

文章编号: 2095-4980(2018)05-0860-04

## 基于谐波控制的线性高效 Doherty 功率放大器

甘德成<sup>1,2</sup>, 何松柏<sup>2</sup>

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

**摘要:** 设计并实现了一款工作在 3.5 GHz 全球微波接入互操作性(WiMAX)波段的高效率、线性 Doherty 功率放大器。通过合理控制载波功放的包络阻抗、谐波阻抗以及利用 Doherty 载波功放和峰值功放线性抵消原理, 使得 Doherty 功率放大器同时满足高的效率和线性度。仿真结果表明: 通过合理调节峰值功放的栅极偏压, 所设计的 Doherty 功放在保证三阶交调失真(IMD3)和五阶交调失真(IMD5)低于-30 dBc 时, 功率附加效率(PAE)可高达 63%。

**关键词:** Doherty 功率放大器; 谐波控制; 交调失真

**中图分类号:** TN837

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201805.0860

## Linear high-efficiency Doherty power amplifiers based on harmonic tuning approaches

GAN Decheng<sup>1,2</sup>, HE Songbai<sup>2</sup>

(1.School of Physics and Electronic Engineering, Yibin University, Yibin Sichuan 644000, China;

2.School of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu Sichuan 611731, China)

**Abstract:** A highly efficient and linear Doherty Power Amplifier(PA) which operates at 3.5 GHz World Interoperability for Microwave Access(WiMAX) band is designed. To maintain high linearity and high efficiency of the Doherty PA, a technique adjusting the baseband and harmonic impedances appropriately is applied to the carrier cell, and nonlinearity cancellation between the carrier PA and the peaking one is also utilized. The simulation results show that using the appropriate gate bias of the peaking amplifier, the proposed Doherty power amplifier can achieve the Power-Added Efficiency(PAE) as high as 63%, while the third-order Inter-Modulation Distortion(IMD3) and the fifth-order Inter-Modulation Distortion(IMD5) are less than -30 dBc.

**Keywords:** Doherty power amplifiers; harmonic-tuned; intermodulation distortion

现代和未来的无线通信系统采取复杂的调制方式, 以提高频谱的利用率和支持更大的数据传输率以及数据容量, 这导致信号的峰均比高达 6~12 dB。射频功率放大器作为发射机中最为关键的有源模块, 其性能指标直接影响整个无线通信系统的通信质量。

针对高峰均比信号, Doherty 功放在提高平均效率上发挥着优势, 主要是其电路结构简单, 性能优越<sup>[1]</sup>。然而功率放大器的线性和效率这 2 个指标一直都是不可兼顾的矛盾状态。目前所设计的 Doherty 功率放大器, 主要关注效率和带宽等指标<sup>[2-5]</sup>, 其线性主要采取数字预失真技术进行线性化处理<sup>[6]</sup>, 这样增加了整个系统的面积和成本, 并且难以调节。

根据 Doherty 工作原理, 在低功率处, Doherty 功放中仅载波功放工作, 其线性主要由载波功放决定, 在高功率处, 峰值功放打开, 此时线性由两功放同时决定。根据文献[3], 在高功率处, 可以通过合理调节 Doherty 功率放大器的载波功放和峰值功放的栅极偏压, 使得两功放单元所产生的非线性相互抵消, 实现高效率线性功放的设计。本文通过合理控制载波功放的谐波阻抗和包络阻抗, 并结合载波功放与峰值功放的非线性抵消原理, 进行线性高效率 Doherty 功率放大器的设计。仿真结果显示: 在 3.5 GHz, 输入功率从 10 dBm 开始至 24.5 dB, IMD3 和 IMD5 均低于-30 dBc。当 IMD3 临界低于-30 dBc 时, PAE 高达 63%。

收稿日期: 2016-09-26; 修回日期: 2017-08-22

基金项目: 宜宾市科局资助项目(2013GY019); 国家自然科学基金资助项目(6271036)

