

3.3~3.9 GHz 宽带 Doherty 功率放大器的设计

王浩全^{1,2,3}, 李志强^{1,2}

(1 中国科学院微电子研究所 新一代通信射频芯片技术北京市重点实验室, 北京 100029;

2 中国科学院微电子研究所 健康电子研发中心, 北京 100029;

3 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 101400)

摘 要: 本文实现了一款 GaN 宽带 Doherty 功率放大器. 基于 CCGH40025 管芯, 在 ADS(Advanced Design system)中进行微带线建模与模型的电磁场仿真. 利用双阻抗匹配的原理, 使用 ADS 中随机优化以及梯度优化的方法, 进行微带线的优化仿真, 设计一款工作在 3.3~3.9 GHz 的 Doherty 宽带功率放大器. 仿真实现最大输出功率 48 dBm, 效率 65% 以上, 功率回退 6 dB, 输出功率 42 dBm, 效率 47% 以上. 这种设计方法可应用于宽带射频通信系统中.

关键词: Doherty; 效率; 功率放大器

中图分类号: TN403

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)08-0097-04

The Design of A 3.3~3.9 GHz Broadband Doherty Power Amplifier Module

WANG Hao-quan^{1,2,3}, LI Zhi-qiang *^{1,2}

(1 Beijing Key Laboratory of Radio Frequency IC Technology for Next Generation Communications,

Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 R&D Center of HealthCare Electronics, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100029, China; 3 School of Electronic, Electrical and Communication Engineering,

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China)

Abstract: In this paper, a GaN broadband Doherty power amplifier is designed. A broadband power amplifier of 3.3~3.9 GHz based on CCGH40025 chip model is designed, with modeling and electromagnetic field simulation of micro-strip in ADS (Advanced Design system). Using random optimization and gradient optimization method in the ADS with the principle of double impedance matching. The simulation result show that the broadband power amplifier module have a good performance in the wide band of 3.3~3.9 GHz, the gain is 12-13 dB, the maximum output power is 47.7 dBm, and the efficiency is above 65%, the power is back 6dB, the output power is 41.7dBm, and the efficiency is above 47%. The design method can be applied to the broadband radio frequency communication system.

Key words: Doherty; efficiency; power amplifier

1 引言

现代移动通信系统有着飞速的发展,从 2 G 移动通信到现在 4 G 移动通信,以及未来的 5 G 通信,

信号带宽在加宽的同时,调制方式也从高斯最小频移键控调制到基于正交频分复用的正交振幅调制. 信号的峰均比 PAPR(Peak to Average Power Ratio)在不断变大. 传统的 AB 类功率放大器在功率回

退点效率低,只能用于恒包络调制的通信系统中,所以为了提高系统在功率回退点的效率,必须采用新技术,在各种技术中,主流的有包络跟踪技术,LINC 技术,Doherty 技术等. Doherty 技术结构简单,线性度好,成本较低,适用于高峰均比信号传输,被广泛应用在移动基站通信系统中.

本文通过使用 CREE 公司晶体管型号为 CGH40025 的 GaN 管芯,设计了工作在 3.3~3.9 GHz 的对称型宽带 Doherty 射频功率放大器,在放大器饱和输出和功率回退 6 dB 处分别实现高效率.

2 Doherty 的原理

经典的 Doherty 电路结构如图 1 所示,电路由 1 端口输入,由功分器将输入信号等分给主功放和辅助功放,最后输出合二为一,由端口 2 输出. 电路的核心思想是利用辅助功放对主功放进行负载调制. 主功放偏置在 AB 类,辅助功放偏置在 C 类,电路开始工作时,辅助功放关闭,主功放开始工作,随着输入功率增加,当主功放漏级电流是最大电流一半时,因为此时负载端阻抗是最优阻抗的两倍,所以主功放达到电压饱和. 假设此时电路工作在 B 类状态,此时有:

