

基于 ADS 平台反向 Doherty 结构的功率放大器的设计与仿真

张敏翔, 汤碧玉*, 吴晓芳, 方志远, 薛财锋

(厦门大学信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 基于 Advanced design system (ADS) 平台, 通过优化偏置电压和输入功率比例改善三阶互调失真 (IMD3), 仿真设计一款工作于 2.14 GHz 频段 WCDMA 基站不对称功率驱动的反向 Doherty 功率放大器 (IDPA). IDPA 结构中接在峰值放大器补偿线后的微带线能减少功率泄露, 改善输出效率. 仿真结果表明, 当载波放大器的栅极偏置电压为 2.74 V, 峰值放大器的栅极偏置电压为 0.9 V 并且输入功率比例为 1:2.07, 输出功率为 44 dBm 时其功率附加效率 (PAE) 为 25.26%, 比 AB 类平衡功率放大器提高了 9.63%, 比传统的 Doherty 功率放大器 (DPA) 提高了 1.12%; IMD3 为 -40.82 dBc, 和 AB 类平衡功率放大器相比改善了 3.34 dBc. 因此, 这种简单结构的不对称功率驱动的反向 IDPA 实现了高效率和高线性度的良好折中, 能够很好地适用于现代无线通信系统中.

关键词: 反向 Doherty 功率放大器; ADS; 功率附加效率; 三阶互调失真; 不对称功率驱动

中图分类号: TN 837

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2011)04-0729-05

近年来, 随着节约型社会理念的提出, 第三代无线通信系统对基站和直放站的体积和功耗提出了严格的要求, 而目前比较常用的 AB 类平衡结构的功率放大器效率都较低, 一般在 8%~15%, 造成很大的资源浪费. 因此, 研究设计高效、线性、宽带的射频功率放大器成为功率放大器研究领域的一个热门课题, Doherty 结构的功率放大器以其效率高、实现方法简单、成本低廉等优点引起了人们越来越多的关注和研究.

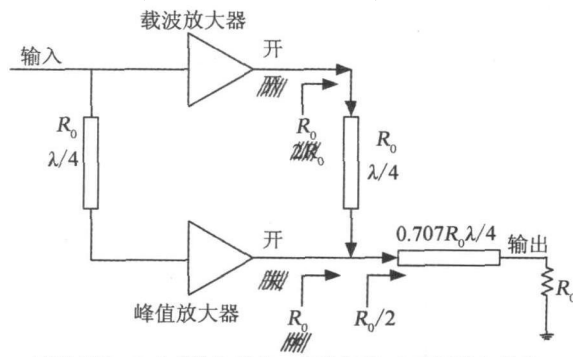
最初的 Doherty 功率放大器 (DPA) 结构由 Doherty 于 1936 年提出, 它由 2 个真空管和阻抗变换网络组成^[1]. DPA 可以分为传统结构和反向结构, 和普通的 AB 类平衡功放相比, 在同样的输出功率水平下, 其效率是 AB 类平衡功放的 2 倍, 但线性度变差. 在实际应用中为了改善 Doherty 结构功放的线性度, 需要对效率和线性度进行折中设计, 传统的 Doherty 结构已经被证明了能够实现效率和线性度很好的折中^[2]. 和传统的 DPA 相比, 反向 Doherty 功率放大器 (IDPA) 有着比较紧凑的反向负载网络结构^[3-4]. 本文将结合传统 Doherty 的结构进一步说明 IDPA 的工作原理和结构, 并且基于 Advanced design system (ADS) 仿真平台选用飞思卡尔的 MRF6S21140H 功放管设计

一款适合于 2.14 GHz 频段 WCDMA 基站的不对称功率驱动的反向 IDPA.

1 DPA 的工作原理和结构

传统的 DPA 的结构示意图如图 1 所示, 它包含载波放大器 (carrier amplifier) 和峰值放大器 (peak amplifier). 2 个放大器并行连接, 载波放大器一般工作在 AB 类, 其输出端串联一个 $\lambda/4$ 微带线起阻抗变换的作用, 峰值放大器一般工作在 C 类, 其输入匹配网络前端附加的 $\lambda/4$ 微带线起到相位平衡的效果.

