

基于反馈结构的宽带功率放大器研究与设计

霍彦锋¹ 高磊¹ 杨智昕¹

HUO Yanfeng GAO Lei YANG Zhixin

摘要

在现代通信等诸多领域,对于宽带功率放大器有着持续且迫切的需求,由此推动了对新型宽带功率放大器设计方法的探索。基于此,文章提出了一种基于反馈技术的跨多倍频超宽带功率放大器设计方法。通过增加反馈结构,降低整个电路对晶体管自身性能变化的敏感度。结合负载牵引技术,分析晶体管负载端宽频各点的最优阻抗值。功率放大器采用低通 L-C 匹配网络,实现功率管复数阻抗到实阻抗的变换,并利用切比雪夫变换器结构实现实阻抗到 $50\ \Omega$ 的宽带匹配。匹配网络设计过程中,利用实频技术进行了网络优化,达到了良好的匹配结果。放大器偏置电压 28 V ,静态电流 0.21 A ,测试结果显示,在 $0.5\sim 2.5\text{ GHz}$ 带宽内,放大器连续波输出功率大于 42 dBm (15.8 W),饱和功率增益大于 12 dB ,功率平坦度小于 $\pm 1\text{ dB}$,最大漏极效率为 52.3% 。

关键词

宽带功率放大器; 反馈结构; ADS; 负载牵引; 实频技术; 切比雪夫变换器

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.12.019

0 引言

随着无线通信技术的高速发展，无线通信系统要求在更宽的频段上进行数据传输，尤其是在电子对抗、干扰机、宽带电台以及电磁兼容测试等领域尤为显现。因此，宽带功率放大器的研究也成为研究的热点，且极具现实意义。因此，本文设计了一款宽带高效率功率放大器，有望为未来相关技术领域的蓬勃发展筑牢根基，提供强有力的支撑与保障，助力推动行业朝着更高水平不断迈进^[1]。

本文的宽带功率放大器,使用ADS微波仿真软件对CGH40010功率管的结构进行改进,通过对反馈结构的引入,在0.5~2.5 GHz带宽内优化了增益平坦度,获得了较高的增益和发射效率。

CGH40010 由 Cree 公司生产，是一款采用氮化镓 (gallium nitride, GaN) 技术的高电子迁移率晶体管 (HEMT)。CGH40010 适用于 5G 通信的 FR1 频段 (Sub-6 GHz)，在发射路径上，CGH40010 可提供高达 13 W (41.1 dBm) 的饱和输出功率，是通用的宽频解决方案。同时，CGH40010 还可以在 中频和射频应用，能够在 3.4~3.8 GHz 的频率范围内工作，输出功率达 12.8 W，效率超过 50%，其性能完全能够满足设计要求。

1 带反馈结构的宽带功率放大器的理论分析

宽带功率放大器的设计通常包括直流分析、反馈结构下的稳定性分析、负载牵引、输入/输出匹配设计、微带变换、整体优化设计等过程。宽带功率放大器的性能取决于增益、带宽和效率。

1.1 反馈结构

对于宽带放大器电路, 含有反馈网络的电路结构可以有效地改变放大器的性能。具有反馈结构的功率放大器, 如图 1 所示。其反馈结构 (Z_f) 与放大器电路形成闭环后, 输出信号再次传输到输入端, 负反馈的引入能够提高功率放大器的稳定性, 有效地拓展工作带宽, 实现带内良好的增益平坦度和输入输出驻波, 控制输入和输出阻抗更为集中, 从而减轻匹配网络的设计难度^[2]。

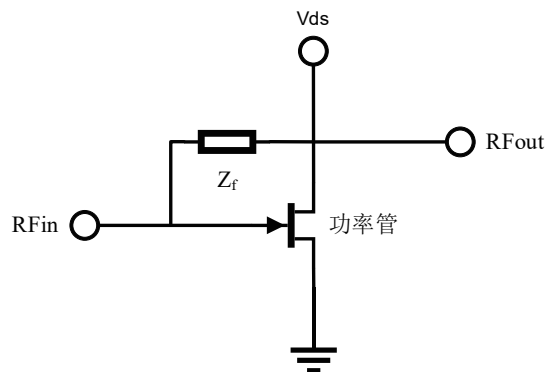


图 1 带反馈结构的功率放大器电路形式

1. 河北晶禾电子技术股份有限公司 河北石家庄 050200

本次设计希望采用反馈结构，通过对功率放大器输入、输出匹配网络参数的调整和优化，使其稳定性和宽带增益同时达到期望值。

1.2 宽带匹配理论

对于任意的复数阻抗，在进行宽带匹配电路设计时需要解决最小反射系数下的较宽匹配频带，或者给定带宽指标下如何减小匹配网络节数的矛盾需求。Bode-Fano 准则给出，对某些标准类型的负载阻抗，用任意匹配网络获得的最小反射系数幅值的理论极限^[3]。

