

# 基于开关多模式的 Doherty 射频功率放大器设计

蔡俊祺, 卜刚

(南京航空航天大学 电子信息工程学院 集成电路学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 在工作频率为 2.4 GHz 的背景下, 基于所设计的 Doherty 功率放大器, 设计了一种改进的多模开关控制和包络跟踪调制的 Doherty 功率放大器。设计中使用的电子管是 Renesas 的 GaAs 晶体管 NE6510179A。设计的 Doherty 峰值输出(32.0 dBm)时功率附加效率达到 27.2%, 回退 6 dB 时的功率附加效率为 27.0%。在与搭建的包络跟踪模型级联改进后, 新结构对低输出功率的功率附加效率有一定程度的改善, 在中高输出功率部分的线性度有较大的改善。

**关键词:** 射频功率放大器; Doherty 结构; 功率附加效率; 线性度

中图分类号: TN92

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.222895

中文引用格式: 蔡俊祺, 卜刚. 基于开关多模式的 Doherty 射频功率放大器设计[J]. 电子技术应用, 2022, 48(7): 105-109, 113.

英文引用格式: Cai Junqi, Bu Gang. Design of a switch-controlled multi-mode Doherty power amplifier[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(7): 105-109, 113.

## Design of a switch-controlled multi-mode Doherty power amplifier

Cai Junqi, Bu Gang

(College of Integrated Circuits, College of Electronic and Information Engineering,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** In the background of the operating frequency of 2.4 GHz, based on the designed Doherty power amplifier, an improved Doherty power amplifier with multi-mode switch control and envelope tracking modulation is designed. The tube used in this design is a GaAs transistor NE6510179A from Renesas. The power added efficiency of the designed Doherty peak output(32.0 dBm) reaches 27.2%, and the power added efficiency of the back-off 6 dB is 27.0%. After being improved in cascade with the built envelope tracking model, the new structure can improve the power added efficiency of low output power to a certain extent, and the linearity in the middle and high output power part has been greatly improved.

**Key words:** RF power amplifier; Doherty structure; power added efficiency; linearity

## 0 引言

射频功率放大器(RF Power Amplifier, RFPA)作为最重要的射频前端部分<sup>[1-3]</sup>在发射机的前级电路中, 经过放大级的放大作用后, 小功率的输出信号才可以由天线辐射, 这时就体现出了 RFPA 的重要性。

在现代无线通信系统中, 信号的逐渐复杂和调制方式的多样化导致了射频信号的峰值平均功率比(PAPR)不断增加。如何对射频系统部分的效率和线性度进行提升, 国内外学者纷纷展开研究和讨论, 目前 Doherty 结构是一种根据输出功率动态调整负载阻抗而提高功放效率的结构, 被许多基站放大器所使用。而包络跟踪技术也被应用到此结构的供电端用来提高其整体效率。

本文选择了 Renesas 公司的 GaAs 材料功率晶体管 NE6510179A。其是一款可以工作在 L&S 波段, 输出功率为 1 W 的 GaAs HJ-FET 中等功率器件变换器, 应用于

通信和无线局域网络系统的射频前端。它能够以高线性在 3.5 V 输入电压工作的前提下提供 1.8 W 的输出功率, TYP 输出功率为 35 dBm; 在 5 V 输入电压工作的前提下可以提供 3 W 的输出功率, 有 31.5 dBm 的 TYP 输出功率, 并且增益和效率都较出色, 工作频率最高可以达到 3.7 GHz, 在 1.9 GHz 频率下有极高的线性增益(10 dB), 在本设计工作频率附近也有 7~8 dB 的增益。该管可以实现高效率、高带宽的高性能 Doherty 射频功率放大器设计。

在设计上, 本文先基于射频仿真软件 ADS(Advanced Design System)搭建晶体管大信号模型后, 设计出一个常用的带有三段补偿线的 Doherty 功率放大器, 之后再加入包络跟踪部分与其进行级联, 最终得到一个基于开关多模式的射频 Doherty 功率放大器, 并且在不同输出功率部分针对线性度和功率附加效率两方面均有不同程度的改进。

