

9kHz-400MHz, 100W 宽带功率放大模块设计

蔡昌恒 许友坤 高 峯

贵州航天计量测试技术研究所 贵州 贵阳 550009

【摘要】：本文基于 GaN HEMT 工艺平台，选用 GaN 功率管管芯，运用负反馈稳定技术、宽带同轴变压器+集总元件混合匹配技术，借助 ADS 软件仿真验证，并结合实物调试，成功研制出了一款 9kHz-400MHz 超 15 个倍频程的宽带功率放大模块。测试结果显示，在工作频段内，模块典型输出功率超 100W，功率增益大于 50dB，功率平坦度小于±1.5dB，漏极效率大于 28.87%，谐波抑制优于-20dBc。

【关键词】：宽带；功率放大器；阻抗匹配；100W；GaN

DOI:10.12417/2705-0998.26.04.045

1 引言

随着现代无线电子系统朝着宽带化、轻量化、低成本和高性能方向发展，对射频发射前端的输出带宽、线性度、输出功率等指标提出更为严苛的要求，使得应用于发射前端上的宽带功率放大模块的研制技术成为现代无线通信系统研发过程中的关键核心技术^[1-2]。宽带功率放大模块广泛应用在远程通信系统、雷达系统、电子对抗系统以及测试系统等系统中，其通过将电源功率转化为无线发射信号功率的方式实现对目标宽带信号的功率放大并输出，是现代无线电子系统中的关键核心组件，其性能的优劣直接影响着系统整机的关键战技指标，同时也控制了系统整机的尺寸、成本以及效能^[3-5]。

近年来国内外报道的关于宽带功率放大模块设计的文献^[3-9]中，所涉及的宽带功率放大模块的工作带宽大多在 2~8 个倍频程，超过十个倍频程的百瓦级宽带功率放大模块鲜有报道。针对此点，本文基于 GaN HEMT 功率管管芯，通过采用负反馈稳定方式解决宽带应用下的稳定性难题，采用宽带同轴变压器和集总元件混合匹配技术实现目标频段下的宽带阻抗匹配，并最终成功研制出了一款 9kHz-400MHz 超 15 个倍频程的宽带功率放大模块。测试结果显示，在工作频带内，该宽带功率放大模块典型输出功率超 100W(50dBm)，功率增益大于 50dB，功率平坦度小于±1.5dB，漏极效率大于 28.87%，谐波抑制优于-20dBc。

2 主要技术指标及理论分析

2.1 主要技术指标

- (1) 工作频段：9kHz-400MHz；
- (2) 典型输出功率：≥50dBm；
- (3) 功率增益：≥50dB；
- (4) 谐波抑制：≤-20dBc；
- (5) 整机功耗：≤350W。

2.2 稳定性理论分析

对于宽带功率放大模块能否稳定工作，可用稳定性系数 K

来衡量，其稳定工作的条件^[3]可由下式给出：

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} > 1 \quad (1)$$

$$|\Delta| = |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}| \quad (2)$$

在目标工作频段内，当 $K > 1$ 时，宽带功率放大模块即可实现全频段内无条件稳定，进而避免由于稳定性问题引起的电路自激等问题。针对宽带功率放大模块，由于工作频段宽，为实现全频段无条件稳定目标，可采用并联 L-R-C 负反馈电路的方式，负反馈电路的引入不仅可以有效改善电路的稳定性指标，同时还能有效拓宽电路的工作带宽，进而使得功率放大电路更加易于实现宽带阻抗匹配^[3]。

2.3 宽带阻抗匹配理论分析

根据 Bode-Fano 准则^[2]，对于给定负载阻抗的宽带阻抗匹配网络，其匹配带宽 $\Delta\omega$ ($\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ ， ω_2 和 ω_1 分别是工作频段的上边界频率和下边界频率) 和最小反射系数 $|\Gamma|_{\min}$ 的关系可由下式给出：

$$|\Gamma|_{\min} = \exp\left(\frac{-\pi\omega_0^2\tau}{\Delta\omega}\right) \quad (3)$$

