

基于改进简化实频技术的超宽带功率放大器设计

刘国华* 周国祥 郭灿天赐 程知群

(杭州电子科技大学射频电路与系统教育部重点实验室 杭州 310018)

摘要: 该文提出了一种基于改进简化实频算法的跨多倍频超宽带功率放大器。结合负载牵引技术,分析晶体管负载端的最优阻抗值变化。通过改进简化实频法中的优化目标和误差函数,对频段内选取多个频点的最优阻抗进行分析,设计并优化出了功率放大器的输出匹配电路,提高了功放的工作带宽。测试结果显示,在 0.5~2.7 GHz 频段内,饱和输出功率达到 42.5 dBm,饱和漏极效率为 64%~75%。

关键词: 功率放大器; 简化实频法; 多倍频; 漏极效率

中图分类号: TN722

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)06-1617-05

DOI: 10.11999/JEIT200564

Design of Ultra-wideband Power Amplifier Based on Modified Simplified Real Frequency Technology

LIU Guohua ZHOU Guoxiang GUO Cantianci CHENG Zhiqun

(Key Laboratory of RF Circuit and System, Ministry of Education,
Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A multi-octave power amplifier is proposed based on the improved simplified real frequency method. Combined with the load-pull technology, the optimal impedance of the transistor is analyzed. By improving the optimization objective and error function in the improved simplified real frequency method, the optimal impedance of multiple frequency points in the frequency band is analyzed. The output matching circuit of the power amplifier is designed. The broadband matching circuit is optimized, and the working bandwidth of the amplifier is improved. The test results show that the saturation output power reaches 42.5 dBm and the saturation drain efficiency is 64%~75% within the frequency band of 0.5~2.7 GHz.

Key words: Power amplifier; Simplified real frequency method; Multi-octave; Drain efficiency

1 引言

无线通信基础设施的复杂性、通信标准和频率分段的日益增加,对功率放大器的效率和工作带宽提出了更高的要求^[1]。随着5G通信的到来,收发机系统一直朝着低能耗、高效率和宽频带的方向飞速发展^[2]。而匹配电路作为功率放大器的关键部分,其设计性能直接决定了功放的效率、带宽和功率等技术指标。因此,宽带匹配电路的设计是宽带功放设计的主要任务。

目前,设计者们对高效率功放带宽的扩展,通常采用连续类思想^[3,4]来实现。连续类思想的功放

通过增加谐波控制因子,扩大了最优阻抗解空间,但由此增加了匹配电路设计的难度。另外,设计者采用混合类^[5-8]的谐波控制网络,在不同的频点下使功放分别工作在不同的类别($J/F/F^{-1}$),拓展了功放的带宽,但与此同时也会增加电路的复杂性。滤波结构的阻抗匹配网络也被应用到功放的宽带匹配网络设计中^[9,10],该方法不仅要保证功放的工作频率在通带内,而且过渡带的衰减速度问题也是设计的难点。1977年,实频法由Carlin首先提出,它是一种基于线性分段近似逼近最佳特性的网络综合方法^[11],为宽带匹配网络设计提供了新的途径。1982年,Yarman在原始实频法的基础上,对算法进行了改进,提出了简化实频算法^[12]。后来,该算法与电路设计相结合并被使用到功放的设计上^[13],尽管可以设计出宽频带电路,但是要实现性能良好的多倍频程宽带电路还是有一定的困难。

为了进一步拓展带宽,本文使用GaN HEMT (氮化镓材料工艺,使得器件输出功率水平可以得

收稿日期: 2020-07-26; 改回日期: 2020-09-24; 网络出版: 2020-09-26

*通信作者: 刘国华 ghliu@hdu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(91938201, 61871169); 浙江省自然科学基金(LZ20F010004)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation (91938201, 61871169), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (LZ20F010004)

到大幅提高^[14])晶体管器件,基于改进的简化实频算法,结合负载牵引技术,对功放的宽带匹配网络进行设计优化,完成了一款覆盖多个移动通信频段的超宽带功率放大器的设计。

2 简化实频法理论分析

2.1 传统简化实频法

图1所示为用散射参数表示的匹配网络。实频法将无耗的二端口网络用 S 参数表示

$$S_{11}(s) = \frac{h(s)}{g(s)} = \frac{h_0 + h_1 s + \dots + h_n s^n}{g_0 + g_1 s + \dots + g_n s^n} \quad (1)$$

$$f(s) = s^k \quad (2)$$

其中, n 代表了网络中的元件数。 $h(s)$ 与 $g(s)$ 是 n 项的赫尔维兹多项式。

其他匹配网络的散射参数可表示为

$$S_{21}(s) = S_{12}(s) = \pm \frac{f(s)}{g(s)} \quad (3)$$

$$S_{22}(s) = -(-1)^k \frac{h(-s)}{g(s)} \quad (4)$$

通过无耗原则,得到 g 与 h 的关系。可以将传输功率增益(Transducer Power Gain, TPG)表示为

$$\text{TPG} = \frac{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_L|^2)}{|1 - S_{22}S_L|^2} \quad (5)$$