## 1 Doherty 射频功率放大器设计目标及过程

传统 Doherty 放大器拓扑结构如图 1 所示。其中一路放大器称为主放大器(Main Power Amplifier, MPA), 另一路称为峰值放大器(Peak Power Amplifier, PPA)。在输出端有连接的  $50\Omega$  的四分之一波长传输线进行负载阻抗调制, 从而使整个射频功放工作在最佳区域, 输入信号的相位补偿由 PPA 前的传输线提供, 在 MPA 和 PPA 结合点的输出端到  $50\Omega$  负载之间的传输线同样是对阻抗进行变换。

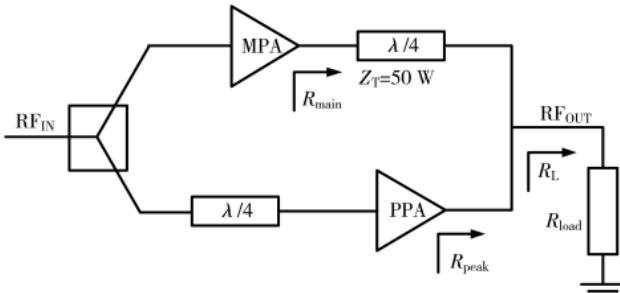


图 1 传统 Doherty 放大器拓扑结构

MPA 一般工作在线性区, 从而有良好的线性度, 而 PPA 通常工作在 C 类(开关模式), 低功率输入状态下, MPA 工作, PPA 截止; 随着输入功率的增加, 输出功率增加到 6 dB 功率回退点, MPA 饱和, PPA 工作并对 MPA 的输出负载阻抗进行调制; 整个射频功率放大器达到工作饱和状态时, 二者输出电流相等, 输出功率相等, 各占总功率的一半。值得注意的是, 在达到功率回退点之前 MPA 的效率就达到最大值, 一直到整个功放工作饱和<sup>[4-6]</sup>。

### 1.1 设计流程

本文采用 ADS 仿真软件展开设计。主要有以下几个步骤:

(1) 根据要求和晶体管数据手册, 搭建晶体管非线性模型, 确定晶体管的静态工作点。

(2) 设计功放原理电路, 进行稳定性设计、负载牵引、输入输出阻抗匹配等。

(3) 对单管功率放大器进行仿真, 查看单管的增益等参数。

(4) 对设计的功率分配器、MPA 和 PPA 进行仿真, 分别查看各自效果。

(5) 对整体合路进行谐波平衡仿真, 观察结果是否达到指标要求及电路优化调整。

### 1.2 工作点选择

通过参考 NE6510179A 的 Datasheet 可以确定该功率晶体管的静态工作点, 但是在晶体管官网上只有该器件参数的小信号模型(S-parameter), 无法进行非线性仿真。本文在找到的 NE6510179A 晶体管非线性模型参数<sup>[7]</sup>(部分参数如表 1 所示)的前提下, 基于该器件非线性模型进行设计和制作, 满足射频功率放大器大信号设计的要

求, 并且对设计好的非线性模型进行直流仿真, 可以看到在漏极电压为 4.6 V 左右下, 通过直流 DC 扫描, 得到功率管的  $V_{DS}$ 、 $I_{DS}$  和栅极电压  $V_{GS}$  的关系如图 2 所示。

在进行设计微调后, 本设计选择  $V_{GS}$  为 -0.62 V、 $V_{DS}$  为 3.0 V 的点作为本文功放设计的静态工作点作为静态工作点, 也可以根据所需要电流范围在  $V_{GS}$  为 -0.65 V~ -0.55 V 之间综合考虑后选择。

