

文章编号: 2095-4980(2016)03-0401-04

3.35 GHz 线性高效率 Doherty 功率放大器的设计

甘德成^{1,2}, 何松柏¹, 亓天¹, 史卫民¹, 陈金虎¹, 刘强安¹

(1.电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731; 2.宜宾学院 物理与电子工程学院, 四川 宜宾 644000)

摘要: 设计并仿真实现了一款高线性、高效率 Doherty 功率放大器, 该功率放大器工作频率为 3.35 GHz。为了提高 Doherty 功率放大器的线性度, 本文所设计 Doherty 功率放大器充分利用了载波功放和峰值功放的三阶交调分量(IM3)相互抵消的原理来提高功率放大器的线性度。本文设计采用两枚 Cree 公司生产的 6 W GaN HEMT 晶体管 CGH40006P 进行仿真验证, 仿真结果证明: 在所设计频率点 3.35 GHz, IM3<-30 dBc。

关键词: 线性; 高效率; Doherty 功率放大器; 三阶交调分量(IM3)

中图分类号: TN4

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201603.0401

Design of 3.5 GHz linear high-efficiency Doherty power amplifiers

GAN Decheng^{1,2}, HE Songbai¹, QI Tian¹, SHI Weimin¹, CHEN Jinhu¹, LIU Qiang'an¹

(1.School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

(2.School of Physics and Electronic Engineering, Yibin University, Yibin Sichuan 644000, China)

Abstract: A linear high-efficiency Doherty Power Amplifier(PA) operating at 3.35 GHz is presented. The cancellation principle of the Third-order Intercept Point(IM3) in Doherty technique is adopted in order to improve the linearity of the proposed Doherty amplifier. The Doherty amplifier employs two 6 W GaN HEMT transistors namely CGH40006P from Cree to validate the proposed principle. The results shows that at the design frequency point 3.35 GHz, IM3<-30 dBc.

Key words: linearity; high-efficiency; Doherty power amplifier; Third-order Intercept Point(IM3)

现代无线通信系统中, 在频谱日渐拥挤的情况下为了提高数据传输速率, 采用复杂的非恒包络调制方式, 使得信号峰峰值高达 6 dB~12 dB。为了保证通信质量即线性度, 功率放大器(PA)必须工作在回退区, 然而, 这样效率就会大大降低^[1]。1936 年 Doherty 提出一种高效放大非恒包络信号的功率放大器(Doherty 功率放大器)^[2]。Doherty 技术是目前提高射频功率放大器效率的最常用技术, 特别是针对目前具有高峰均比的无线通信信号, Doherty 能在整个回退区都达到较高的效率^[3-4]。但是, 通常设计出的 Doherty 功率放大器线性度并不能满足系统要求。因此, 必须在放大前加入线性化技术, 例如数字预失真技术。为解决线性度问题, 本设计根据载波功放和峰值功放的 IM3 对消原理^[3], 仿真实现 Doherty 功率放大器具有良好线性度, 在 3.35 GHz 处, IM3<-30 dBc。同时在回退区保持有较高的效率(>45%), Doherty 增益大于 13 dB。

1 基本理论分析

Doherty 功率放大器设计之前首先对 Doherty 基本原理做简单介绍, 然后对改善线性度原理进行分析。

1.1 Doherty 原理

Doherty 功率放大器基本框图如图 1 所示, 可以分为 3 个工作区域, 分别为: 低输入功率区、中输入功率区和饱和输入功率区^[4]。其主要组成包括: 主功放(carrier PA)、峰值功放(peaking PA)、负载调制网络、功分器以及补偿线。Doherty 技术的主要原理是负载调制致使载波功放提前饱和, 以此保证在功率回退区的效率。

在低输入功率时由于峰值功放没有开启, 此时 Doherty 的线性与载波功放的线性密切相关。随着输入功率

的增加，峰值功放逐渐开启，此时 Doherty 的线性与载波功放和峰值功放都有关系，因此必须研究 Doherty 功率放大器与子功放之间的关系，以此改善 Doherty 放大器的线性度。

1.2 线性改善原理

在峰值功放开启后，载波功放已达到饱和，因此其增益开始压缩。但是，由于峰值功放开启后其增益不断膨胀，因此载波功放的增益压缩完全可以得到补偿。即，理论上 Doherty 功放可以拥有平坦的增益，其 AM-AM 响应是线性的。