在整个频段内,尽可能的优化TPG,使其接近于设置的优化目标 T ,依据两者差值作为优化的误差函数。

2.2 改进的简化实频法

实验表明,在一个跨多倍频的带宽范围内,晶体管负载牵引最优阻抗数据波动较大,简化实频法使频带内所有频点优化到目标TPG是有困难的。因此传统的实频技术在多倍频上实现宽带匹配有局限性。针对上述传统实频技术的问题,本文对优化算法进行改进,在优化TPG的基础上,结合负载牵引技术对阻抗的分布规律进行分析,使阻抗呈圆形状分布于中心频点周围,可以在更宽的工作频带下发挥晶体管的潜能。

通过负载牵引技术得到晶体管负载的宽频各点的最优阻抗值,最优阻抗大致分布在一个区域内,

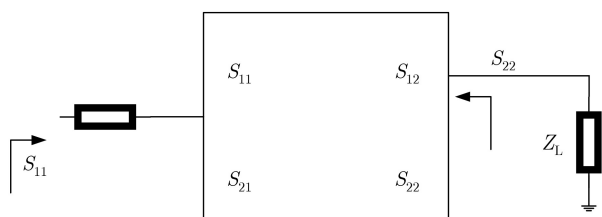


图1 散射参数的匹配网络

选取中心频率点阻抗($Z_{cy} + j \cdot Z_{cx}$)与最边缘频点的阻抗($Z_{sy} + j \cdot Z_{sx}$)的虚部与实部的差值作为优化目标 Z_x 和 Z_y

$$Z_x = |Z_{cx} - Z_{sx}| \quad (6)$$

$$Z_y = |Z_{cy} - Z_{sy}| \quad (7)$$

建立阻抗的误差函数

$$Z_{\Delta} = \sqrt{(Z_{optx} - Z_{cx})^2 + (Z_{opty} - Z_{cy})^2} \quad (8)$$

$$Z_{err} = \frac{Z_{\Delta}}{\sqrt{Z_x^2 + Z_y^2}} \quad (9)$$

建立TPG的误差函数

$$T_{error}(s) = |T(s) - T_0| \quad (10)$$

其中, $T(s)$ 为设计出宽带匹配网络的传输功率增益(TPG); T_0 为初始设置的传输功率增益(TPG)优化目标。

使用最小二乘法对匹配电路的 $T_{error}(s)$ 和负载阻抗 Z_{err} 同时优化,使TPG误差函数值尽可能趋近于0的同时,保证阻抗误差函数的值趋近于1,最终可以得到一个跨多倍频程的宽带匹配电路。由于负载牵引选取的是最优PAE轨迹,最终也会提升功率放大器电路的整体效率。

3 超宽带功率放大器的设计

在先进设计系统(Advanced Design System, ADS)软件中,对晶体管的输出负载端进行负载牵引,获取0.5~2.7 GHz范围内10个频点的最优阻抗值,如表1所示。

将10个频点的最优阻抗值作为简化实频法的输入数据,进行宽带匹配网络的设计与优化。通过简化实频法得出了输出匹配网络的 h 与 g 具体表达式

$$g(\lambda) = 0.0201\lambda^6 + 0.1553\lambda^5 + 0.3476\lambda^4 + 1.8947\lambda^3 + 1.4388\lambda^2 + 2.2455\lambda + 1 \quad (11)$$

$$h(\lambda) = 0.0201\lambda^6 - 0.1255\lambda^5 - 0.1592\lambda^4 - 0.8706\lambda^3 - 0.5764\lambda^2 - 0.8737\lambda \quad (12)$$

将得到的 h 与 g 表示出匹配网络的传递函数,对其使用长除法进行变形,得到式(13),式中变量 S 的系数就是所设计的LC结构

表1 各个频点下的最优阻抗值

频率(GHz)	$Z_{opt}(\Omega)$	频率(GHz)	$Z_{opt}(\Omega)$
0.5	$26.9 + j^*23.6$	1.8	$27.4 + j^*9.3$
0.8	$31.7 + j^*12.9$	2.0	$19.6 + j^*16.8$
1.0	$26.1 + j^*11.1$	2.3	$21.3 + j^*9.1$
1.3	$19.9 + j^*14.1$	2.5	$18.3 + j^*7.2$
1.5	$21.2 + j^*7.9$	2.7	$17.5 + j^*6.5$

$$Z_L = \frac{g(s)+h(s)}{g(s)-h(s)} = L_1 s + \frac{1}{C_2 s + \frac{1}{L_3 s + \cdots + \frac{1}{X_n s + 1}}} \quad (13)$$