由图 1 可以看出, 传统 DPA 有 2 种工作状态: 小功率输入状态 (图 1 中的有斜条纹) 和大功率输入状态



无斜条纹: 大功率输入状态; 有斜条纹: 小功率输入状态.

图 1 传统的 Doherty 结构示意图

Fig. 1 A schematic diagram of the Doherty amplifier

收稿日期: 2010-04-07

* 通信作者: thy@xmu.edu.cn

(图 1 中的无斜条纹). 在大功率输入状态, 假设 2 个放大器的输出电流大小相等且相位不同, 这时载波放大器和峰值放大器的负载阻抗都为 R_0 . 当小功率信号输入时, 峰值放大器截止, 只有载波放大器在工作, 通过载波放大器输出端的特性阻抗为 R_0 的 $\lambda/4$ 微带线将负载阻抗 R_0 变换到 $2R_0$, 这样可以实现在小功率输入状态下高的负载阻抗达到效率的提高. 此时, 小功率输入状态和大功率输入状态下峰值功率水平都有相同的峰值效率, 但小功率输入状态的峰值功率要比大功率时低 6 dB, 从而实现了提前饱和的目的, 提高功率回退时的效率.

2 IDPA 的结构和工作原理

IDPA 的工作原理和简单的负载网络结构如图 2, 和传统的 Doherty 结构不同的是, IDPA 的 $\lambda/4$ 微带线附加在峰值放大器的补偿线后面. 载波放大器一般偏置在 A 类模式, 峰值放大器一般偏置在 C 类模式. 对于无耗输出微带线, 利用功率守恒条件可知

$$I_3 = I_1 \sqrt{\frac{R_1}{R_3}}, \quad (1)$$

电流分流比定义为

$$S = \frac{I_3}{I_2 + I_3}, \quad (2)$$

那么在特性阻抗为 Z_2 的微带线输出端看出去的阻抗为

$$R_3 = \frac{I_2 + I_3}{I_3} \frac{Z_1^2}{R_L} = \frac{Z_1^2}{S R_L}. \quad (3)$$

而从载波放大器负载网络输出端看出去的阻抗是

$$R_2 = \frac{I_2 + I_3}{I_2} \frac{Z_1^2}{R_L} = \frac{Z_1^2}{(1-S) R_L}. \quad (4)$$

当小功率信号输入时(如图 2(a)), 峰值放大器关断, 只有载波放大器正常工作, 此时从负载看向峰值放大器, 特性阻抗为 Z_2 的 $\lambda/4$ 微带线阻抗近似于无穷大, 使得阻抗 R_3 变的非常大, 这样从载波放大器泄露到峰值放大器的功率很小. 载波放大器负载网络输出端看出去的阻抗 R_2 是

$$R_2 = \frac{Z_1^2}{R_L}. \quad (5)$$

当 $Z_1 = 0.707R_0$ 且 $Z_2 = R_L = R_0 = 50 \Omega$ 时, $R_2 = 0.5R_0 = 25 \Omega$, 通过匹配电路和补偿线网络在载波放大器晶体管漏极端的输出阻抗转换为 $2R_{opt}$. 当载波放大器的电流为最大电流的一半时晶体管饱和, 同时效率达到峰值, 此时载波放大器在饱和时的输出功率是输出峰值功率的 25%, 因此在功率回退 6 dB 时效率

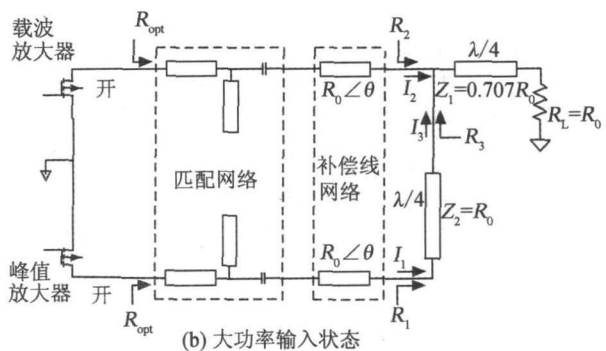
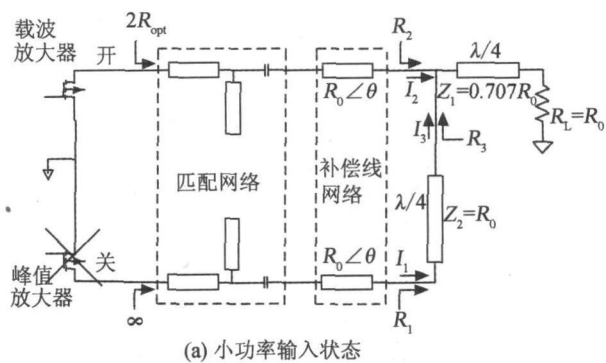