对于并联 RC 负载阻抗的无耗网络，Bode-Fano 准则规定^[4] 公式为：

$$\int_0^{\infty} \ln \frac{1}{|\Gamma(\omega)|} d\omega = \Delta\omega \ln \frac{1}{|\Gamma_m|} \leq \frac{\pi}{\tau} \quad (1)$$

由此可知，对于给定的负载（RC 乘积固定），只有以通带内有较高的反射系数（ $\Delta\omega$ ）为代价，才能达到较宽的通带（ Γ_m ）。

2 带反馈结构的宽带功率放大器设计

对于单级功率放大器的设计，可以遵循通用功率放大器设计规则：直流分析、稳定性分析、偏置电路设计、输入匹配电路和输出匹配电路设计、微带线转换，最后进行仿真实验^[5]。单级功率放大器的基本结构图如图 2 所示，由输入匹配网络、稳定网络、栅极偏置网络、反馈网络、漏极偏置网络、输出匹配网络构成。

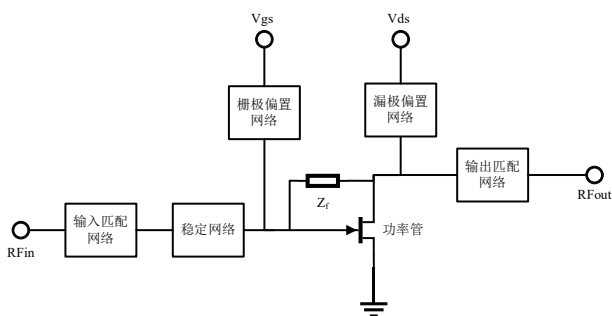


图 2 单级功率放大器的基本结构图

由于 CGH40010 功率管自身稳定性的缺陷，本文采用的稳定措施是在栅极串联一个小电阻器，以增加电路的稳定性。如表 1、表 2 所示，反馈网络选用了反馈深度适中的由 300 Ω 电阻和 200 pF 电容组成的串联组合。栅极、漏极馈电网络选用 LC 偏置。根据系统要求和设计目标，静态工作点选为 $I_{ds}=211$ mA（ $V_{gs}=-2.7$ V）。稳定性仿真原理图如图 3 所示，稳定性系数 K 和 B_1 在 0.5~2.5 GHz 频带内的仿真结果如图 4 所示，其中稳定因子 $K > 1$ ，稳定辅助因子 $B_1 > 0$ ，满足绝对

稳定条件。

表 1 CGH40010 增加反馈结构的负载牵引数据

频率 /MHz	Zsource 源阻抗	Zload 负载阻抗
500	23.2+j23.6	22.4+j4.2
1000	10.7+j12.6	20.2+j7.0
1500	7.3+j4.9	20.3+j5.4
2500	5.4-j5.9	15.6+j1.8

表 2 CGH40010 手册提供的负载牵引数据

频率 /MHz	Zsource 源阻抗	Zload 负载阻抗
500	20.2+j16.18	51.7+j15.2
1000	8.38+j9.46	41.4+j28.5
1500	7.37+j0	28.15+j29
2500	3.19-j4.76	19+j9.2