表 1 晶体管部分非线性参数

参数	取值大小
GAMMA	0
GAMMADC	0.01
Q	1.7
VBI	0.6

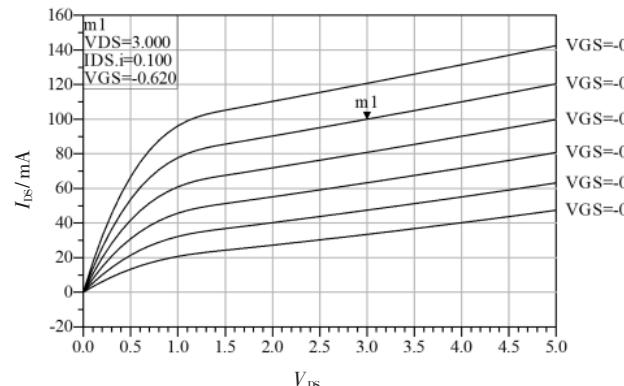


图 2 直流扫描

### 1.3 单管设计与仿真

本设计采用了在栅极支路上增加了 RC 稳定网络的方法来提升电路稳定性, 此做法使用的电阻值较小, 可以减小功率在电阻上的消耗, 也可以有效防止晶体管增益过高和有效稳定带内的稳定系数。最终确定的电容 C 大小为 10 pF, 电阻大小为 10 Ω。

在射频功率放大器的设计中, 通常需要考虑到效率和线性度的仿真, 但是由于首先确保功放可以输出的最大功率尽可能满足要求<sup>[8-10]</sup>, 因此本设计在进行负载牵引的结果考虑时, 选择的最佳负载阻抗点为最大输出功率点。此外, 负载牵引需要在负载匹配和源阻抗匹配下两个结果下进行反复代入比较, 终选择确定后其结果为在输出阻抗为  $2.4-j \cdot 9.29\Omega$  情况下, PAE 为 33.91%,  $P_{out}$  为 30.02 dBm, 可以看出在增益和效率有了一个比较明显的折中过程; 而得到的功率晶体管的源阻抗为  $2.26-j \cdot 3.0\Omega$ , 源阻抗处得到的 PAE 也有 33.15%, 并且  $P_{out}$  为 30.02 dBm。

随后将匹配电路、偏置电路等设计模块综合, 得到如图 3 所示的单管功率放大器仿真电路。

在 ADS 中对设计出的单管功放进行谐波仿真设置放大器单管的输入输出功率关系和效率值大小, 单管功放的输出功率输入功率关系、效率大小以及增益随输入功率的变化关系如图 4~图 6 所示。