图 2 IDPA 的工作原理和简单的负载网络

Fig. 2 Simplified load network configuration and its operation for the IDPA

达到最大.

当大功率信号输入时(如图 2(b)), 载波放大器和峰值放大器同时工作, 假设载波和峰值放大器输出端的电流大小相等相位不同, 即电流分配比 $S = 0.5$, 载波和峰值放大器产生相等的输出功率, 那么补偿线后的负载阻抗可以认为是相等的, 即为

$$R_1 = R_2 = R_3 = Z_2 = 2 \frac{Z_1^2}{R_L} = 50 \Omega. \quad (6)$$

此时通过匹配电路和补偿线网络在放大器晶体管漏极的输出阻抗为 R_{opt} , 当载波和峰值放大器都饱和输出峰值功率时效率再次达到最大. 可以看出, IDPA 结构中的峰值放大器补偿线后接的特性阻抗为 Z_2 的 $\lambda/4$ 微带线不仅起着相位补偿的作用, 而且还有减小小功率泄露的效果, 而载波放大器的匹配电路和补偿线组成的网络除了要实现阻抗的匹配以外, 还要完成阻抗变换的功能, 这是和传统 Doherty 结构使用 $\lambda/4$ 微带线实现阻抗变换有着明显的不同^[5].

3 基于 ADS 平台的 IDPA 的仿真设计

基于 ADS 仿真平台, 选用飞思卡尔的 MRF-6S21140H 功放管, 设计一款工作在 2.14 GHz 频段 WCDMA 基站的不对称功率驱动 IDPA. 在仿真设

计中,利用 ADS 平台可以很好地简化设计步骤,缩短研发周期,仿真设计中所用到的 MRF6S21140H 功放管模型可以在飞思卡尔的官网下载。

3.1 仿真电路的设计和补偿线的选择

晶体管的最佳输入输出阻抗可以用负载牵引的方法得出,通过仿真得出最佳输出阻抗为 $(1.352 - j \times 2.467) \Omega$,最佳输入阻抗为 $(8.150 - j \times 11.389) \Omega$,可以看出和 datasheet 参考设计中给出的阻抗值很相近^[6]。设计偏置电路除了要给晶体管提供稳定的静态工作点外,还要在不影响匹配的情况下去耦、滤波。在仿真设计中 IDPA 的阻抗匹配网络和补偿线网络是需要关注的重点,特别是载波放大器的输出匹配网络和补偿线网络,除了要实现晶体管漏极端到负载的良好匹配外,还要完成阻抗变化的功能。因此在完成 IDPA 的输出匹配电路设计后,需要对补偿线做出一定的选择。

IDPA 输出网络的补偿线可以通过测量载波和峰值放大器匹配网络后的输出反射系数(Γ_{OUT})选择。与传统的 DPA 使用补偿线使 Γ_{OUT} 旋转到开路点(0° 或者高阻抗)不同,IDPA 是使 Γ_{OUT} 旋转到短路点(-180° 或者低阻抗)。

如图3所示,通过考虑完全匹配的载波放大器,能够在传统和反向负载网络中选择最佳的布局。当测试或者仿真的载波放大器的 $\angle \Gamma_{OUT}$ 位于 $-\Phi_{max}$ 到 $180^\circ - \Phi_{max}$ 之间(顺时针),就可以选择反向负载网络使得 $\angle \Gamma_{OUT}$ 旋转到 -180° 所需的补偿线更短,反之,选择传统的负载网络需要的补偿线更短。这里需要特别说明的是当 $\angle \Gamma_{OUT}$ 位于 -180° 到 $180^\circ - \Phi_{max}$ 之间(顺时针),将丢失掉 IDPA 的少量的性能但获得了简单的电路,即此时的补偿线为 0,这在参考文献[5]中有详细论证。