## 1 传统 Doherty 功放原理

图 1 为传统 Doherty 功率放大器的原理图，其基本原理为有源负载调制技术。信号经过威尔金森功放器分成 2 路，由于载波功放工作在 AB 类，峰值功放工作在 C 类，在低功率状态，峰值功放处于关闭状态，特征阻抗为  $50\ \Omega$  的补偿线 offset line2 使得峰值功放处于开路，系统  $50\ \Omega$  阻抗经阻抗变换网络转换到合成点  $25\ \Omega$ ，经过  $50\ \Omega$  的  $\lambda/4$  阻抗逆置网络转换至  $100\ \Omega$ 。offset line1 实现阻抗牵引，使得载波功放输出端呈现  $2R_{opt}$ ，提前进入饱和状态，效率提升。高功率状态下，峰值功放开启，载波功放由于峰值功放的调制作用，使得输出端阻抗逐渐由  $2R_{opt}$  变为  $R_{opt}$ ，直到两者均进入饱和状态，峰值功放输入端的相位补偿线 delay line 用来对准两支路的相位。

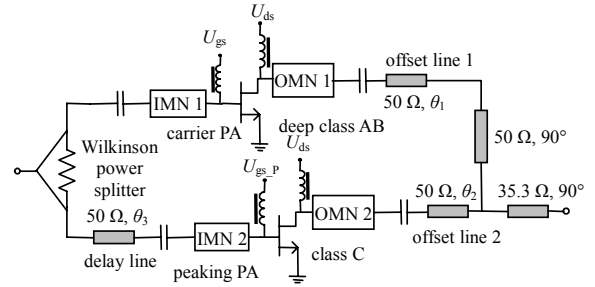


Fig.1 Schematic diagram of the Doherty power amplifier

图 1 Doherty 功率放大器原理图

## 2 线性分析及改善方案

根据 Doherty 工作原理，低输入功率时，峰值功放处于关闭状态，其线性主要由载波功放决定。为了兼顾效率和线性，载波功放偏置在深 AB 类(最大电流  $I_{max}$  的 5%~10%)，其非线性产生机理如图 2 所示，因此载波功放的三阶交调失真(IMD3)不但与基波阻抗密切相关，同时包络阻抗和二次谐波阻抗直接影响功放的线性。当载波功放基波阻抗固定不变时，其线性可通过合理调节包络阻抗和谐波阻抗(尤其是二次谐波阻抗)进行改善<sup>[7]</sup>。包络阻抗应保持接近短路状态，以减小功放的记忆效应<sup>[8]</sup>，而谐波阻抗可通过 load-pull 技术得以确定<sup>[9]</sup>。

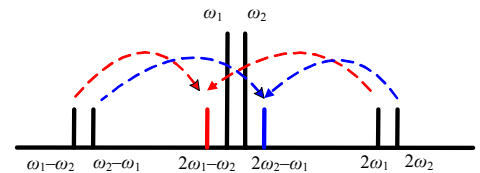


Fig.2 Mechanism of non-linear carrier amplifier

图 2 非线性产生机理

当输入功率增大，峰值功放开启，线性则由载波功放和峰值功放相互影响，同时决定。由于载波功放偏置在 AB 类，而峰值功放偏置在 C 类，根据文献[3]，可以通过合理选择栅极偏压，使得两支路所产生的非线性进行抵消，其基本理论可以通过对主功放和辅助功放的转移方程进行分析。根据文献[5]，当无记忆效应时，其转移方程可以采用 Taylor 级数形式，其载波功放和峰值功放的 IMD3 可以表示为：

$$I_{out\_C}(2\omega_2 - \omega) = \frac{3}{4} \cdot g_{m3\_C} \cdot A^3 \cdot e^{j\theta_C} \quad (1)$$

$$I_{out\_P}(2\omega_2 - \omega) = \frac{3}{4} \cdot g_{m3\_P} \cdot A^3 \cdot e^{j\theta_P} \quad (2)$$