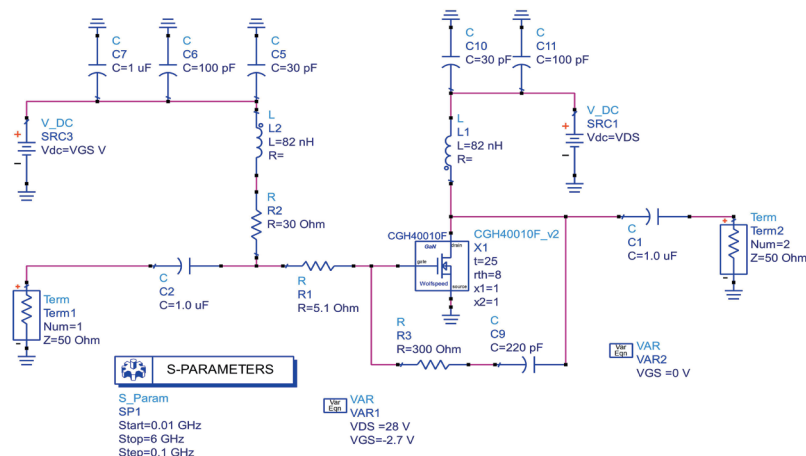


图 3 CGH40010 稳定性仿真原理图

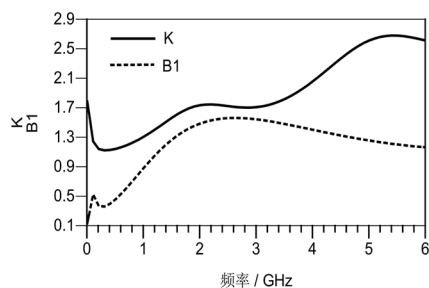


图 4 稳定系数 K 、 B_1 在不同频率时的变化

功率管 CGH40010 的输出阻抗包含电抗部分，首先采用 L、C 匹配网络电路将输出阻抗转变到实阻抗，然后再以切比雪夫变换结构 1/4 波长阶梯阻抗变换网络实现实阻抗间的宽带匹配设计^[6]。输出匹配网络原理图如图 5 所示，借助微波仿真软件 ADS 中的行为级模型——数据元件 DAC（data access component），定义了负载阻抗随频率变化的参数^[7]，实现了基于实频技术的匹配网络优化。仿真结果如图 6 所示，输出匹配网络的插损优于 0.3 dB，驻波优于 1.5，实现了非常好的优化结果。

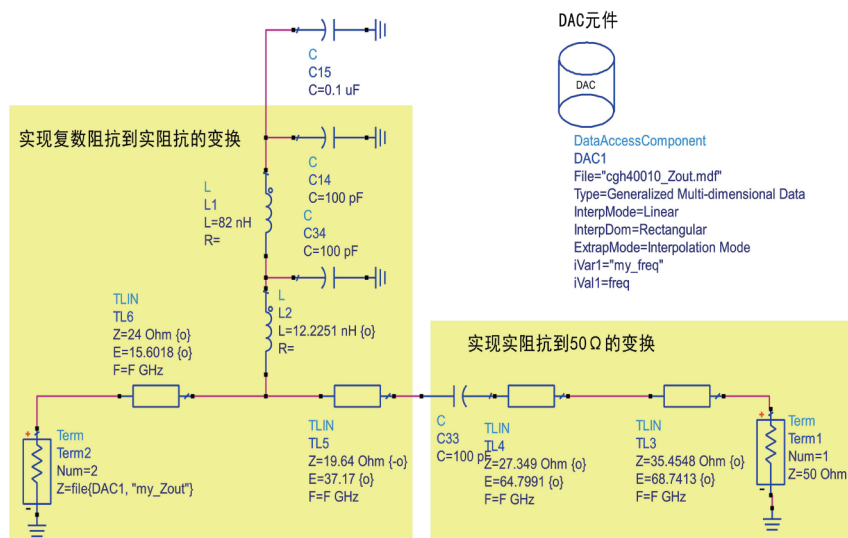


图5 输出匹配网络原理图

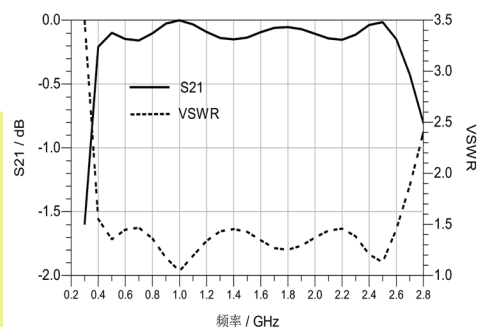


图6 输出匹配网络优化后的增益、驻波曲线

输入匹配电路的基本设计思想是在于补偿晶体管的增益随频率的变化特性^[8]，本设计的输入匹配采用有耗网络与负反馈结构相结合的方式增益补偿，实际调试时会辅以电抗失配法。输入匹配网络的设计方法同上节，同样采用基于实频技术的网络优化方法，图7显示了输入匹配网络的优化原理图，图8显示了输入匹配网络优化后的仿真曲线，输入匹配网络的插损值在0.5~2.5 GHz频段内优化到2 dB以内，在频段高端的插损能到1 dB以内，网络驻波在2.5 dB以内。造成输入匹配网络插损值偏大的原因，是由于引入输入有耗网络和反馈网络导致。