$$I_{dc} = \frac{I_{max}}{2\pi} \tag{1}$$

$$I_1 = \frac{I_{max}}{4\pi} \tag{2}$$

$$\theta = \frac{I_1 * V_{cc}}{I_{dc} * V_{cc}} \tag{3}$$

随后辅助功放开启,开始对主功放进行负载阻抗调制,改变合路点阻抗,由 R_L 向 $2R_L$ 变化,主功放负载阻抗由 $2R_{opt}$ 向 R_{opt} 变化. 随着输入功率增加,主辅功放都达到饱和. 此时主功放效率:

$$I_{dc} = \frac{I_{max}}{\pi} \tag{4}$$

$$I_1 = \frac{I_{max}}{2\pi} \tag{5}$$

$$\theta = \frac{I_1 * V_{cc}}{I_{dc} * V_{cc}} \tag{6}$$

整体 Doherty 电路的效率曲线如图 2 所示,电路在饱和处实现最大输出效率,同时在功率回退 6 dB 也实现高效率. 满足高峰均比调制信号射频通信系统的需求.

3 宽带 Doherty 功放的设计

传统的 Doherty 功率放大器是用四分之波长线

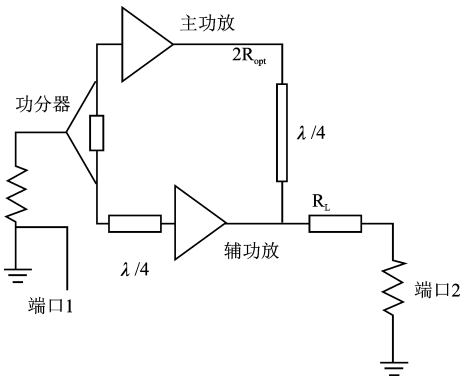


图 1 经典 Doherty 电路结构

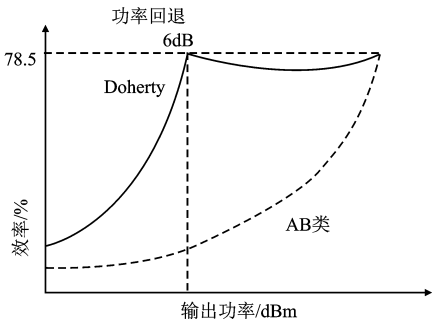


图 2 Soherty 效率曲线

做阻抗变换,但是在宽带匹配上具有显著的缺点,严重影响了 Doherty 电路的宽带性能. 所以为了实现宽带的 Doherty 电路,采用低通滤波器为原型的宽带匹配电路结构,再转换成微带电路^[2],同时进行回退点和饱和点的阻抗匹配,实现双阻抗匹配.

3.1 主功放的设计

主功放偏置在 AB 类,本文使用 CreeCGH40025 管芯最大输出功率为 30 W,在最大输出电流时使用 ADS 自带的负载牵引^[1]模块,设置模板参数,使得管芯最大输出功率为 15 W,此时漏级最大电流为 $I_{max}/2$,找到在功率回退点下的最佳阻抗点. 在 3.3~3.9 GHz 频率下扫描最佳阻抗点,得到结果如表 1 所示.

设置模块参数,使得最大输出功率为 30W,此时晶体管漏级最大电流为 I_{max} ,找到功率饱和时最佳阻抗点. 在 3.3~3.9 GHz 频率下扫描最佳阻抗点,得到结果如表 2 所示.

选取回退点阻抗 Z_{OPT*} 为 $6.4-j * 0.4$ 欧姆,饱和点阻抗 Z_{OPT} 为 $7.2-j * 2.8$ 欧姆, R_L 为 10 欧姆. 在 ADS 中进行双阻抗 S 参数仿真,设置两个目标 S 参数,进行随机优化加梯度优化^[3-7],得到输出匹配结构如图 3 所示.