式中： $g_{m3\_C}$  和  $g_{m3\_P}$  为三阶非线性跨导系数； $\theta_C$  和  $\theta_P$  为三阶交调失真分量的相位，取决于  $g_{m3\_C}$  和  $g_{m3\_P}$ 。根据图 3，偏置在 C 类的峰值功放  $g_{m3\_P}$  与偏置在 AB 类的载波功放  $g_{m3\_C}$  极性相反，因此选择合适的栅极偏压可以使得 Doherty 功放的主路和辅路的非线性相互抵消。

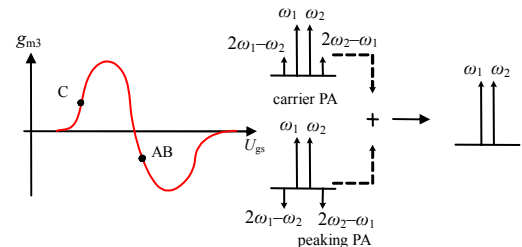


Fig.3 Nonlinear cancellation principle of the Doherty power amplifier

图 3 Doherty 功率放大器非线性抵消原理

## 3 线性高效 Doherty 功放设计

采用 CREE 公司 6 W GaN 器件 CGH40006P 进行设计。载波功放偏置在深 AB 类(42 mA, 28 V)，根据以上分析，先通过 load-pull 和 source-pull 找到最佳负载阻抗和最佳源阻抗。在双音间隔 5 MHz，中心频率 3.5 GHz 处，将包络阻抗设置为短路，3 次及 3 次以上谐波阻抗设置为开路，采用迭代的方法找到最佳基波阻抗和二次谐波阻抗。其输入输出匹配采用相同的拓扑结构，输出匹配网络如图 4 虚线所示，其中包括 TL1~TL4 和 3.6 pF 的射频到地电容，采用直接优化设计方法进行基波阻抗和二次谐波阻抗的匹配，表 1 为 load-pull 所得到的阻抗值和实际匹配所得到的阻抗值。

表 1 优化负载阻抗

Table1 Optimal load impedance

| load impedance | fundamental wave | second harmonic |
|----------------|------------------|-----------------|
| load-pull      | 9.81+j13.90      | 0.05+j3.49      |
| simulated      | 9.64+j12.97      | 0.85+j4.27      |

为了更好地进行相位对准, 峰值功放和载波功放采用相同的电路结构, 整个 Doherty 功放的电路结构如图 4 所示。为了保证功放的绝对稳定, 输入端加入了并联  $47\ \Omega$  的电阻和  $2.2\ \text{pF}$  电容的稳定电路保证高频稳定, 栅极串联  $10\ \Omega$  电阻保证低频稳定。仿真所用电容均为村田 Mutata GQM 系列。

单音仿真结果如图 5 所示, 此时峰值功放偏置在  $-5.5\ \text{V}$ , 可以看出该 Doherty 功率放大器饱和输出功率大于  $41\ \text{dBm}$  ( $12.5\ \text{W}$ ), 饱和增益优于  $10.6\ \text{dB}$ , 功率附加效率(PAE)优于  $70.5\%$ 。输出功率回退  $6\ \text{dB}$  时, PAE 高达  $61.9\%$ 。

当输入为等幅、频率间隔为  $5\ \text{MHz}$  的双音信号, 调节峰值功放的栅极偏压为  $4.2\ \text{V}$  时, IMD3 和 IMD5 随输入功率变化如图 6 所示。仿真结果显示:

输入功率从  $10\ \text{dBm}$  增至  $24.5\ \text{dBm}$ , IMD3 和 IMD5 始终保持低于  $-31.15\ \text{dBc}$ , IMD3 和 IMD5 的左右不平衡效应较小, 说明与记忆效应相关的包络阻抗处理较好。图 6 中还可以看出, 当输入功率约  $23\ \text{dB}$  时, 出现 IMD3 甜点(sweet spot), 此时 IMD3 低于  $-49\ \text{dBc}$ , 这主要由于峰值功放和载波功放的非线性抵消导致。