完成补偿线的设计后,就可以搭建出 IDPA 整个电路原理图进行仿真测试。

3.2 IDPA 的线性化设计

IDPA 的线性化设计和传统的 AB 类功放相比要复杂的多,在接下来的内容里主要介绍 IDPA 的 2 种线性化措施:

1) 调节晶体管的栅极偏置电压来达到 IMD3 最小化的目的;

2) 采用不对称功率驱动。

当小功率信号输入时,载波放大器偏置在 AB 类,峰值放大器截止, IDPA 的线性度主要取决于载波放大器。因此,载波放大器单元的线性度必须设计成高线

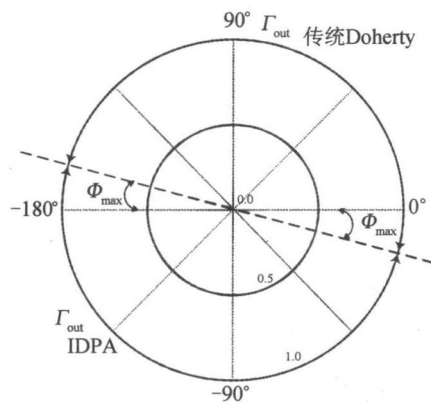


图3 选择传统和反向负载网络的示意图

Fig.3 Selection criterion between the inverted and normal output networks

性度。在大功率区域, IDPA 的线性度可以通过调节 2 个晶体管的栅极偏置使得 IMD3 最小化来改善。图4是 LDMOS 晶体管的三阶谐波产生系数 g_{m3} 曲线^[7],当调节 C 类峰值放大器偏置电压使得 g_{m3} 的振幅和载波放大器的相同且相位相反,就可以达到 IDPA 的 IMD3 最小化。

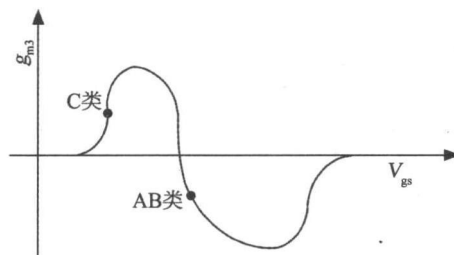


图4 不同栅极偏置下常用 LDMOS 晶体管的大信号 g_{m3}

Fig.4 Large signal g_{m3} vs. gate bias for a general LDMOS transistor

这里需要特别指出的是,在前面的章节中假设在大功率工作状态下 IDPA 的 2 个功放管输出电流的大小相等且相位不同,但是在实际中由于载波放大器偏置在 AB 类,峰值放大器偏置在 C 类,对于相同的输入信号,载波放大器的电流必然会小于峰值放大器的电流。因此当 IDPA 的输出功率达到峰值时,载波放大器深度饱和,峰值放大器还没有达到饱和,峰值放大器对载波放大器输出阻抗的牵引作用没有达到理论上的效果,造成 IDPA 的线性度严重恶化。不对称的功率驱动可以很好地改善这个问题,在 ADS 的仿真设计中可以很方便地改动输入端功分器的功率分配比例调节,通过多次仿真对比来得到最佳的输入功率分配比。仿真结果表明,当载波放大器和峰值放大器的输入功率比为 1:2.07 时, IDPA 的负载调制良好,整个放大器的

线性度得到很大的改善,这将在下面的章节中进行测试对比.