将载波功放或者峰值功放的输出电流与输入电压关系用泰勒级数表示如下^[5]：

$$i_{out}(v_{in}(t)) = g_{m1}v_{in}(t) + \sum_{i=2}^{\infty} g_{mi}[v_{in}(t)]^i \tag{1}$$

式中 g_{mi} , $v_{in}(t)$ 和 i_{out} 分别为 i 次谐波分量的跨导、输入电压和输出电流。

三次谐波分量对 Doherty 的线性影响最为严重^[6-7]。图 2 所示为晶体管的三次谐波分量跨导随栅极偏置电压的变化曲线。同时从图 2 可以看出只要合理地选择载波功放和峰值功放的栅极偏压，来自两路三阶分量完全可以相互抵消。

为了进一步理解在频域三阶交调相互抵消的原理，假设：

$$v_{in}(t) = B\{\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)\} \tag{2}$$

假设所用的晶体管为无记忆效应的理想放大器件，当双音信号分别进入载波功放与峰值功放后，就可以计算出载波功放与峰值功放产生的三阶交调信号如下：

$$i_{out_carrier}(2\omega_2 - \omega_1) = \frac{3}{4} g_{m3_carrier} B^3 e^{j\theta_{carrier}} \tag{3}$$

$$i_{out_peak}(2\omega_2 - \omega_1) = \frac{3}{4} g_{m3_peak} B^3 e^{j\theta_{peak}} \tag{4}$$

式中： $\theta_{carrier}$ 和 θ_{peak} 为载波功放和峰值功放三阶交调分量的相位。

正如图 2 所示，偏置在 C 类的峰值功放产生的三阶交调分量与偏置在 AB 类的载波功放产生的三阶交调分量相位相反，因此，两者幅度相同时便可以相互抵消。尽管由于晶体管的记忆效应， g_{m3} 抵消机制并不一定能完美地发生，但是很多文献已经证明该原理可以提高 Doherty 功放的线性度^[6-7]。

2 Doherty 功放设计

基于以上分析，本文仿真实现的线性高效率 Doherty 功率放大器采用 Rogers 4350B 基板($\epsilon_r = 3.6, H = 30 \text{ mil}$)，峰值与载波功放均采用 Cree 公司的 CGH40006P 晶体管。对于载波和峰值功放漏极偏压均为 28 V，栅极偏压分别为 -3 V 和 -5.5 V。图 3 是本设计采用的匹配网络拓扑结构。所有的仿真实现都是基于 ADS 仿真软件进行的。

设计步骤如下：

- 1) 基于 1.1 分析，优化设计载波功放时，合理地控制其谐波分量，使其在低输入功率时具有良好的线性度。在饱和输入时使其具有高效与高输出特性。
- 2) 优化设计峰值功放，合理控制其输出谐波，尽量使其 3 次谐波分量的幅度与载波功放相同。然后，使其在饱和输入时具有高效特性。
- 3) 把设计好的子功放输入端接威尔金森功分器，输出端接负载调制网络。
- 4) 调整补偿线与峰值偏置电压，使 Doherty 功放具有高线性度、高效率。

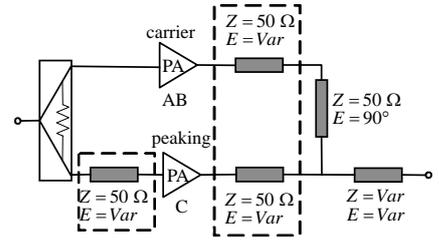


Fig.1 Structure of Doherty PA
图 1 Doherty 功率放大器原理图

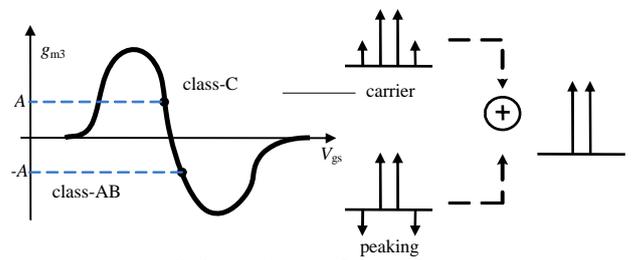


Fig.2 Theory of linear Doherty PA
图 2 线性 Doherty 功放设计原理示意图

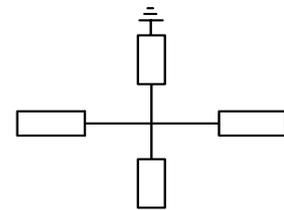


Fig.3 Structure of input and output matching network
图 3 输入输出匹配网络拓扑结构

3 结果分析

该 Doherty 功率放大器的版图如图 4 所示, 其仿真结果如图 5 所示, DE(Drain Efficiency)为漏极效率, PAE(Power Amplifier Efficiency)为放大器效率。