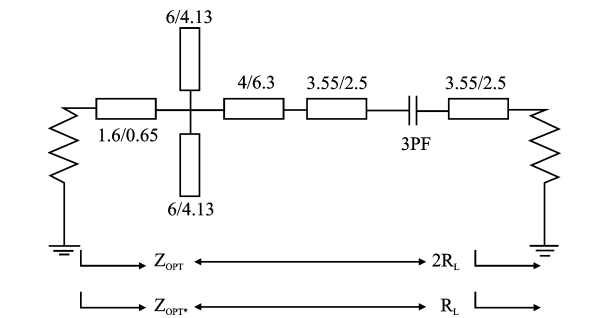


图 3 输出匹配结构

表 1 功率回退点最佳负载阻抗

频率	阻抗	功率/效率
3.3	$6.5 + j * 0.5$	41.7/58.5
3.4	$6.6 + j * 0.2$	41.7/57.6
3.5	$6.5 - j * 0.1$	41.5/57.0
3.6	$6.4 - j * 0.4$	41.5/56.6
3.7	$6.2 - j * 0.8$	41.5/56.7
3.8	$6.3 - j * 1.1$	41.5/56.7
3.9	$6.3 - j * 1.6$	41.5/56.9

表 2 饱和点最佳负载阻抗

频率	阻抗	功率/效率
3.3	$7.8 - j * 2.2$	44.9/66.9
3.4	$7.9 - j * 2.5$	45.0/64.6
3.5	$7.7 - j * 3.4$	45.1/65.3
3.6	$7.2 - j * 2.8$	44.6/66.7
3.7	$7.4 - j * 3.9$	44.7/65.9
3.8	$7.3 - j * 4.4$	44.7/65.1
3.9	$7.1 - j * 4.8$	44.7/65.3

由 50 欧姆负载阻抗向 R_L 的匹配,我们采用 2 节 $\lambda/4$ 阻抗变换线的方法,最终电路参数如图 4 所示。

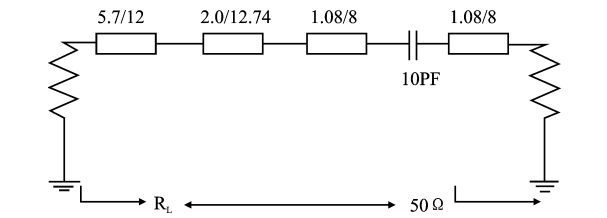


图 4 负载匹配结构

3.2 辅助功放的设计

辅助功放偏置在 C 类,在设计辅助功放时,通

过 LSSP 仿真,优化输入匹配网络,保证辅助功放在主功放达到电压饱和时顺利开启,同时保证在整个频带内电路开启的一致性。

在设计输出匹配网络时要注意,辅助功放设计时要保证输出阻抗在我们所需要的频段内接近于开路状态. 同时又保证辅助功放的负载阻抗是我们所需要的最优阻抗. 同样在 ADS 中设立两个目标 S 参数进行优化,得到最终匹配电路结构如下图所示。

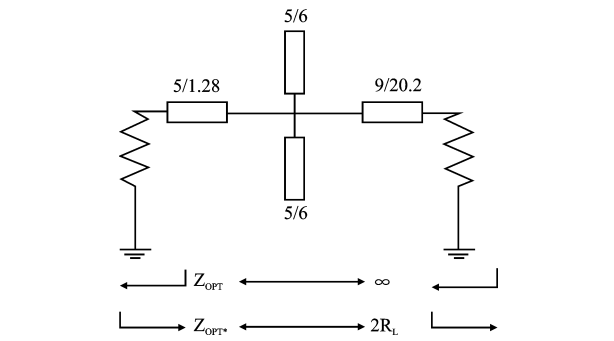


图 5 辅助功放输出匹配结构

输入是使用一个威尔金森功分器,将输入功率平均分配到主路和辅路. 为了使得主辅功放输出电流相位一致,我们需要调节功分器输出部分微带线的长度,使得输出电流相位一致。

4 宽带 Doherty 功放的仿真结果

运用 ADS 中的 momentum 电磁仿真工具对我们的主辅功放输入输出匹配网络以及功分器分别进行电磁仿真,将仿真后的模块与晶体管进行联合仿真。

运用 ADS 中的谐波平衡仿真,得到了最终的仿真结果如图 6 和图 7 所示,可以看出在 3.3~3.9 GHz 频段内电路整体实现了饱和输出功率 48 dBm,效率 65% 以上,功率回退 6 dB,效率 47% 以上,小信号增益 12 dB,大信号增益 8 dB. 实现在功率饱和和功率回退点的高效率,适用于宽带射频通信系统。