辅助功放的结构与单管主功放的结构类似, 不同之

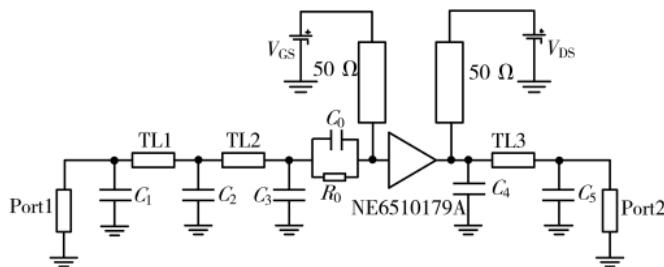


图 3 单管仿真原理图

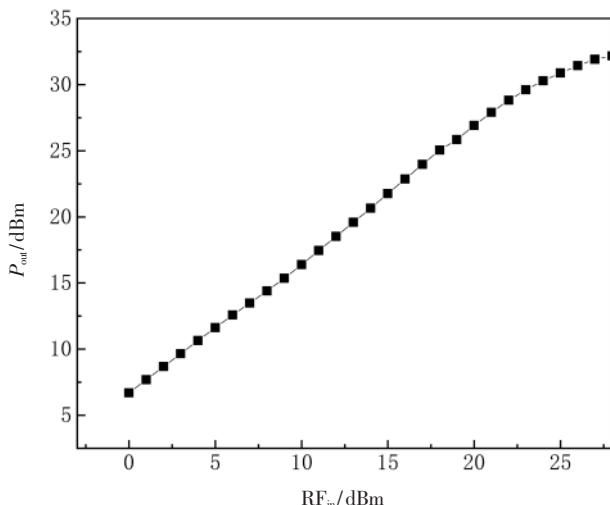


图 4 单管输入输出功率曲线

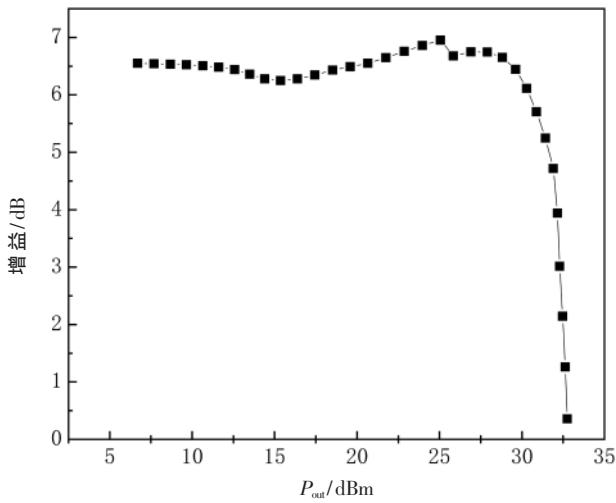


图 5 单管增益曲线

处在于对于辅助功放栅极电压的设置,为了使辅助功放工作在C类并使辅助功放的开启点合适,本设计将辅助功放的工作点设置为-1.5 V。

根据传输线理论和阻抗变换原理,在辅助功放开启前,辅助功放部分对于合路处的阻抗状态应为高阻,所以在设计辅助功放时在其后加入了一段补偿线用来改变其阻抗状态,但又因为在最终合路仿真时,要确保两路信号的相位相同,所以需要在主功放后面加入一段相同长度的补偿线<sup>[11]</sup>。

