

三路 Doherty 功率放大器的设计与仿真

南敬昌, 方 杨, 李厚儒

(辽宁工程技术大学 电子与信息工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘 要: 基于可有效提高功放效率的 Doherty 理论, 对两路非对称 Doherty 所存在的问题进行剖析, 提出了一种嵌入内 Doherty 的三路 Doherty(3-way Doherty)结构, 并对该三路 Doherty 的工作状态和阻抗变换等基本理论作了细致描述与分析, 最终结合多谐波双向牵引技术和双匹配技术, 成功设计了一款平均输出功率为 5 W 的 TD-LTE 直放站三路 Doherty 功率放大器. 中心频率 2600 MHz 的仿真结果表明, 平均输出功率处的三阶互调系数 IMD3 为 -36 dBc, 增益 Gp 达 10.6 dB, 功率附加效率 PAE 保持在 56% 左右, 较普通 AB 类功放有近 38% 的提高, 且在整个 12 dB 回退范围内功率附加效率曲线相对平坦, 符合现代功放高功率回退和高效率的设计要求, 可以与数字预失真技术结合用于实际直放站中.

关键词: 三路 Doherty; TD-LTE 直放站; 功率附加效率

中图分类号: TN722.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)01-0082-04

Design and Simulation of 3-Way Doherty Power Amplifier

NAN Jing-chang, FANG Yang, LI Hou-ru

(School of Electronics & Information Engineering, Liaoning University of Engineering Technical, Huludao 125105, China)

Abstract: Based on theory which can improve efficiency effectively of Doherty, this paper analyses the existing problems of 2-way asymmetric Doherty at first, then presents a novel 3-way Doherty structure that embeds a conventional Doherty inside. Theoretical analysis and detailed description of the working state as well as impedance transformation of the proposed Doherty are given. Finally, combining multi-harmonic bilateral pull technology and the dual match technology, a 3-way Doherty amplifier with 5W average power is designed for TD-LTE repeater application. The 2600 MHz simulation results of the 3-way Doherty yielded -36dBc 3rd-order intermodulation (IMD3), 10.6 dB power gain(Gp), with 56% power added efficiency(PAE) which is 38% higher than class B amplifier at average output power. Moreover, the curve among 12 dB back-off power is smooth relatively. On the one hand, this will answer the purpose of high power back and high efficiency. On the other hand, it lay the foundation for combination of the digital predistortion technique for repeater application.

Key words: 3-way Doherty; TD-LTE repeater; power added efficiency

1 引言

通信技术的快速发展使频谱资源日趋紧张, 为提高频谱利用率和适应宽频带的发展趋势, 以 LTE 为代表的新一代网络, 采用了 OFDM 技术为核心的调制技术. 该技术产生非恒定包络信号, 必须采用功率回退的方法使功放工作在远离饱和区以提高功放

的线性度. 然而这会导致功放在高功率回退处的效率极低, 不仅造成能源浪费, 而且还会产生基站和直放站的热控制等一系列问题^[1]. 如何提高直放站功放的效率成为当前移动通信研究的一个热门话题. 近些年, 数字预失真技术的发展使功放线性度得到极大的改善, 这也使得兼具高效率和线性度的功率放大器成为可能. 在众多效率提升的技术中, Doherty 技术因其结构相对简单, 并能够和数字预失真

收稿日期: 2012-05-15; 修回日期: 2012-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(60971048); 辽宁省博士启动基金(20091033)

系统结合,较好的解决功率回退范围内高效率问题,得到了业内的广泛认可,被认为是功放研究中最具潜力的技术^[2].

传统 Doherty 技术有不同形式的非对称 Doherty 技术^[3],虽然在高功率回退处提高了功放的效率,但由于单个辅助功放偏置在 C 类工作状态,使得整个非对称 Doherty 在饱和点和均值点的两个峰值效率之间出现了效率明显下降.相比于两路 Doherty 技术,多路 Doherty 功放采用更多的功率管,在两个峰值效率之间仍有 $N-2$ 个效率峰值,在一定程度上改善了效率降低这一问题^[4-7].

本文提出一种嵌入内 Doherty 的三路 Doherty 功放(3-way Doherty amplifier, 3DPA)结构,并在此基础上以 CREE 公司的 CGH27015 和 CGH27030 两款 GaN 管为模型,设计一款平均输出功率为 5W,应用于 TD-LTE 直放站的功率放大器,在保证线性度和增益等参数要求的基础上,实现在功率回退 12 dB 范围内的高效率.