其中， $\omega_0 = \sqrt{\omega_1\omega_2}$ 是中心频率， $\tau = RC = L/R$ 。

阻抗匹配网络的品质因数 Q 可由下式^[2]给出：

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)联立可得：

$$|\Gamma|_{\min} = \exp(-\pi Q\omega_0\tau) \quad (5)$$

从式(5)可以看出，目标反射系数下可实现的阻抗匹配带宽与品质因数成反比，即期望阻抗匹配带宽越宽，要求阻抗匹配网络的品质因数越小^[1]。考虑到本宽带功率放大模块工作频段覆盖 9kHz-400MHz，根据上述分析可知，欲实现目标带宽下的阻抗匹配电路设计，需使用低 Q 值的阻抗匹配网络（如宽带传输线变压器）；同时，从电路理论分析，目标频段下的匹配电路网络跨越了集总参数理论和分布参数理论，需要使用混合集总元件和分布元件的匹配网络来完成宽带阻抗匹配电路设计

[2]。综上，需使用宽带同轴变压器和集总元件混合匹配的方式解决本模块的宽带阻抗匹配电路设计难题。

3 模块电路设计

3.1 模块总体设计方案

为同时兼顾宽带（工作频段超过 15 个倍频程）、高输出功率（典型输出功率 $\geq 50\text{dBm}$ ）、高增益（ $\geq 50\text{dB}$ ）、线性度（谐波抑制优于 -20dBc ）等要求，本模块设计拟采用三级放大单元（包括预放大单元、驱动放大单元以及末级功率放大单元，三个单元组成功率放大链路）级联方案，对应方案原理框图如图 1 所示。

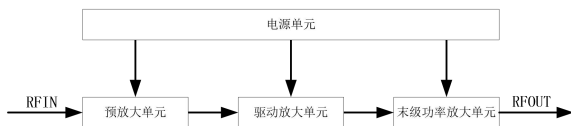


图 1 宽带功率放大模块方案原理框图

预放大单元作为本方案的第一级，选用工作在 A 类放大状态下的宽带低噪声放大器设计，利用低噪声放大器(LNA)高增益、高线性特点，可实现对输入小信号的第一级放大，达到后级电路要求的驱动电平的同时也可保证高线性度指标；驱动放大单元不仅有增益、输出功率要求，同时还有线性度的要求，是保障末级功率放大单元性能稳定发挥的关键，因此驱动放大单元按方案选用 GaN HEMT 功率管可以提供 W 级输出功率和宽带保障，同时让其工作在 AB 类放大状态下可以兼顾线性度和效率要求，并按宽带中功率放大电路进行设计；末级功率放大单元主要实现大功率信号输出，是保障模块最终输出功率、谐波抑制等指标的关键电路，因此末级功率放大单元也选用 GaN HEMT 功率管开展设计，同时工作在 AB 类放大状态。由于采用了多级级联放大结构，为保障各级放大单元之间的功率有效传输，并改善级联带来的匹配问题，放大链路中的输入匹配、级间匹配以及输出匹配采用宽带传输线变压器和集总元件混合匹配方式实现，以保障最终模块增益和输出功率指标的实现。电源单元主要为功率放大链路提供合适的静态偏置，是宽带功率放大模块实现功能及指标的重要辅助电路。

3.2 功率放大链路设计

根据总体方案，模块整机的输出功率及功率增益指标由功率放大链路保障，具体的功率放大链路设计实现原理如图 2 所示。



图 2 宽带功率放大模块功率放大链路

由图 2 可知，模块宽频带输入信号功率为 $-3\text{dBm}\sim-2\text{dBm}$ ，其首先经预放大单元提供 23dB 增益后实现 100mW(20dBm)功率信号输出，然后经驱动放大单元提供 20dB 增益后实现驱动

级输出功率达到 10W(40dBm)；考虑到整个模块增益大于 50dB，结合高增益放大电路设计经验，在驱动放大单元输出端加入了 3dB 固定衰减器，实现级间匹配改善的同时可有效避免由于链路增益过高引起的稳定性问题；最后由末级功率放大单元实现 100W (50dBm) 输出功率目标。链路各单元增益求和： $23\text{dB}+20\text{dB}-3\text{dB}+10\text{dB}=50\text{dB}$ ，因此链路总增益也满足技术指标要求。