图 7 为输出功率、增益和 PAE 的变化曲线, 当输入功率为  $24.5\ \text{dBm}$  时, 输出功率优于  $38.1\ \text{dBm}$ , 增益大于  $13.6\ \text{dB}$ , 此时 PAE 高于  $63\%$ 。

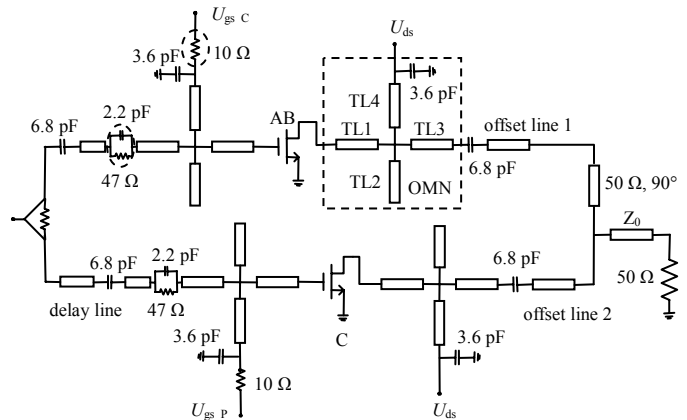


Fig.4 Topology of the linear Doherty power amplifier

图 4 线性 Doherty 功率放大器的拓扑图

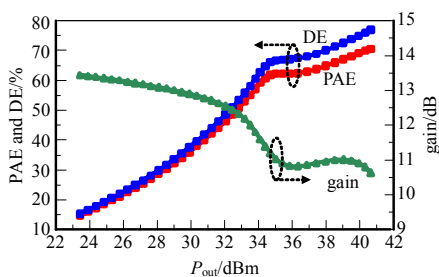


Fig.5 Single sound simulation results  
图 5 单音仿真结果

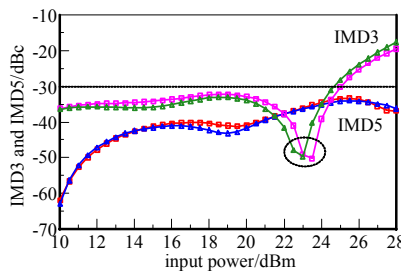


Fig.6 IMD3 and IMD5 variations versus input power  
图 6 IMD3 和 IMD5 随输入功率的变化

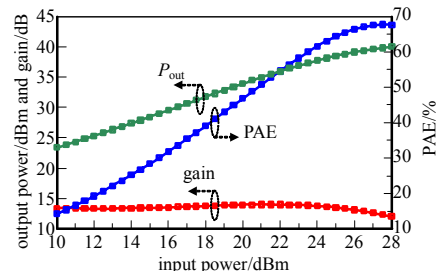


Fig.7 Out power, gain and PAE variations versus input power  
图 7 输出功率、增益和 PAE 随输入功率的变化

## 4 结论

本文通过对载波功放的包络阻抗和谐波阻抗进行合理控制, 并结合峰值功放和载波功放之间的非线性抵消, 实现高效率线性 Doherty 功率放大器的设计。所设计的工作在  $3.5\ \text{GHz}$  WiMAX 波段的 Doherty 功放输入功率从  $10\ \text{dBm}$  增至  $24.5\ \text{dBm}$  时, IMD3 和 IMD5 始终低于  $-31\ \text{dBc}$ 。当输入功率为  $24.5\ \text{dBm}$  时, PAE 优于  $63\%$ , 增益高于  $13.6\ \text{dB}$ 。