2 三路 Doherty 功率放大器分析

3DPA 由一个偏置在 AB 类工作状态的主功放 Main、两个偏置在 C 类的辅助功放 Aux1 与 Aux2、一个三路功分器和一些实现阻抗变换和相位调整的微带线组成.其中 Main 和 Aux1 组成一个两路 Doherty,定义为内 Doherty,然后将其整体看作新的主功放并 Aux2 共同构成整体 3DPA 电路.

图 1 是 3DPA 的结构框图.其中 $\lambda/4$ 和 $\lambda/2$ 微带线与三路功分器配合实现整个 3DPA 的阻抗变换、相位调整和功率分配;IN-MOL 是内 Doherty 中主功放的效率补偿线,其作用是使 Main 在低功率输出状态下获得更高的效率;IN-AOL 作用是调整 Aux1 的输出阻抗值,使其在低功率输出下呈现关断状态,即输出阻抗为 ∞ ;MOL 的作用与 IN-MOL 类似,在高功率区,内 Doherty 作为新的主功放, MOL 即为其效率调制线;同样, AOL 与 IN-AOL 有相同的作用,调整 Aux2 使其在低功率和中功率的情况下关断;POL 则是补偿由于效率调制线和阻

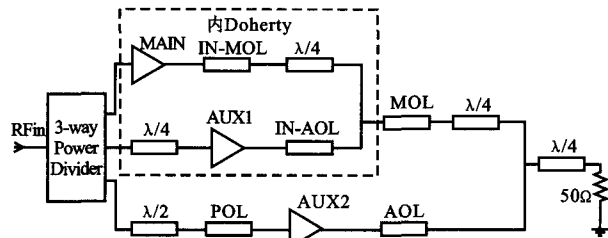


图 1 3DPA 电路结构框图

抗变换线长度不同所带来的相位差.

设 B_1 为内 Doherty 主辅功放的峰值功率比, E_1 为内 Doherty 功率回退量,则有:

$$B_1 = \frac{P_{\text{Main}}}{P_{\text{Aux1}}} \quad (1)$$

$$E_1 = 20 \log \left[1 / \left(1 + \frac{1}{B_1} \right) \right] \\ = 20 \log \frac{P_{\text{Main}}}{P_{\text{Main}} + P_{\text{Aux1}}} \quad (2)$$

同理,设 B_2 为外 Doherty 主辅功放峰值功率比,此时的主功放为内 Doherty 整体,辅助功放为 Aux2, E_2 为回退量,有:

$$B_2 = \frac{P_{\text{Main}} + P_{\text{Aux1}}}{P_{\text{Aux2}}} \quad (3)$$

$$E_2 = 20 \log \frac{P_{\text{Main}} + P_{\text{Aux1}}}{P_{\text{Main}} + P_{\text{Aux1}} + P_{\text{Aux2}}} \quad (4)$$

进而得到 3DPA 总的功率回退量 E :

$$E = E_1 + E_2 = 20 \log \frac{P_{\text{Main}}}{P_{\text{Main}} + P_{\text{Aux1}} + P_{\text{Aux2}}} \quad (5)$$

图 2 是 Main、Aux1 和 Aux2 峰值功率比为 1 : 1 : 2 的 3DPA 理想的电流曲线.图 3 是其效率与非对称 Doherty 功放、B 类功放效率的对比.下面结合图 2 和图 3,对 3DPA 的工作状态进行分析.对于不同的输入功率,3DPA 可以分为低功率、中功率和高功率三个工作状态.在低功率区,只有 Main 工作, Aux1 和 Aux2 均处于关断状态,其输出阻抗为 ∞ 且电流为零,当输入功率使 Main 达到饱和状态时,效率达到第一个峰值点,此时 Aux1 进入临界导通状态,即为图 2 和图 3 中的 A 点.当输入功率的增加使得 Aux1 开启工作时,该辅助功放电流开始增加,与已饱和的 Main 一起组成内 Doherty,而 Aux2 仍处于关断状态,输入功率继续增加到 Aux1 也达到饱和时,内 Doherty 输出功率最大,效率达到峰值, Aux2 也即将导通,整个中功率状态结束,即为图 2 和图 3 中的 B 点.随着输入功率的不断增加, Aux2 导通工作,有电流输出,而 Main 和 Aux1 处于电压饱和区,此时的内 Doherty 即为新的主功放,与 Aux2 组成整个 3DPA,当 Aux2 也达到饱和输出状