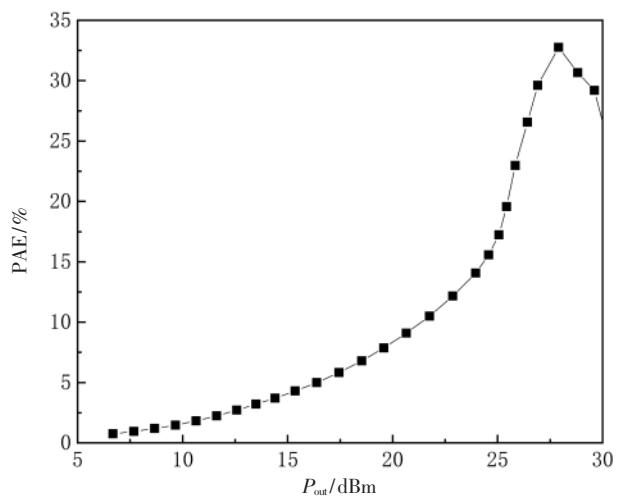


图 6 单管功率附加效率曲线

为了调试的方便,本设计在主功放和辅助功放的前端也分别加入了一段补偿线,连同单独设计的功率分配器和单管主功放、辅助功放<sup>[12-13]</sup>。

调试后得到如图7~图9的Doherty功率放大器合路

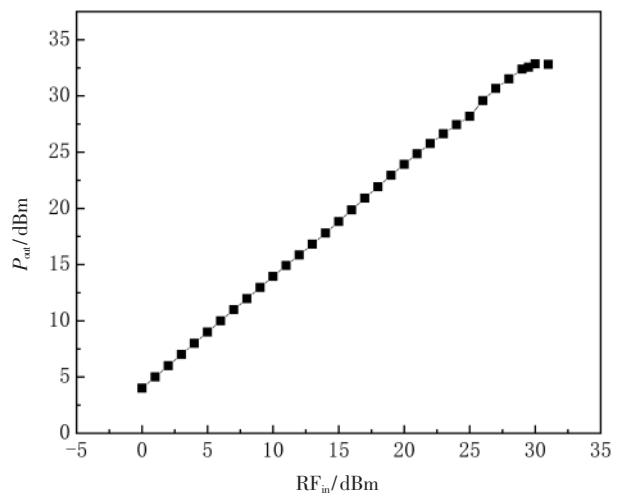


图 7 Doherty 功率放大器输入输出功率关系

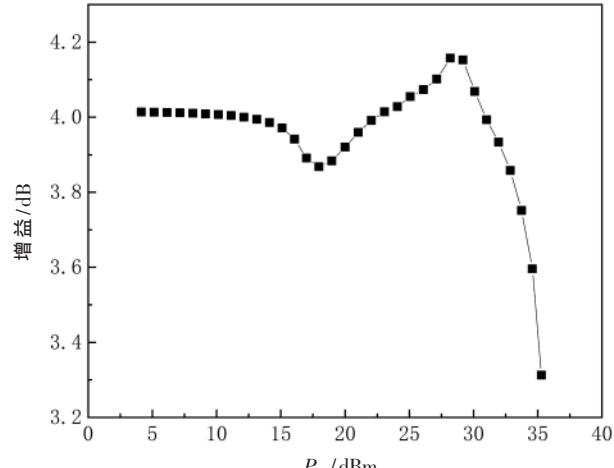


图 8 输出功率和增益的关系

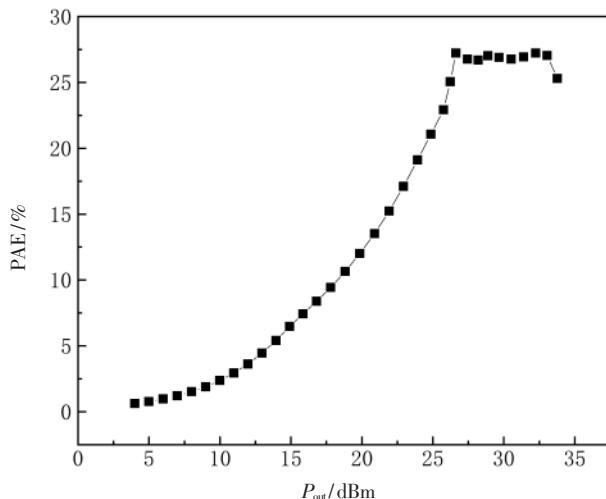


图 9 Doherty 功率放大器功率附加效率曲线

仿真结果。

由图 8~图 9 可知,饱和输出功率可以达到接近 32.0 dBm,饱和输出功率下的功率附加效率为 27.2%,回退 6 dB 时的功率附加效率为 27.0%。

## 2 开关多模式包络跟踪放大器设计

本文设计的开关控制的多模式包络跟踪技术的实质是按照输入功率大小对输入包络进行三段的分段比较,当输入功率达到一定大小的时候控制理想开关的通断,由此带来对功率放大器栅极电压的调整。在低输入功率的情况下,MPA 开启工作,PPA 不工作,此时的工作模式相当于传统 Doherty 结构的第一阶段;在中等大小输入功率的情况下,PPA 开启工作,但此时设计的 PPA 和 MPA 结构上完全一致,在此基础上的负载调制技术可以看成两个 AB 类工作的 MPA 部分输出阻抗部分并联,起到阻抗变化的作用;在高输入功率的情况下,相当于 Doherty 结构的第三阶段,两放大器(此时 PPA 的栅极电压改变,使得 PPA 进入 C 类工作模式)都进入各自的工作阶段。本文设计的漏极电压偏置可以看成是一种分段式的自偏置结构,在各自功率范围内,留出足够的余量用来满足线性度和防止失真,基于包络跟踪技术提出一些改进,即对完全精准的包络跟踪进行取舍,采用三阶段分段比较进行自偏置的结构,从设计成本和电路复杂度的角度入手,尽可能提升系统的效率。但是对于包络跟踪功率放大器设计来说,效率的提升必然带来功率放大器的线性度和增益的牺牲,所以在设计时要注意做好三者的调整,在本设计中的三阶段工作模式中采用理想开关控制相应漏极电压的保持即可。

在本文的设计结构中,功放有 3 种工作模式,在输出功率较低的第一工作阶段模式,采用额外搭建的 ADS 下的包络模型对本文设计的 Doherty 功率放大器的漏极电源进行级联调整。图 10 为引入的包络跟踪模型。