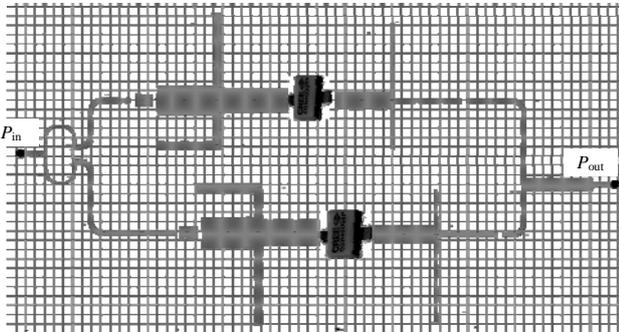


Fig.4 PCB of designed linear Doherty PA
图 4 Doherty 放大器版图

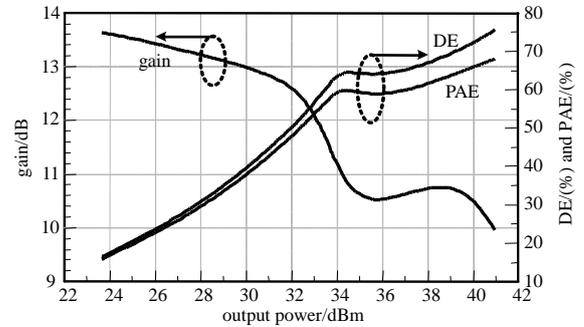


Fig.5 Simulation results of designed linear Doherty PA
图 5 Doherty 仿真结果图

由图 5 可知回退 7 dB 漏极效率大于 65%, 此时峰值偏压为 -5.5 V。但是, 从图 5 可知, 当载波功放饱和后增益压缩较为严重, 产生其 AM-AM 失真。这是由于峰值功放不能瞬间完全开启而是一个渐变过程, 导致峰值功放的增益不能完全补偿载波功放的增益压缩。

根据理论分析, 调整峰值功放的栅极偏置电压可以改善其线性度。为了具有良好的线性度, 把峰值功放的栅极电压调至 -4 V, 其仿真结果如图 6 所示^[8]。

图 6(a)为本设计在 3.35 GHz 单音测试的效率和增益曲线图, 由于峰值偏置电压的变化, 其增益有所提高, 但引起漏极效率在回退区相对恶化。图 6(b)为 IM3 和 IM5 仿真曲线, 可以看出 IM3 与 IM5 均小于 -30 dBc。图 6(c)为双音 5 MHz 仿真的效率与增益结果, 其增益大于 13 dB, 回退 6 dB 大于 45%。对比图 5 与图 6 可以看出, 调整峰值功放的栅极电压后效率有所下降, 但是线性度大大提高。

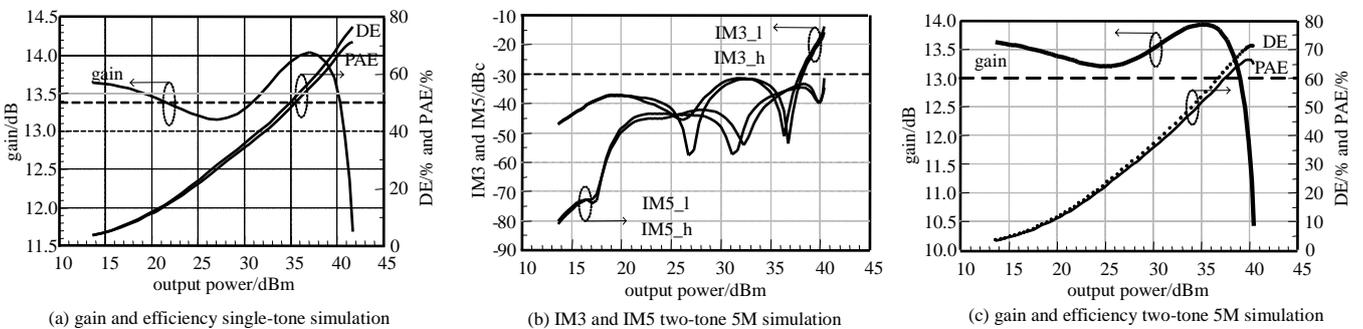


Fig.6 Two-tone test results of the designed linear Doherty PA
图 6 所设计功放的双音测试结果

4 结论

基于 Cree 公司的 6 W GaN HEMT 晶体管, 采用简单的匹配网络, 根据 Doherty 线性化原理, 本文所设计的线性高效率 Doherty 功率放大器在 3.35 GHz 具有良好的线性度, 同时具有较高的效率, 增益大于 13 dB, 仿真验证结果与理论分析基本符合。为了进一步提高功率放大器的线性度以及效率, 作者将做进一步研究、验证。

