65~3 GHz 500 W 连续波射频功率放大器设计, 射频功率放大器的末级模块采用 AB 类放大电路, 有效提高射频模块的 DC-RF 转换效率, 减少工作时产生的热量。通过以上设计使整机的效率有所提高, 同时减小了体积和重量。本文设计的功放与同类产品进行对比, 在效率、体积、重量等指标上均有较大提升。

参考文献

- [1] 王利斌, 陈海波. 一种基于 GaN 的宽带功率放大器的设计与分析 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(9): 95~99.
- [2] 崔浩, 罗维玲, 龚利鸣, 等. 一种 S 频段 GaN 功率放大器的研制 [J]. 空间电子技术, 2013, 10(3): 28~32.
- [3] GREBENNIKOV A. 射频与微波功率放大器设计 [M]. 张玉兴, 赵宏飞, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [4] 郑新, 李文辉, 潘厚忠. 雷达发射机技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [5] 张政伟, 耿向羽. S 频段大功率径向波导合成器设计 [J]. 无线电工程, 2012, 42(6): 42~46.
- [6] BELAID M, WU K. Quasi-optical power amplifier using TEM waveguide concept [C]//2001 IEEE MIT-S International Microwave Symposium Digest, 2001.

(收稿日期: 2021-09-28)

作者简介:

薛新(1974-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 射频及微波电路。

董亮(1987-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 射频及微波电路。

吴佳倩(1993-), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向: 射频及微波电路。



扫码下载电子文档

表 3 同类产品比较

型号	工作频率/GHz	输出功率/W	谐波抑制/dBc	效率/%	体积/mm ³	重量/kg	生产厂商
500S1G2z5	1~2.5	500	20	23.8	503×343×610	75	美国 AR
BBS4A5KRR	1~2.5	500	35	16.7	483×222×559	40	美国 Empower
BLMA1020-450	1~2	450	20	12.9	483×310×630	70	德国 BONN
本机	1.65~3	500	50	25	483×222×567	35	本设计

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所