在低输出功率阶段(小于 20 dBm),引入包络模型的

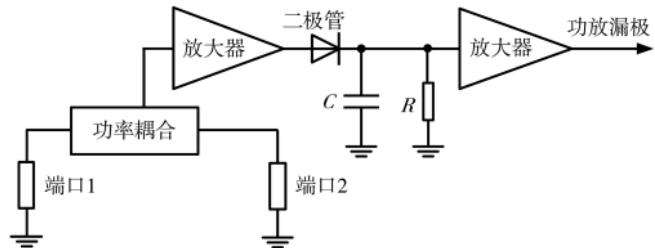


图 10 引入的包络跟踪部分模型

Doherty 功率放大器功率附加效率和普通 Doherty 功率放大器功率附加效率的对比结果如图 11 所示, pae\_doherty 和 pae\_multidoherty 分别表示传统和改进型两种结构,可以看到功率附加效率有了一定的改善。

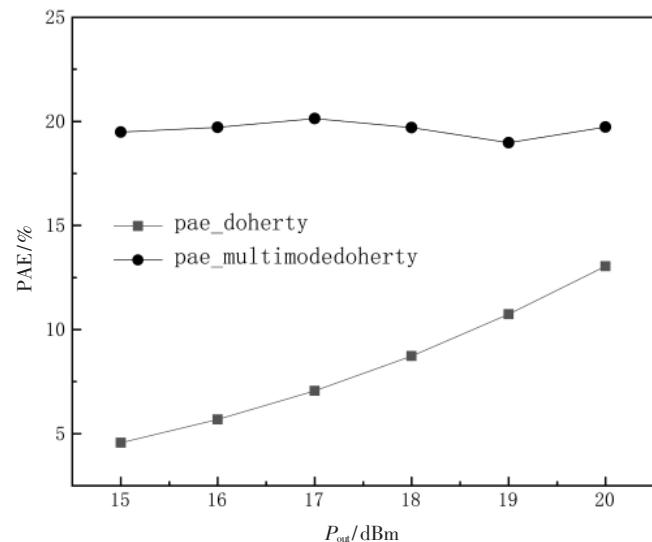


图 11 低输出功率阶段两种结构对比

第二阶段工作模式的电路原理图中两个功放电路的结构完全一样,通过对主功放和辅助功放工作电压的改变,使得其工作模式发生改变,等效于两个 Class AB 类功放的并联,相较于传统 Doherty 功放,可以看出其功率附加效率有所下降,如图 12 所示。

但因为其工作模式均在线性区,所以在线性度方面的特性要优于传统 Doherty 结构很多,本设计所比较的指标是三阶互调失真(Third-Order Intermodulation distortion, IMD3),两种结构的三阶互调失真大小分别如图 13、图 14 所示。

经过上述计算,并联型结构的三阶互调失真为 18.341 dBc,传统 Doherty 结构的三阶互调失真是 16.075 dBc,较之传统结构,新结构在线性度上提高了 2.266 dBc。

相比之下可以得出的结论是,开关控制多模式包络跟踪 Doherty 功率放大器相较于传统 Doherty 模式功率放大器,在中高输出功率的情况下牺牲了一点 PAE 换取了系统线性度有了明显的提高,并且相较传统 Doherty 模式功率放大器在低输入功率下的 PAE 有了提升且更