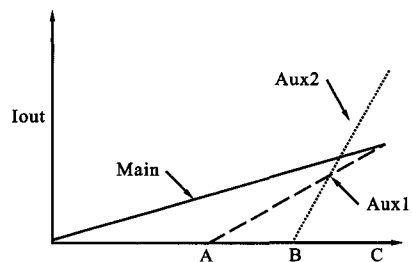


图 2 1 : 1 : 2 的 3DPA 理想电流曲线

态时,整个 3DPA 达到最终饱和,再次出现效率峰值,即为图 2 和图 3 中的 C 点。

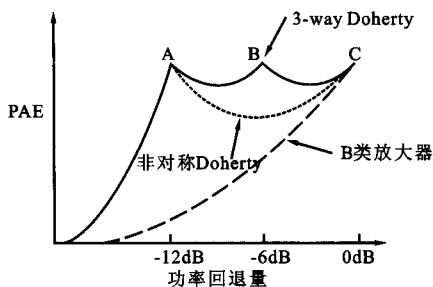


图3 三种功放的效率对比

3 三路 Doherty 功放的设计

3.1 三路 Doherty 功放的设计指标

较基站近百瓦的输出功率不同,直放站的下行输出功率较小,主要功率等级为 200 mW、1 W、2 W、5 W 和 10 W,即为功放平均输出功率,本文选择的输出功率为 5 W,这也是大多数室外直放站所使用的。TD-LTE 信号的峰均比为 9~12 dB,在此取最大值,因此可采用峰值输出功率为 60 W 且 Main、Aux1 和 Aux2 峰值功率比为 1:1:2 的 3DPA 结构,根据式(1)~(5)可计算出 Main、Aux1 和 Aux2 所需的峰值输出功率分别为 15 W、15 W 和 30 W。最终选择 CREE 公司的 CGH27015 和 CGH27030 两款 GaN 管为模型。设计要求在 2600 MHz 的中心频率处,峰值功率达 60 W,增益大于 10 dB,平均输出功率处三阶互调(IMD3)小于 -20 dBc,功率附加效率(PAE)大于 50%,且在整个 12 dB 回退范围内效率曲线尽量平坦。

3.2 三路 Doherty 功放的电路设计

3DPA 功放的设计思想为首先对 Main、Aux1 和 Aux2 功放管进行单管设计,再将 Main 和 Aux1 组成内 Doherty,整体作为新的主功放,添加补偿线实现效率调制。然后调整 Aux2 的阻抗变换线,最后将三个单管与功分器和相位补偿线一起搭建成 3DPA 电路,兼顾效率、增益和线性度等指标,优化补偿线长度和两个辅助功放栅压,以达到最终的设计要求。

主功放设计即为传统 AB 类功放设计。对于两个辅助功放的设计,传统方法是设计好的 AB 功放栅极电压降低从而得到 C 类功放。然而,由于实际中的辅助功放偏置在非理想的 C 类状态,简单的降低栅极电压会使得功率管的饱和输出功率和效率降低,从而不能很好的达到设计要求。因此,有必要适当提高辅助功放的漏极电压,并在 C 类工作状态

下进行多谐波双向牵引以寻找该工作状态下的最佳阻抗,从而保证辅助功放的整体性能。图 4 即为 Aux2 采用 C 类多谐波双向牵引技术前后的对比,其中实线为采用该改进方法,而虚线为传统方法,从中可以看出采用该改进方法的 Aux2 在饱和输出功率和效率参数上较传统方法均有所提高。

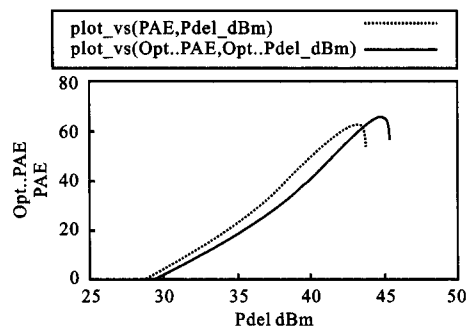


图4 Aux2 采用改进方法的前后对比

运用上述方法完成 Aux1 和 Aux2 的设计,并将其与 Main、功分器、阻抗变换线和相位补偿线共同搭建成 3DPA 电路,对补偿线和栅极电压进行优化,所得最终仿真原理图如图 5 所示。