参考文献:

- [1] 刘杰,张健. 110 GHz 以上固态功率放大器的发展现状[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(6):836-841. (LIU Jie, ZHANG Jian. An overview of 110 GHz and above solid-state power amplifiers and circuit topology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(6):836-841.)
- [2] DOHERTY W H. A new high efficiency power amplifier for modulated waves[J]. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1936,24(9):1163-1182.
- [3] KIM B,KIM J,KIM I,et al. The Doherty power amplifier[J]. IEEE Microwave Magazine, 2006,7(5):42-50.

[4] COLANTONIO P,GIANNINI F,GIOFRÈ R,et al. The AB-C Doherty power amplifier. part I: theory[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2009,19(3):293-306.

[5] PEDRO C,CARVALHO N B. Intermodulation Distortion in Microwave and Wireless Circuits[M]. Norwood,MA:Artech House Inc., 2003.

[6] MUSOLFF C,KAMPER M,ABOU-CHAHINE Z,et al. Linear and efficient Doherty PA revisited[J]. IEEE Microwave Magazine, 2014,15(1):73-79.

[7] MUSOLFF C,KAMPER M,ABOU-CHAHINE Z,et al. A linear and efficient Doherty PA at 3.5 GHz[J]. IEEE Microwave Magazine, 2013,14(1):95-101.

[8] 孙会芳,姜幼明,董焯,等. 高功率微波器件的初步优化设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(6):927-941. (SUN Huifang,JIANG Youming,DONG Ye,et al. Preliminary optimization design of high power microwave sources[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(6):927-941.)

作者简介:



甘德成 (1973-), 重庆市奉节县人, 在读博士研究生, 主要研究方向为功率放大器线性化技术与微带滤波器综合研究. email: gdcybxxy@163.com.

何松柏(1972-), 男, 湖北省巴东县人, 博士, 教授, 主要研究方向为功率放大器设计技术、线性化技术、微波电路非线性模型、测试技术、RF 集成电路设计技术.

陈金虎(1989-), 男, 安徽省安庆市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波射频电路、射频功率放大器.

亓天(1993-), 男, 河南省商丘市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波射频电路、射频功率放大器.

刘强安(1988-), 男, 安徽省阜阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波射频电路、射频功率放大器.

史卫民(1990-), 男, 山东省菏泽市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波射频电路、射频功率放大器.

2016年第八届中国国际军民两用电子信息技术展览会暨军民融合创新发展论坛邀请函

各有关单位:

为深入贯彻党中央、国务院提出的加快实施创新驱动的发展战略, 推动军民融合深度发展, 由中国电子科技集团公司、中国电子信息产业集团有限公司、中国雷达行业协会、江苏省和平利用军工技术协会主办, 会同航天、航空、电子、兵器、船舶、核工业等军工集团院所, 企业、相关学会、协会等共同筹办的“第八届中国国际军民两用电子信息技术展览会”, 将于2016年7月6日至8日在江苏省南京市国际展览中心举行。

本届展会以“创新驱动、融合发展”为主旨, 开设雷达技术与装备、雷达应用系统、无人机技术创新及应用系统、军民两用电子与信息化、卫星通信、微波器件、新材料、智能装备等涵盖电子信息产业的军转民技术和产品、民技军用技术和产品及装备等方面专业领域。展馆面积近15 000平方米, 预计将有500多家展商参展。

展会期间, 我们将举办军民融合创新发展论坛、军民融合创新技术协同交流论坛、大数据论坛、企业推介、高新项目发布会、军工采购供求发布等活动, 军地上级政府机关、院校、研究所、企业等市场、技术、管理、质量、采购和供应部门都将派人来参观、采购。

诚邀国内外相关领域的军地各大院校、研究所、国企和民营企业前来参展。

参展联系人: 闫瑞华

手机: 13801174492

电话/传真: 010-68652457

展览会网址: <http://www.radar2016.icoc.in/>

电子邮箱: radardata@126.com

中国国际军民两用电子信息技术展览会组委会

2016年2月8日