3.3 IDPA 的测试与分析

在初步完成 IDPA 电路原理图的仿真设计后,可以利用 ADS 模板很方便地进行 IDPA 各项性能的仿真测试. 首先进行 IDPA 电路的稳定性测试,设计的 IDPA 满足绝对稳定条件. 然后再进行 IDPA 的效率和线性度测试分析,仿真设计中可以改动输入端功分器的功率分配比例和偏置电压进行对比调节,最后仿真中发现当载波放大器的栅极偏置电压为 2.74 V,峰值放大器的栅极偏置电压为 0.9 V,漏极偏置电压为 28 V 且输入功率比例为 1:2.07 时将其与对称输入功率的 IDPA, AB 类平衡功放和 1:2.07 不对称输入功率的 DPA 的仿真结果作比较,其各项性能都良好. 图 5 中是 2.14 GHz 中心频率 4 种方法的功率附加效率(PAE)仿真结果的比较曲线图,可以看出在输出功率为 44 dBm 时,1:2.07 不对称功率驱动 IDPA 的 PAE 为 25.26%,1:1 对称功率驱动 IDPA 的 PAE 为 30.14%,AB 类平衡功放的 PAE 为 15.63%,1:2.07 不对称功率驱动 DPA 的 PAE 为 24.14%,1:2.07 不对称功率驱动 IDPA 比 AB 类平衡功放的 PAE 提高了 9.63%,比 DPA 提高了 1.12%.

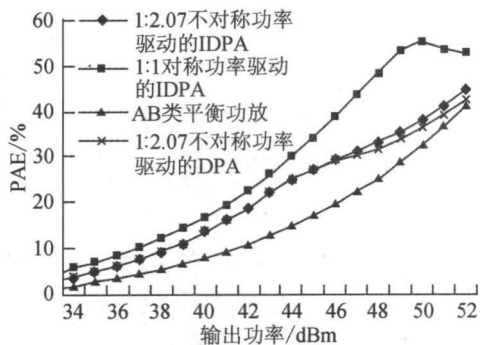


图 5 PAE 仿真结果的比较曲线图

Fig. 5 Comparison of the PAE simulation result

图 6 是在中心频率为 2.14 GHz, 1 MHz 的频率间隔的双音信号驱动下, IMD3 仿真结果的比较曲线图,可以看出 1:2.07 不对称功率驱动 IDPA 的 IMD3 的性能良好,在输出功率为 43 dBm 时为 -45.16 dBc,和 AB 类平衡功放(此时 AB 类平衡功放 IMD3 为 -36.61 dBc)相比较改善了 8.55 dBc,和 1:1 对称功率驱动 IDPA(此时 IMD3 为 -29.92 dBc)相比改善了 15.24 dBc,和 1:2.07 不对称功率

驱动的 DPA(此时 IMD3 为 -44.14 dBc)相比改善了 1.02 dBc. 在输出功率为 44 dBm 时 1:2.07 不对称功率驱动 IDPA 的 IMD3 为 -40.82 dBc,和 AB 类平衡功放(此时 IMD3 为 -37.48 dBc)相比较改善了 3.34 dBc,和 1:1 对称功率驱动 IDPA(此时 IMD3 为 -27.36 dBc)相比改善了 13.46 dBc,和 1:2.07 不对称功率驱动的 DPA(此时 IMD3 为 -39.75 dBc)相比改善了 1.07 dBc.

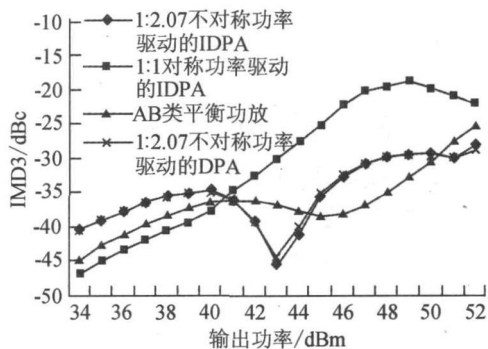


图 6 IMD3 仿真结果的比较曲线图

Fig. 6 Comparison of IMD3 simulation result

从上述的仿真实验结果对比可以看出(对比结果如表 1),采用不对称功率驱动 IDPA 结构能够很好的实现高线性和高效率的良好折中,设计出的功率放大器的仿真结果性能良好,和目前在实际中常采用的 AB 类平衡功放相比在高线性度的要求下效率上有很大的提高.此外,和不对称功率驱动的 DPA 的比较发现,PAE 得到了改善,这是由于 $\lambda/4$ 微带线是接在峰值放大器的补偿线后,而不是接在载波放大器的补偿线后端,这种结构能够很好的抑制小功率工作状态下的功率从峰值放大器泄露,改善了功放的输出效率.