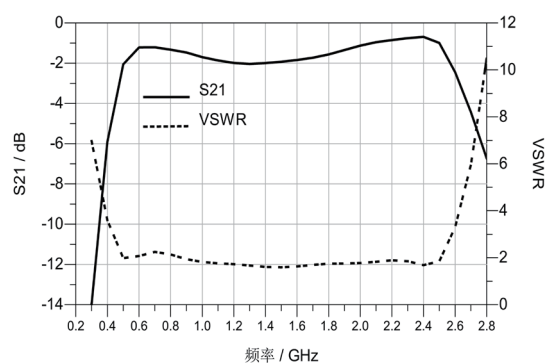


图8 输入匹配网络优化后的增益、驻波曲线

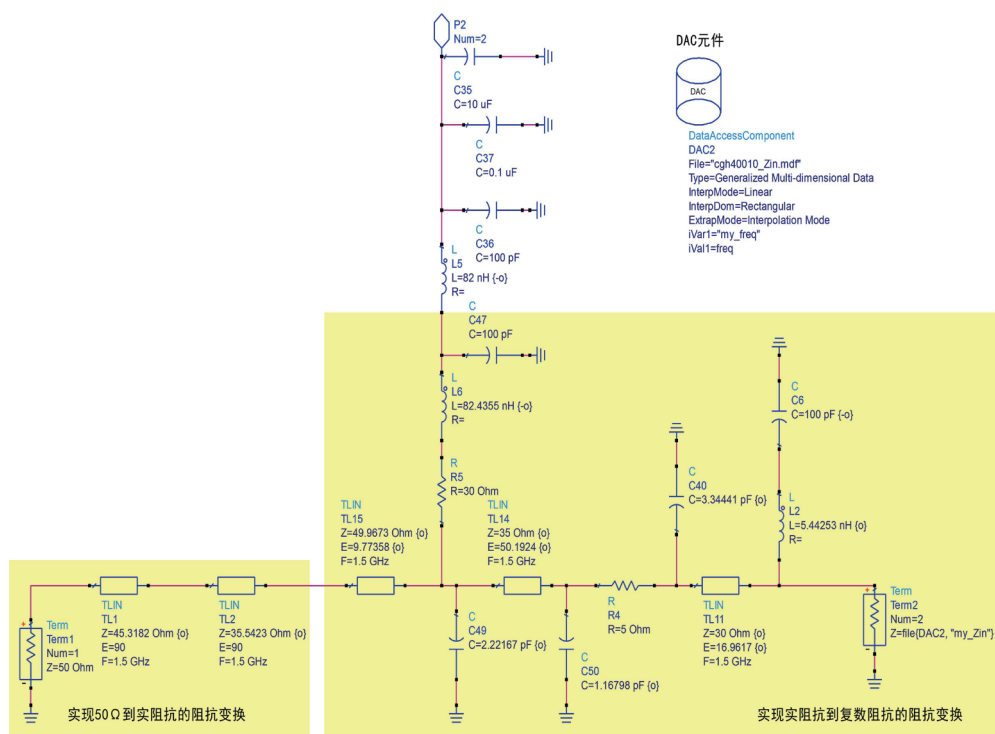


图7 输入匹配网络原理图

接下来，根据上述优化的输入、输出匹配网络，代到功率管CGH40010进行谐波平衡仿真，同时将理想微带线更换为实际微带线^[9]。在设计微带线时，考虑所需的工作频率、传输线的长度、阻抗匹配要求以及电路尺寸要求，基板选用陶瓷填充的聚四氟乙烯和布纹玻璃纤维的复合材料，其损耗角正切 $\tan\delta$ 为0.0025，相对介电常数 ϵ_r 为10.2，介质厚度 h 为0.635 mm。