5 结束语

本文主要针对现代无线通信信号具有宽带宽以及高峰均比的特点,提出了一种适用于现代无线通信系统宽带 Doherty 射频功率放大器的设计方法,较传统的 Doherty 电路结构,可以很大程度拓展带宽. 从下表 3 中可以看出,本文设计的功放在带宽上,以及效率上有着一定优势。

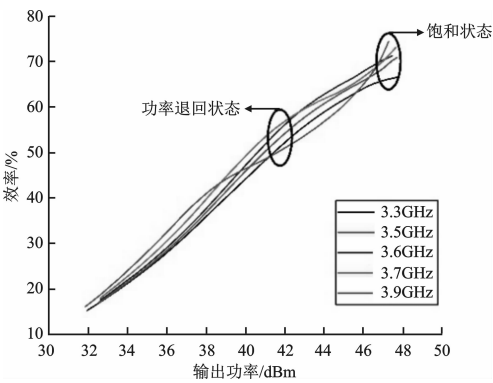


图 6 功放效率曲线

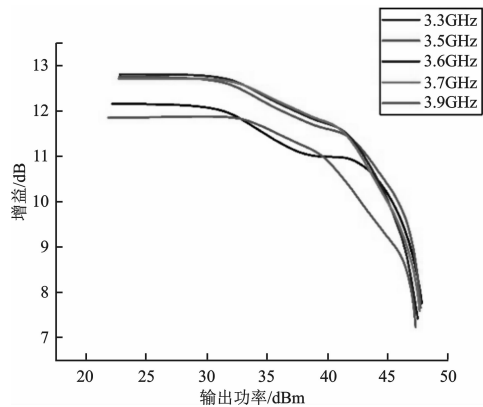


图 7 功放增益曲线

表 3 本文和其他论文的对比

文献	带宽	回退效率	饱和效率
	GHz	%	%
[4]	3.0—3.6	38—56	55—66
[5]	0.75—0.95	52—64	55.4—64.7
[6]	2.2—3.0	38—48	50—67
[7]	1.65—2.70	41—59	56—72
本文	3.3—3.9	47—57	64—70

参考文献：

[1] R. W. Rhea, HF Filter Design and Computer Simulation[M]. New York: Noble,1994.

[2] 池保勇,余志平,石秉学. CMOS 射频集成电路分析与设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.

[3] 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.

[4] J. M. Rubio, J. Fang, V. Camarchia et al, 3-3.6-GHz wideband GaN Doherty power amplifier exploiting output compensation stages[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012,60 (8):2543-2548.

[5] Jin-hee Kwon, Min-cheol Seo, Hwi-seob Lee. Broad-band Doherty Power Amplifier Based on Asymmetric Load Matching Networks [J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems, 2015,62 (6): 533-537.

[6] R. Giofrè, L. Piazzon, P. Colantonio et al, A closed form design technique for ultra-wideband Doherty power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2014,62(12):3414-3424.

[7] Weimin Shi, Songbai He, Fei You et al. The Influence of the Output Impedances of Peaking Power Amplifier on Broadband Doherty Amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017,65 (8):3002-3013.

作者简介：

王浩全 男,(1993-),硕士研究生. 研究方向射频集成电路和模块设计.

李志强(通信作者) 男,(1982-),博士,副研究员. 研究方向为射频、微波、毫米波集成电路设计、生物传感器模拟前端芯片设计. E-mail:lizhiqiang@ime.ac.cn.

(上接第 96 页)

[5] Wang H, Wang W, Zhou X, et al. Firefly algorithm with neighborhood attraction [J]. Information Sciences, 2017, 382(5):374-387.

[6] 徐宗本,高勇. 遗传算法过早收敛现象的特征分析及其预防[J]. 中国科学:技术科学,1996,26(4):364-375.

[7] AnanyLevitin, 莱维汀, 潘彦. 算法设计与分析基础

[M]. 清华大学出版社, 2015

作者简介：

李 顺 男 (1993-),硕士研究生. 研究方向为群智能算法,智能嵌入式硬件. E-mail:13955105560@163.com.

郭 星 男 (1983-),博士,讲师. 研究方向智能数据处理,模式识别与信号处理.