3.3 稳定电路设计

结合理论分析，本模块采用并联 L-R-C 负反馈电路的方式实现工作频带内的稳定性设计，具体电路拓扑结构如图 3 所示。

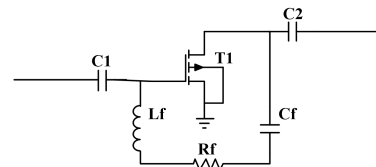
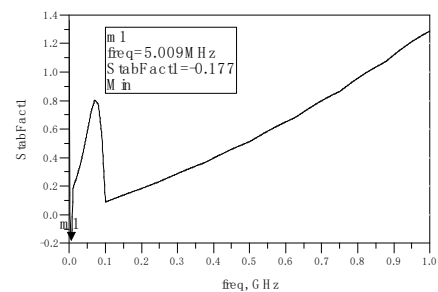
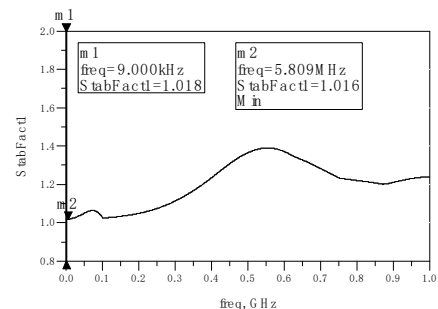


图 3 负反馈宽带稳定电路拓扑

其中，C1、C2、Cf 均为低损耗隔直电容，Cf、Rf、Lf 共同构成负反馈串联 L-R-C 支路，对于本模块应用，Rf 选用了耐受大功率的电阻，可有效改善反馈支路功率在电阻 Rf 上产生的功率耗散导致电阻过热而引起的电路可靠性问题。利用 ADS 软件对图 3 所示电路进行建模仿真得到图 4 所示稳定性仿真结果，从仿真结果可知，采用并联 L-R-C 负反馈电路的方式可实现本模块电路在工作频段内无条件稳定 ($K>1$) 的设计目标。



(a)未加入稳定措施效果



(b)加入负反馈稳定措施效果

图 4 负反馈宽带稳定电路稳定效果比较

3.4 宽带阻抗匹配电路设计

结合理论分析,本模块最终采用宽带同轴变压器和集总元件混合匹配的方式实现宽带阻抗匹配电路设计。其中,同轴变压器由在铁氧体磁芯上绕制特定长度 l 、特定特性阻抗 Z_t 的同轴电缆构成^[1-2],同轴电缆长度由下式给出:

$$l \leq \frac{\lambda_{\min}}{8} \quad (6)$$

其中 λ_{\min} 为工作频带高端频率对应的传输线最小波长^[2]。

同轴变压器在宽带阻抗匹配应用下的工作频带低端频率 f_{\min} 由下式给出:

$$f_{\min} \geq \frac{R_s L_c}{(4\pi)^2 n^2 \mu A_c} \quad (7)$$

其中, n 为匝数, μ 为铁氧体磁芯磁导率, A_c 为磁芯有效面积, L_c 为平均磁径长度, R_s 为目标阻抗^[2]。

从式(7)可以看出,为实现频带低端的拓展可使用高磁导率的磁芯,同时增加绕制匝数。为实现所选功率管在 100W 输出功率应用下的最佳输出阻抗与目标阻抗 50Ω 的宽带匹配,可先采用 4:1 同轴变压器(其中,同轴电缆选用了特性阻抗为 25Ω 的柔性同轴电缆,铁氧体磁芯选用了磁导率为 4000 的 MnZn 高磁导率铁氧体磁芯)结构,实现宽频带下 50Ω 目标阻抗到 12.5Ω 中间阻抗的阻抗变换^[2],本模块所用 4:1 同轴变压器电路原理图如图 5 所示:

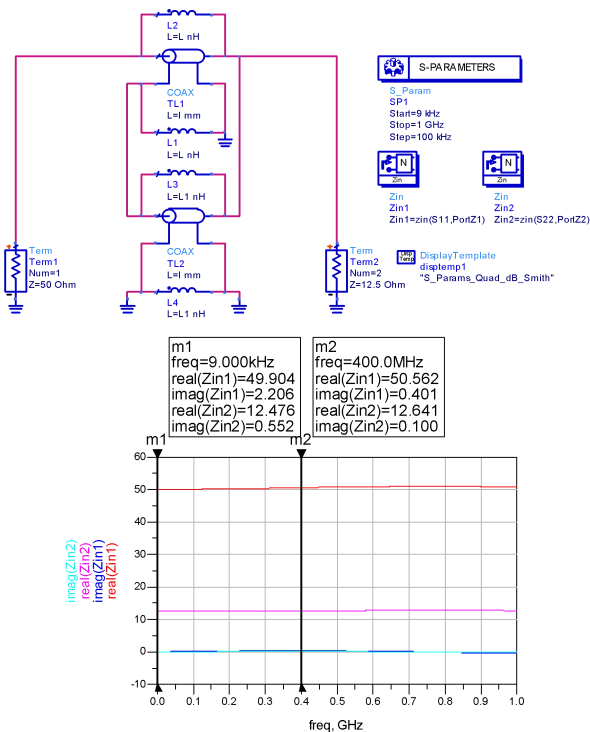


图 5 4:1 同轴变压器电路原理图(上)及其阻抗变换效果(下)为实现最终匹配目标,还需要使用集总元件配合完成最终

阻抗匹配电路设计,本模块最终宽带阻抗匹配电路实现如图 6 所示:

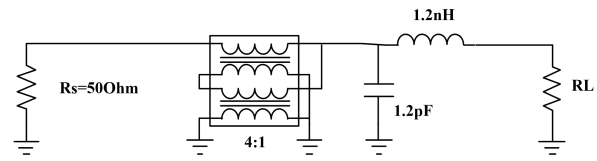


图 6 宽带阻抗匹配电路原理图

通过 ADS 软件对其进行建模仿真得到如图 7 所示仿真结果,从仿真结果可以看出,所设计的宽带匹配电路在全频带内插损 $IL \leq 0.351 \text{ dB}$,驻波系数 $VSWR \leq 1.737$,可满足本模块实际应用需求。

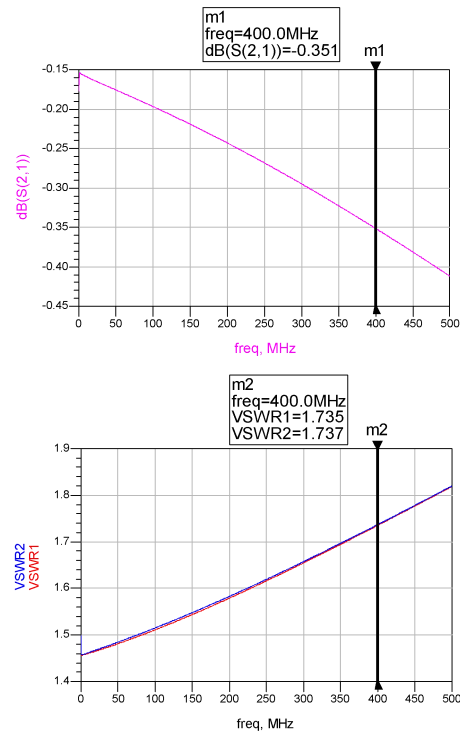


图 7 宽带匹配电路插损(上)及驻波(下)仿真结果

3.5 功耗设计

本模块功耗主要由末级功率放大单元及驱动放大单元决定,其中末级功率放大单元和驱动放大单元按设计均工作在 AB 类工作状态,其实际漏极效率能达 40%以上,按 40%计算末级功率放大单元的功耗约为 $100\text{W} \div 40\% = 250\text{W}$,驱动级放大单元的功耗约为 $10\text{W} \div 40\% = 25\text{W}$;预防大单元按设计工作在 A 类线性工作状态,其实际功耗约为 2W。因此,模块实际总功耗为 $250\text{W} + 25\text{W} + 2\text{W} = 277\text{W}$,低于 350W,符合模块总功耗要求。

4 模块实物及测试结果

最终完成装配调试的模块实物如图 8 所示,整体尺寸为 $300\text{mm} \times 180\text{mm} \times 100\text{mm}$ 。