图2所示为简化实频法得到的输出匹配电路，其是由集总参数的LC结构组成。集总参数宽带匹配网络还需要转换为微带拓扑结构，将利用到Richard和Kirtoda法则对其进行变换，对其适当的优化修正即可，优化得到的电路如图3所示。空心三角表示了晶体管负载最优阻抗的变化趋势，实心方块代表了变换后输出匹配的输入阻抗值的变化趋势。可以发现，实心方块曲线是围绕着中心阻抗点Z为圆心，呈现顺时针圆的趋势进行变化，优化的结果与实频法预想的结果相符合。表明优化的匹配电路可以在宽频带内实现匹配。

对图3所示的宽带匹配电路进行S参数仿真得到的结果如图4所示。在目标频段范围内， S_{11} 均小于10 dB， S_{21} 也趋向于0 dB，展现了良好的宽带特性，也验证了方法的可行性。功放的输入匹配电路采用阶跃式的匹配结构，在ADS中进行仿真优化。将偏置电路与输入、输出匹配网络放入到整个电路中，得到的整体拓扑结构如图5所示。

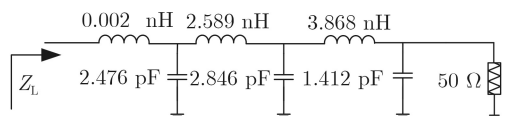


图2 简化实频法得到的输出匹配电路

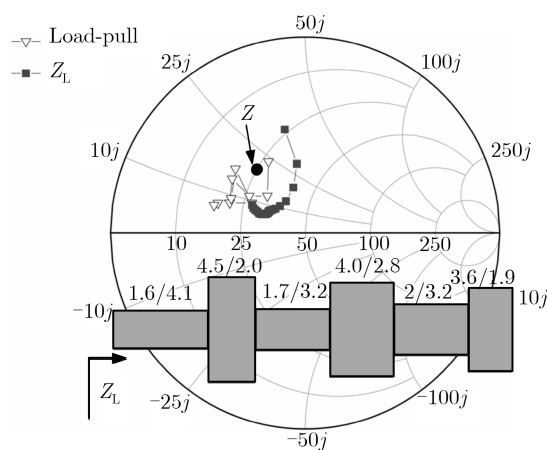


图3 晶体管负载数据和输出匹配网络

4 实现与测试结果

前面利用电路仿真软件对提出的超宽带功率放大器进行了设计，验证了所提改进的简化实频算法的可行性。为进一步验证所提出方案的正确性，基于Cree公司的CGH40010F晶体管，采用Rogers4350B基板($H=0.76$ mm, $\epsilon_r=3.66$)对所设计的超宽带功率放大器进行了实物加工测试。其中，栅极和漏极的直流偏置电压分别为： $V_G=-2.7$ V, $V_D=28$ V。

对功放电路进行小信号测试，仿真与测试结果如图6所示。从图6中可以看出，在频带范围内， S_{21} 小信号增益最大14 dB。大信号测试结果如图7所示。在0.5~2.7 GHz频段内，输出功率为40.4~42.5 dBm，漏极效率为64%~75%，增益为10~12.3 dB。

表2是本文所设计的功放与近几年同类文献中的相关功放在主要技术指标上的对比，功率器件均采用氮化镓高电子迁移率晶体管(GaN High Electron Mobility Transistor, HEMT)器件。在工作带宽方面，本文设计的功放相对带宽为137%，高于其它文献中的带宽指标，不仅展示出了良好的宽带特性，而且在效率上也有优势。

5 结论

本文基于改进的简化实频技术，采用Cree公司的GaN HEMT器件设计了一款可以覆盖多个频段的超宽带功率放大器。通过将传统简化实频技术与负载牵引的技术结合，在原有TPG优化的基础上，进一步完成阻抗特定区域的匹配，以实现功放