4 总 结

为了适应现代无线通信系统中对功率放大器提出的高效率、高线性度的要求,本文基于 ADS 仿真平台,采用飞思卡尔的 MRF6S21140H 功放管设计出一款适合于 2.14 GHz 频段 WCDMA 基站的不对称功率驱动 IDPA,仿真结果表明设计的 1:2.07 不对称功率驱动 IDPA 在载波放大器的栅极偏置电压为 2.74 V,峰值放大器的栅极偏置电压为 0.9 V 且漏极偏置电压都为 28 V 时的性能良好,在输出功率为 44 dBm 时和 AB 类平衡功放相比 PAE 提高了 9.63%,IMD3 改善了 3.34 dBc;和 DPA 相比 PAE 提高了 1.12%.

表 1 性能对比
Tab.1 Performance comparison

结构类型	P_{OUT}/dBm	PAE/ %	IM D3/ dBc
1: 2.07 不对称功率驱动的 IDPA	44	25.26	- 40.82
1: 1 对称功率驱动 IDPA	44	30.14	- 27.36
AB 类平衡功放	44	15.63	- 37.48
1: 2.07 不对称功率驱动的 DPA	44	24.14	- 39.75

从这个仿真设计的结果可以看出, 不对称功率驱动 IDPA 具有电路结构简单, 效率高, 线性度良好, 非常适合于 WCDMA、TD-SCDMA、CDMA2000 等各种移动通信基站和直放站的应用。

参考文献:

[1] Doherty W H. A new high efficiency power amplifier for modulated waves[J]. Proc IRE, 1936, 24: 1163-1182.

[2] Yang Y, Yi J, Woo Y Y, et al. Optimum design for linearity and efficiency of microwave Doherty amplifier using a new load matching[J]. Technique Microw J, 2001, 44: 12: 20-36.

[3] Stengel R F. High efficiency power amplifier having reduced output matching networks for use in portable devices: U S, Patent 6262629 B1[P]. 2001-07-17.

[4] Cygan L F. A high efficiency linear power amplifier for portable communications applications [C]//IEEE CSIC Dig. Schaumburg, IL, USA: IEEE Press, 2005: 153-157.

[5] Ahn G, Kim M, Park H, et al. Design of high efficiency and high power inverted Doherty amplifier [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2007, 55(6): 1105-1111.

[6] Freescale Semiconductor. MRF6S21140H technical data [EB/OL]. [2005-02-01]. <http://www.freescale.com.cn>.

[7] Kim B M, Kim J H, Kim I D, et al. The Doherty power amplifier[J]. IEEE Microwave Magazine, 2006, 10: 42-50.

[8] Kim J H, Cha J H, Kim I D, et al. Optimum operation of asymmetrical cells based linear Doherty power amplifiers under uneven power drive and power matching[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2005, 53(5): 1802-1809.

Using ADS to Design and Simulation of an Inverted Doherty Amplifier

ZHANG Min-xiang, TANG Bi-yu*, WU Xiao-fang,
FANG Zhi-yuan, XUE Cai-feng

(School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: We use ADS platform to design and simulation of a uneven power drive inverted Doherty amplifier (IDPA). It is suitable for WCDMA base station applications at 2.14 GHz. The inverted Doherty amplifier through the microstrip line after the peaking amplifier output network to improve power leakage and efficiency. This configuration have a good compromise of efficiency and linearity to optimum the peaking amplifier gate bias voltage at 0.9 V, carrier amplifier gate bias voltage at 2.74 V, and using 1: 2.07 uneven power drive to IDPA. At an output power of 44 dBm, the IDPA perform with 9.63% higher power added efficiency (25.26% versus 15.63%) and 3.34 dBc better third order intermodulation distortion (-40.82 dBc versus -37.48 dBc) than the balanced class AB amplifier, and 1.12% higher power added efficiency (25.26% versus 24.14%) than the conventional Doherty amplifier(DPA) does. It can indicate that this simple configuration is suitable for modern wireless communication systems.

Key words: inverted Doherty power amplifier; ADS; power added efficiency; third order intermodulation distortion; uneven power drive