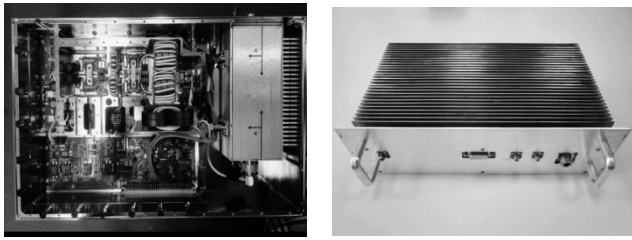


图8 宽带功率放大模块实物

模块的测试内容主要包括输出功率、功率增益、谐波抑制以及功耗等，结合测试需求最终选择 N5171B 型射频信号源、

FSUP26 型频谱分析仪以及 IT6722 型直流电源作为测试所用仪器，同时选用 40dB 大功率衰减器接在宽带功率放大模块输出与频谱分析仪输入之间，用于防止测试过程中频谱分析仪输入出现过载的情况。按图 9 所示测试框图完成测试电路搭建并完成测试，最终测试结果数据记录如表 1 所示。

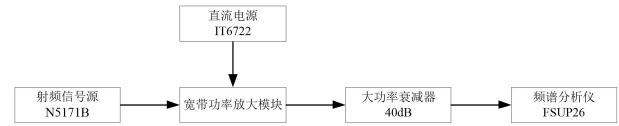


图9 宽带功率放大模块测试框图

表1 模块整机测试数据

标称值	9kHz	100kHz	1MHz	50MHz	100MHz	200MHz	300MHz	400MHz
功率增益/dB	52.15	53.33	53.09	53.36	53.52	52.92	52.38	51.15
输出功率/dBm	49.15	50.33	50.09	50.36	50.52	49.92	49.38	48.15
功率平坦度/dB	≤ ±1.2							
谐波抑制/dBc	-20.26	-20.16	-20.04	-21.38	-20.89	-21.36	-20.03	-20.62
整机功耗/W	221.76	219.8	222.88	229.88	222.32	252.00	280.56	226.24
漏极效率/%	37.07	49.09	45.81	47.26	50.7	38.96	30.9	28.87
结论	符合预期指标要求							

5 结论

本文基于 GaN HEMT 功率管，设计了一款带宽超 15 个倍频程、典型输出功率达 100W 的宽带功率放大模块，采用并联 L-R-C 负反馈电路解决了宽带应用下的稳定性问题，同时采用

宽带同轴变压器和集总元件混合匹配的方式实现了目标频带下的匹配电路设计，进而保证了目标输出功率及功率增益指标的实现，同时兼顾了谐波抑制、整机功耗等指标要求，最终通过实测试验表明本方案切实可行，可以为无线通信、雷达、电子对抗以及测试系统等系统的小型化、轻量化设计提供参考。

参考文献:

- [1] 射频与微波晶体管功率放大器工程[M].张玉兴,陈会,文继国.北京:电子工业出版社,2013.
- [2] 射频与微波功率放大器设计[M].Andrei Grebennikov,张玉兴.北京:电子工业出版社,2006.
- [3] 超宽带微波功率放大器研究[D].吕俊杰.电子科技大学,2018.
- [4] P 波段 GaN 基功率放大器的设计及实现[D].马新宇.电子科技大学,2018.
- [5] 基于宽带匹配技术的 100W 功率放大器设计[D].陈志杰.华南理工大学,2013.
- [6] A 1-8GHz Gallium Nitride distributed power amplifier MMIC utilizing a trifilar transformer[C].Campbell C F,Roberg M D,Fain J,et al.Microwave Integrated Circuits Conference.IEEE,2016:217-220.
- [7] 一种 30MHz~3GHz 宽带高增益功率放大器[J].胡俊,赵华,陈晓娟.微电子学,2019.
- [8] 0.3~2.0 GHz 100W GaN 超宽带功率放大器[J].徐永刚,杨兴,钟世昌.固体电子学研究与进展,2018.
- [9] 30~2600MHz 超宽带 GaN 功率放大器的设计与实现[J].陆宇,陈晓娟,钱可伟.半导体器件,2015.