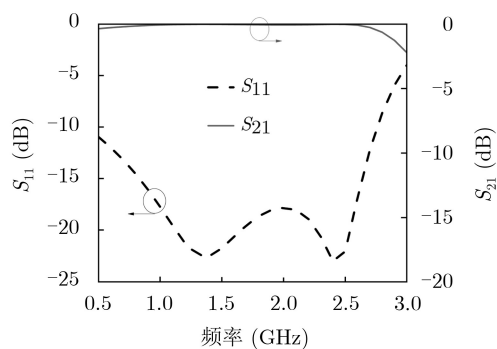


图4 匹配电路的S参数仿真结果

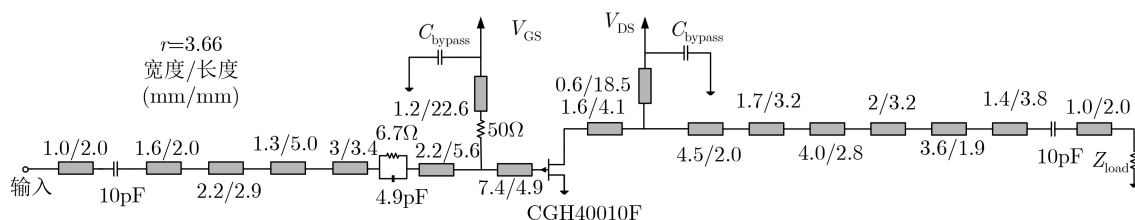


图5 整体拓扑结构

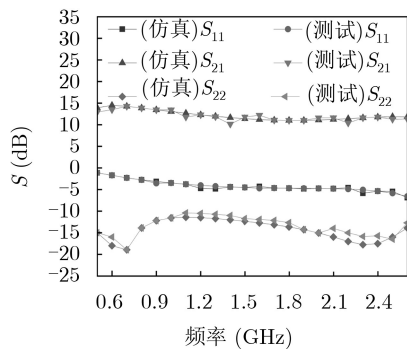


图6 小信号仿真与测试结果

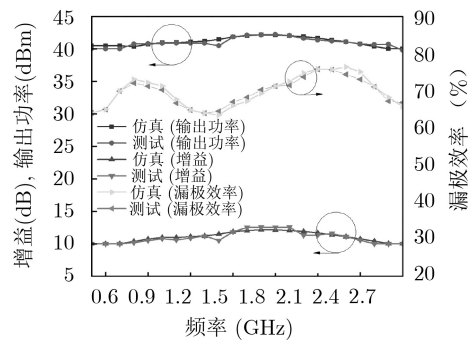


图7 漏极效率、输出功率和增益仿真与测试结果

表2 本文与近几年论文中功放主要指标对比

参考文献	频段(GHz)	漏极效率(%)	增益(dB)	输出功率(dBm)	相对带宽(%)
文献[15]	1.2~3.6	60~72	10.1~11.5	40.0~42.2	100
文献[16]	0.6~2.5	52~73	9.2~11.3	39.0~40.5	120
文献[17]	0.5~2.3	60~81	11.7~12.5	39.2~41.2	129
文献[18]	0.4~2.3	62~81	11.0~14.0	39.0~42.0	141
本文	0.5~2.7	64~75	10.0~12.3	40.0~42.5	137

的宽带化。实测结果显示,在0.5~2.7 GHz频带内,所设计的功放输出功率为40.0~42.5 dBm,漏极效率达到64%~75%。实物测试结果表明了本文将宽带匹配算法应用于功放的设计,不仅扩展了其工作带宽,还适当提高了功放的效率,综合指标取得了较好的效果。