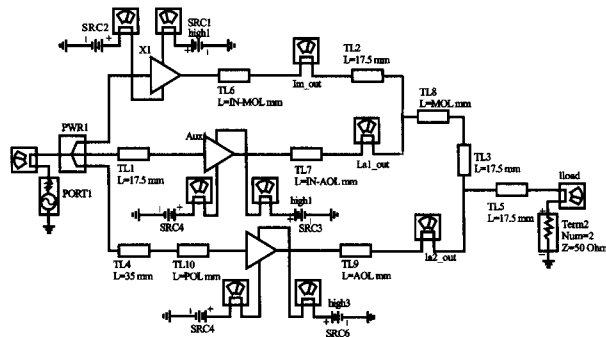


图5 3DPA 功放仿真原理图

4 三路 Doherty 功放的仿真结果分析

图 6 是 3DPA 的电流仿真曲线,与图 2 的理想电流曲线相近,其中实线为 Main,虚线为 Aux1,点线为 Aux2。当输出功率小于 36 dBm 时,3DPA 为低功率输出状态,此时只有 Main 工作,两个辅助功放处于关断状态,因此其电流为零;随着输出功率的增加,3DPA 进入中功率输出状态;输出功率继续增加,在 42 dBm 附近,Aux2 导通工作,有电流输出,Aux1 逐渐达到饱和,3DPA 进入高功率状态,当输出功率为 48 dBm 时,三个功放管均达到饱和。由于三管峰值输出功率比为 1:1:2,因此在 3DPA 饱和输出状态下的 Aux2 电流是 Main 和 Aux1 电流的 2 倍,即 $I_{a2-max} = 2 \times I_{m-max} = 2 \times I_{a1-max}$ 。

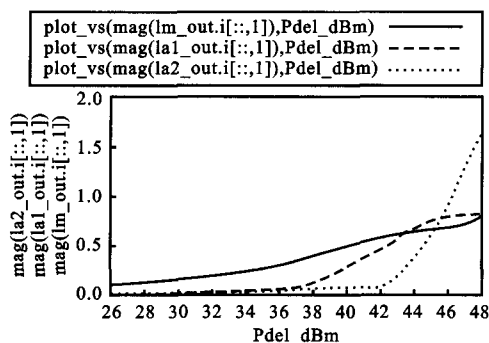


图 6 电流仿真结果

图 7 是 3DPA(实线)和 B 类功放(点线)的功率附加效率仿真结果对比,两个功放峰值输出功率均为 48 dBm(60 W),峰值效率约为 65%,3DPA 回退 6 dB 处是其第二个峰值效率点,PAE 为 59.2%,较 AB 类功放提升了 26%,回退 12 dB 即为平均输出功率处,PAE 为 55.9%,较 AB 类功放提升了近 38%,且整个回退范围内的效率曲线相对平坦。

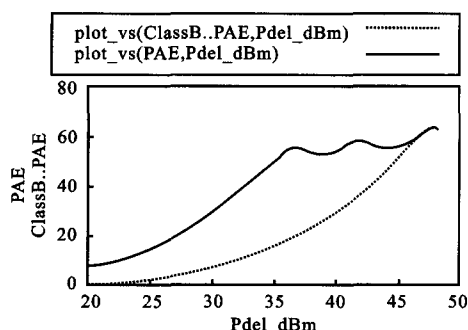


图 7 功率附加效率仿真结果

图 8 是 3DPA 的增益仿真图,随着输出功率的增加,增益逐渐降低,这是由于当 Main 接近饱和输出状态时,增益开始急剧下降,而 Aux1 和 Aux2 受偏置在 C 类工作状态的影响,其增益也相对较低,因此整个 3DPA 的增益呈压缩趋势。在平均输出功率 36 dBm 处,增益为 10.6 dB,满足设计要求。

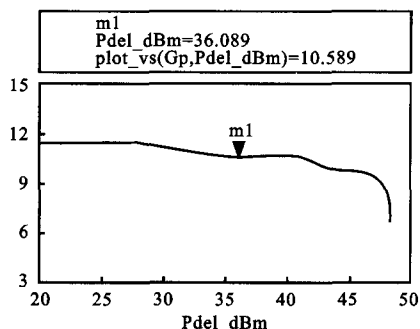


图 8 增益仿真结果

图 9 是对 3DPA 进行 5 MHz 间隔双音仿真的结果,其中实线为上三阶互调,虚线为下三阶互调,

两者基本重合,表明对功放记忆效应的抑制较好。当输出功率小于 40 dBm 时,IMD3 随着输出功率增加而增大;当输出功率大于 40 dBm 时,IMD3 有小范围的减小,这主要是由于偏置在 AB 类的 Main 和 C 类的 Aux1 产生相位相反的三阶互调分量,在一定程度抵消,改善了线性度。当输出功率大于 42 dBm 时,Aux2 开启工作,线性度再次恶化。当输出功率处于 47 dBm 附近时,三个功放管的三阶互调分量得到最大抵消,线性度得到补偿。综合来看,在整个 12 dB 回退范围内 IMD3 小于 -20 dBc,线性度良好,基本满足设计要求,为与预失真技术的结合奠定了良好的基础。