## 参考文献:

- [1] DOHERTY W H. A new high efficiency power amplifier for modulated waves[J]. Proceedings of the IRE, 1936,24(9): 1163–1182.
- [2] SUN G,JANSEN R H. Broadband Doherty power amplifier via real frequency technique[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012,60(1):99–111.
- [3] KIM B,KIM J,KIM I,et al. The Doherty power amplifier[J]. IEEE Microwave Magazine, 2006,7(5):42–50.
- [4] BATHICH K,MARKOS A Z,BOECK G. Frequency response analysis and bandwidth extension of the Doherty amplifier[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011,59(4):934–944.
- [5] RYU Namsik,JANG Seunghyun,LEE Kwang Chun ,et al. CMOS Doherty amplifier with variable balun transformer and adaptive bias control for wireless LAN application[J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2014,49(6):1356–1365.
- [6] WOOD S,PENGELLY R,CRESCENZI J. A high efficiency Doherty amplifier with digital predistortion for WiMAX[J]. High Frequency Electronics, 2008,7(12):18–28.

- [ 7 ] AKMAL M, LEES J, CARRUBBA V, et al. The effect of baseband impedance termination on the linearity of GaN HEMTs[C]// 2010 European Microwave Conference (EuMC). 2010:1046–1049.
- [ 8 ] HUANG C, HE S, YOU F, et al. Design of broadband linear and efficient power amplifier for long-term evolution applications[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013, 23(12):653–655.
- [ 9 ] SPIRITO M, PELK M J, RIJS F V, et al. Active harmonic Load–Pull for on-wafer out-of-band device linearity optimization[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(12):4225–4236.

作者简介：



甘德成(1973–), 重庆市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为微带滤波器及射频功率放大器的线性化技术. email:gdcybx@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。

## 第五届空间光通信与组网技术学术研讨会

2018 年 11 月 22 日-24 日 西安广成大酒店 <https://www.csoe.org.cn/meeting/SOC2018/>

主办单位：中国工程院信息与电子工程学部 国家自然科学基金委员会 中国光学工程学会

承办单位：中国光学工程学会 中国科学院西安光学精密机械研究所 中国宇航学会光电技术专业委员会

大会主席：吕跃广院士（中央军委科技委） 姜会林院士（长春理工大学）

大会共主席：

马晶教授（哈尔滨工业大学） 赵卫研究员（中科院西安光机所） 谢小平研究员（中科院西安光机所）

征文方向：

**专题一：**网络总体技术研究：空天地海立体网络体系架构、空天地海立体网络协议、服务质量与路由技术、立体网络测控、网络管理、安全防御技术、网络仿真系统。

**专题二：**平台总体技术研究：深空探测飞行器、高中低轨卫星平台、临近空间平台、近地空间平台、海上舰船平台、水下潜器平台。

**专题三：**信息获取技术：高分辨率成像技术、多光谱/超光谱遥感技术、合成孔径雷达技术、激光/微波雷达关键技术及应用、水下传感技术。

**专题四：**信息传输技术：空间光通信技术（包括深空、卫星、机载、地面、水下）、卫星微波/移动通信技术、地面 4G、5G 移动通信技术、地面超高速光纤通信技术、太赫兹通信技术、激光/微波测距通信一体化技术、量子通信技术、磁感应通信、水声通信。

**专题五：**信息处理技术：星载交换技术（包括激光、微波、基带）、立体网络数据处理技术。

**支持媒体：**《红外与激光工程》（EI 收录）、《光学精密工程》（EI 收录）、《SPIE 文集》（EI 收录）、《强激光与粒子束》、《太赫兹科学与电子信息学报》中文核心。

**所有稿件务必做好保密审查工作。投稿请登录：**<http://events.kjtxw.com/tougao/soc.html>，中英文兼收。

**第四轮截稿日期：**2018 年 11 月 12 日

**组委会联系方式：**索尼珂 022-58168515, [sonik@csoe.org.cn](mailto:sonik@csoe.org.cn)