谐波平衡仿真的结果见图9所示，功率管输入功率为28 dBm，功率增益为14~15.5 dB，饱和功率大于42 dBm，饱和平坦度1.5 dB，满足设计要求。

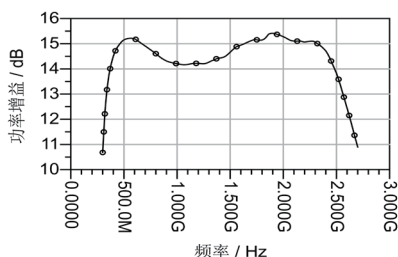


图9 功率管 CGH40010 单管联合仿真增益曲线

3 测试结果

宽带功率放大器的增益平坦度、发射效率都是极其重要的指标,本文使用矢量网络分析仪对功率放大器进行测试,用信号源、功率计进行发射效率测试。矢网测出的小信号增益曲线如图 10 所示,在 0.5~2.5 GHz 的频率范围内小信号的增益 ≥ 16 dB,增益平坦度为 ± 1.0 dB,输入驻波 ≤ 2.0 。功率放大器在不同输出功率下的效率曲线如图 11 所示,其中在 1 GHz 频率下输出 42 dBm 时的漏极效率为 52.34%,在 2 GHz 频率下输出 42 dBm 时的漏极效率 42.84%。以上数据说明,基于反馈结构的功率放大器,更容易实现宽带匹配,能较好的实现低频增益压制,实现较高的漏极效率,同时验证了仿真的准确性,满足设计要求。电路布局图如图 12 所示,实物如图 13 所示。



图 10 功率放大器实测小信号增益曲线

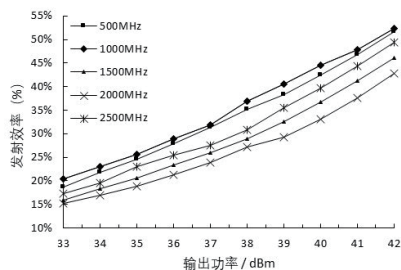


图 11 功率放大器在不同输出功率下的效率曲线

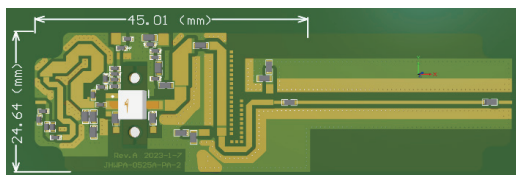


图 12 功率放大器电路布局图

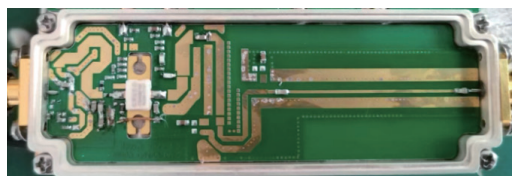


图 13 功率放大器电路实物图

4 结语

本文首先对带反馈结构的宽带功率放大器进行了理论分析,然后使用 ADS 仿真软件对 CGH40010 在 0.5~2.5 GHz 进行了仿真设计,通过负载牵引技术,分析并验证了反馈结构可以让晶体管负载阻抗值更为集中,有利于宽带匹配。在输入、输出匹配电路设计中,采用实频技术对切比雪夫变换结构的宽带匹配网络进行了设计和优化,通过实物对比测试,达到了良好的匹配结果,具有广泛应用的价值。

参考文献:

- [1] 高明明,程龙,南敬昌,等.滤波器型偏置的可重构超宽带功率放大器[J/OL].微波学报,1-11[2024-04-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1493.TN.20240407.1122.002.html>.
- [2] 张初镜.30 MHz~2000 MHz 宽带功率放大器的设计[D].南京:东南大学,2012.
- [3] 波扎.微波工程:第3版[M].张肇仪,周乐柱,吴德明,等.译.北京:电子工业出版社,2006.
- [4] FANO R M. Theoretical limitations on the broadband matching of arbitrary impedances[J].Journal of the Franklin institute, 1950,249(2): 139-154.
- [5] GUO J Q, YU J G. Research and design of broadband power amplifier with feedback structure based on ADS[J].Journal of physics: conference series, 2021, 1920(1):012056.
- [6] 杨文琪,钟世昌,李宇超.1~4 GHz 80 W GaN 超宽带功率放大器[J].电子学报,2019,47(8):1803-1808.
- [7] 是德科技 Keysight Technologies. ADS 中的数据元件 DAC 的使用[EB/OL]. (2020-08-13)[2024-05-27]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/182892973>.
- [8] 冈萨雷斯.微波晶体管放大器分析与设计:第2版[M].白晓东,译.北京:清华大学出版社,2003.
- [9] 徐兴福.ADS2011 射频电路设计与仿真实例[M].北京:电子工业出版社,2014.

【作者简介】

霍彦锋(1984—),男,河北石家庄人,本科,工程师,研究方向:射频与微波功率放大器的电路设计。

(收稿日期:2024-09-11)