参考文献

- [1] 程知群, 张志维, 刘国华, 等. 基于GaN HEMT的混合EF类功率放大器设计[J]. 微波学报, 2019, 35(2): 34-37. doi: [10.14183/j.cnki.1005-6122.201902008](https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.201902008).
CHENG Zhiqun, ZHANG Zhiwei, LIU Guohua, et al. Design of hybrid EF Class power amplifier based on GaN HEMT[J]. *Journal of Microwaves*, 2019, 35(2): 34-37. doi: [10.14183/j.cnki.1005-6122.201902008](https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.201902008).
- [2] 程知群, 轩雪飞, 刘国华, 等. 宽带F类功率放大器的设计[J]. 微波学报, 2017, 33(4): 55-58. doi: [10.14183/j.cnki.1005-6122.201704012](https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.201704012).
CHENG Zhiqun, XUAN Xuefei, LIU Guohua, et al. Design of broadband class-F power amplifier[J]. *Journal of Microwaves*, 2017, 33(4): 55-58. doi: [10.14183/j.cnki.1005-6122.201704012](https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.201704012).
- [3] CHEN Jinhu, HE Songbai, YOU Fei, et al. Design of broadband high-efficiency power amplifiers based on a series of continuous modes[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2014, 24(9): 631-633. doi: [10.1109/LMWC.2014.2331457](https://doi.org/10.1109/LMWC.2014.2331457).
- [4] GAN Decheng and SHI Weimin. Design of a broadband doherty power amplifier based on hybrid continuous mode[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 86194-86204. doi: [10.1109/access.2019.2925958](https://doi.org/10.1109/access.2019.2925958).
- [5] NI Chun, CHEN Mingsheng, ZHANG Zhongxiang, et al. Design of broadband high-efficient PA based on hybrid continuous modes[J]. *The Journal of Engineering*, 2017(1): 1-3. doi: [10.1049/joe.2016.0310](https://doi.org/10.1049/joe.2016.0310).
- [6] ZHANG Zhiwei and CHENG Zhiqun. A multi-octave power amplifier based on mixed continuous modes[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 178201-178208. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2957926](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957926).
- [7] POLURI N and DE SOUZA M M. High-efficiency modes contiguous with class B/J and continuous class F⁻¹ amplifiers[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2019, 29(2): 137-139. doi: [10.1109/LMWC.2018.2886655](https://doi.org/10.1109/LMWC.2018.2886655).
- [8] 徐樱杰, 王晶琦, 朱晓维. GaN逆F类高效率功率放大器及线性化研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 981-985. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.00382](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.00382).
XU Yingjie, WANG Jingqi, and ZHU Xiaowei. Investigation on GaN inverse Class-F highly efficient power amplifier and linearization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(4): 981-985. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.00382](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.00382).
- [9] LIU Guohua, LI Sudong, and CHENG Zhiqun. A power amplifier based on filter matching circuit[C]. 2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference, Taiyuan, China, 2019.
- [10] HAIDER M F, YOU Fei, SHI Weimin, et al. Broadband power amplifier using hairpin bandpass filter matching network[J]. *Electronics Letters*, 2020, 56(4): 182-184. doi: [10.1049/ell.2020.56.4.182](https://doi.org/10.1049/ell.2020.56.4.182).

- [10.1049/el.2019.3047](https://doi.org/10.1049/el.2019.3047).
- [11] YARMAN B S. Automated design of antenna matching networks with optimum circuit topology on MatLab[C]. 2009 IEEE Applied Electromagnetics Conference, Kolkata, India, 2009.
- [12] BOROWIEC R. Some aspects of using simplified real frequency technique[C]. The 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications, Krakow, Poland, 2016.
- [13] WU D Y T, MKADEM F, and BOUMAIZA S. Design of a broadband and highly efficient 45W GaN power amplifier via simplified real frequency technique[C]. 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Anaheim, USA, 2010.
- [14] 孙健健, 徐建华, 成海峰, 等. 基于金属销钉封装的Ka波段固态功率放大模块研究[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(12): 3074–3080. doi: [10.11999/JEIT190791](https://doi.org/10.11999/JEIT190791).
SUN Jianjian, XU Jinahua, CHENG Haifeng, *et al.*. Research on Ka-band solid-state power amplifier module packages using a lid of nails[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(12): 3074–3080. doi: [10.11999/JEIT190791](https://doi.org/10.11999/JEIT190791).
- [15] HUANG Chaoyi, HE Songbai, SHI Weimin, *et al.* Design of broadband high-efficiency power amplifiers based on the hybrid continuous modes with phase shift parameter[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2018, 28(2): 159–161. doi: [10.1109/LMWC.2017.2787061](https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2787061).
- [16] NI Chun, LIU Changqing, CHEN Mingsheng, *et al.* A broadband hybrid continuous power amplifier[C]. 2018 IEEE International Conference on Computational ElectroMagnetics (ICCEM), Chengdu, China, 2018.
- [17] ZHENG Shaoyong, LIU Zhaowu, ZHANG Xiuying, *et al.* Design of ultrawideband high-efficiency extended continuous class-F power amplifier[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(6): 4661–4669. doi: [10.1109/TIE.2017.2772163](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2772163).
- [18] TANG Qinghu, LI Yanghua, LI Wenguang, *et al.* Over second octave power amplifier design based on resistive-resistive series of continuous class-F/ F^{-1} modes[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(5): 494–496. doi: [10.1109/LMWC.2017.2690847](https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2690847).
- 刘国华：男，1975年生，博士，副教授，研究方向为射频功率放大器设计。
- 周国祥：男，1996年生，硕士生，研究方向为射频功率放大器电路设计与应用。
- 郭灿天赐：男，1995年生，硕士生，研究方向为射频功率放大器电路设计与应用。
- 程知群：男，1964年生，教授，博士生导师，研究方向为高效率功率放大器、新型半导体器件结构和建模技术、射频/微波集成电路、毫米波/太赫兹集成电路设计。

责任编辑：余蓉