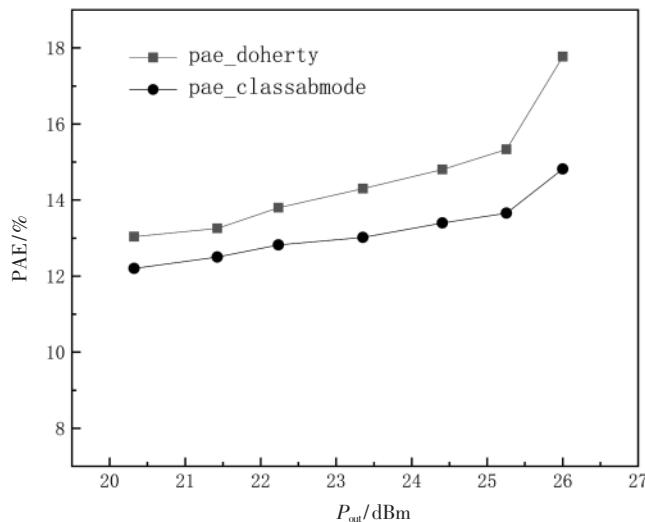


图 12 两种工作模式功率附加效率对比

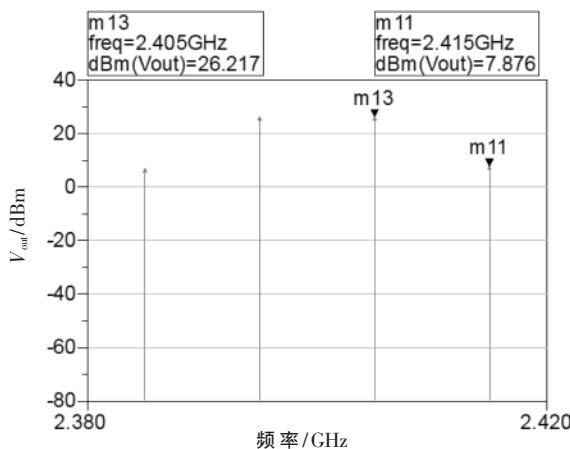


图 13 双音输入下输出频谱(并联结构)

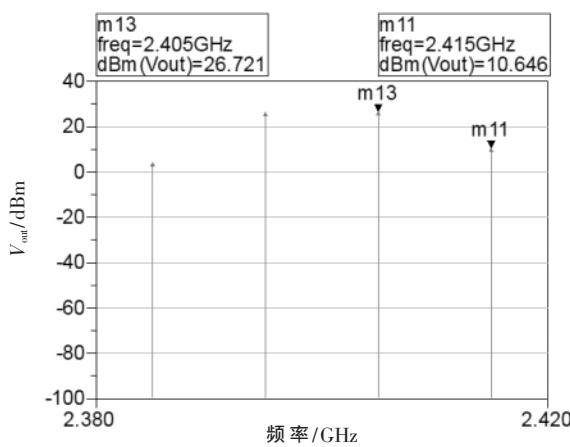


图 14 双音输入下输出频谱(传统 Doherty)

加稳定。

图 15 为将 layout 导入 Altium Design 中制作的 PCB 板级模型, 其尺寸为 158.00 mm×89.00 mm。

### 3 结论

本文先对传统 Doherty 功率放大器进行了设计, 满

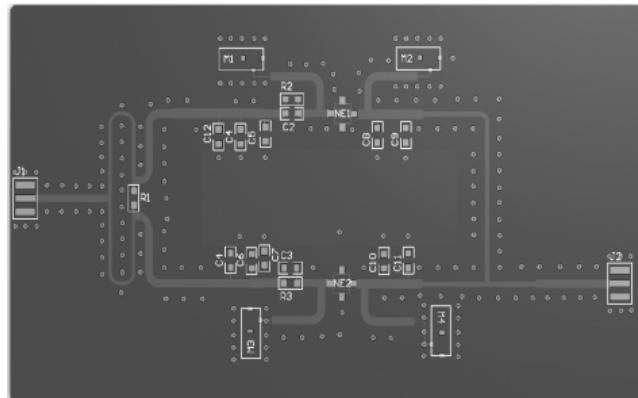


图 15 PCB 结果

足最开始的设计要求。后在此基础上提出了开关多模式的 Doherty 功率放大器设计思路, 并在引入包络跟踪模型与其级联后进行了仿真并与原传统结构的比较, 得出:

- (1)在包络跟踪模型的引入下, 低输出功率部分功率附加效率明显高于传统 Doherty 结构;
- (2)新型结构在中高输出功率工作模式下, 通过牺牲小部分功率附加效率, 换来了线性度较大的提高。