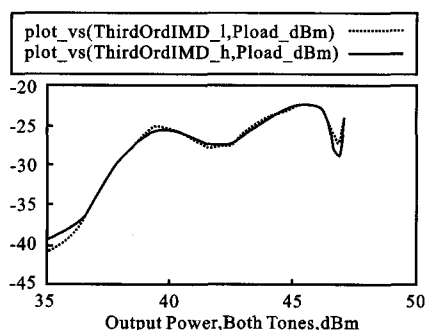


图 9 三阶互调仿真结果

5 结束语

本文基于对 Doherty 技术分析,提出了一种嵌入内 Doherty 的三路 Doherty 结构。仿真结果表明,该设计满足 TD-LTE 直放站功率放大器技术参数要求,实现了 12 dB 回退范围内相对稳定的高效率,满足实际应用的同时为多路 Doherty 技术在无线通信领域的研究和推广提供了设计参考。

参考文献:

- [1] 张天魁,冯春燕,曾志明. B3G/4G 移动通信系统中的无线资源管理[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [2] Grebennikov A. 张玉兴,赵宏飞,译. 射频与微波功率放大器设计[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
- [3] Ju Young Lee, Ji Yeon Kim, Stapleton S P, et al. A High Power Asymmetric Doherty Amplifier with Improved Linear Dynamic Range [J]. Microwave Symposium Digest, 2006. IEEE MTT-S International, 2006, 15(11):1348-135.
- [4] Shin B, Cha J, Kim J, et al. Linear power amplifier based on 3-way Doherty amplifier with predistorter [J]. IEEE MTT-S Int Microwave Symp Dig, 2004: 2027-2030.

(下转第 89 页)

参考文献:

- [1] Anh Tuan Phan, Chang Wan Kim, Moon Suk Jung, et al. A novel 1.5V DC offset cancellation CMOS down conversion mixer [J]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2005(4):3704-3707.
- [2] Kayal, M Randjelovic Z. Auto-zero differential difference amplifier [J]. Electronics Letters, 2000, 36(8): 695-696.
- [3] Hsin Liang Chen, Po Sheng Chen, Jen Shiun Chiang. A Low-Offset Low-Noise Sigma-Delta Modulator With Pseudorandom Chopper-Stabilization Technique [J]. Circuits and Systems I: Regular Papers, 2009, 56(12):2533-2543.
- [4] Philip Godoy, Joel L Dawson. Chopper Stabilization of Analog Multipliers, Variable Gain Amplifiers, and Mixers [J]. IEEE J Sol Sta Circ, 2008, 43(10): 2311-2321.
- [5] Liu L X, Yang Y T, Zhu Z M. A high accuracy bandgap reference with hopped modulator to compensate MOS-

FET mismatch[C] // IEEE 18th Int Conf on VLSI Design. Kolkata, India;IEEE, 2005:854-857.

- [6] 范军,黑勇,陈铖颖.一种采用斩波—稳零技术的低功耗Delta-Sigma调制器的设计[J].微电子学与计算机,2011,28(11):76-80.
- [7] 李杨先,顾晓峰,浦寿杰,等.斩波稳定型开关电容积分器的设计[J].微电子学与计算机,2011,27(5):153-156.

作者简介:



杨晓春 男,(1987—),硕士研究生.研究方向为模拟集成电路设计.

于奇 男,(1972—),博士,教授.研究方向为新型固体器件和数模混合信号集成电路设计.

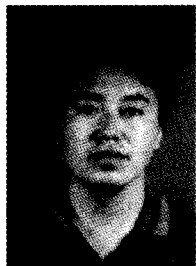
(上接第85页)

- [5] Frederick H Raab. Efficiency Of Doherty RF Power Amplifier System[J]. IEEE Transactions On Broadcasting, 1987,(3):77-83.
- [6] Yang Y, Shin B, Kim B. A fully matched N-way Doherty amplifier with optimized linearity [J]. IEEE

Trans Microw Theory Tech, 2003,51(3):986-993.

- [7] Bumman Kim, Jangheon Kim, Ildu Kim and Jeonghyeon Cha. The Doherty Power Amplifier[J]. IEEE Microwave Magazine, 2006(10):42-50.

作者简介:



南敬昌 男,(1971—),博士,教授.研究方向为射频电路与系统.信号处理与信息编码、通信系统仿真.

方杨 男,(1988—),硕士研究生.研究方向为射频电路设计、智能交通.

李厚儒 女,(1988—),硕士研究生.研究方向为射频功放模型与仿真技术.