### 参考文献

- [1] 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, 2012: 153–179.
- [2] WOO Y Y, YANG Y, KIM B. Analysis and experiments for high-efficiency class-F and inverse class-F power amplifiers [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2006, 54(5): 1969–1974.
- [3] 尹昊. 应用于 3G 手机射频功率放大器的混合型电源控制 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [4] 黄发良. 高效率射频功率放大器设计方法的研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2020.
- [5] 赵弘毅, 张丹, 封维忠, 等. 一种应用于 2.2GHz 的射频功率放大器设计 [J]. 计算技术与自动化, 2021, 40(3): 57–61.
- [6] Yu Qijin, Yu Cuiping, Tang Bihua, et al. A new modified broadband asymmetric Doherty power amplifier [C]//2016 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), 2016: 310–312.
- [7] Renesas Electronics Corporation. NE6510179A datasheet [EB/OL]. (2010-04-xx)[2022-04-20]. <https://www.renesas.com>.
- [8] 武杰. Doherty 射频功率放大器的研究与设计 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- [9] 王磊. 射频功率放大器的设计研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- [10] 李光润. 射频高效率功率放大器的研究与设计 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
- [11] 刘帅. 基于宽带包络跟踪技术的 Doherty 射频功率放大器研究与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [12] XIONG D, LIU C, HUANG L, et al. A 3.3–3.7 GHz broad-

(下转第 113 页)



(a) 新型滤波器的仿真模型



(b) 传统滤波器的仿真模型

图 7 滤波器的仿真模型

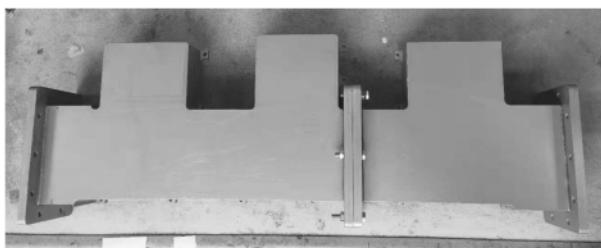


图 8 新型波导 CT 型滤波器实物图

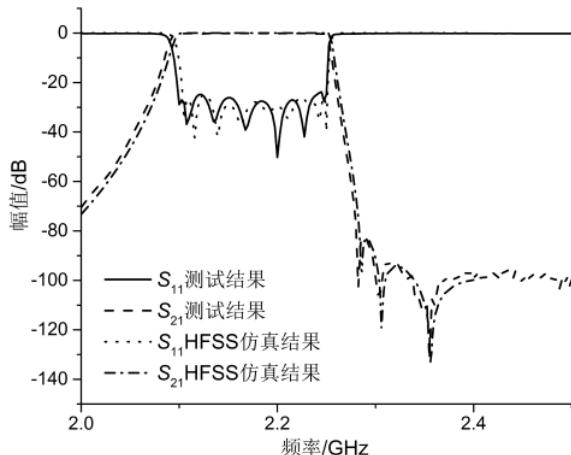


图 9 新型滤波器的仿真与实测结果

离度大于 80 dB 的指标要求。由图 9 可知, 该双工器在通带内损耗小于 0.3 dB。忽略测试仪器噪底误差及转接头影响, 滤波器驻波与隔离的仿真和实测结果吻合良好。

与传统滤波器相比, 本文所设计的新型波导双工器不仅尺寸小, 且该滤波器采用模式匹配法分析, 设计周期极短, 加工实物无需调配, 可广泛应用于工程。

(上接第 109 页)

- band Doherty power amplifier[C]//2021 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), 2021.
- [13] ESTEBSARI M, NASRI A, PIACIBELLO A, et al. 3.1–3.6 GHz 22 W GaN Doherty power amplifier[C]//2020 23rd International Microwave and Radar Conference (MIKON), 2020;

### 3 结论

本文在传统波导滤波器的基础上, 通过在非相邻谐振腔间引入新型的波导 CT 型感性交叉耦合结构, 在满足通带内驻波良好、插入损耗低的前提下, 使其在阻带产生有限的传输零点, 进一步提高了滤波器的带外抑制特性, 减小了滤波器的损耗, 缩小了滤波器的尺寸。同时, 根据其结构的不连续性, 采用模式匹配法进行优化分析, 缩短了传统设计需大量仿真所耗的时间, 设计周期短, 性能极佳, 具有很大的工程价值。

### 参考文献

- 王惠生, 李磊, 冯文文. H 面波导双工器的工程设计[J]. 电子技术, 2015(5): 79–81.
- 余剑钊, 蔡辉, 陆敏婷, 等. 一种可靠的波导滤波器分析设计方法[J]. 信息通信, 2017(12): 19–21.
- 李玉娇, 王锡良. 交叉耦合在直线型波导滤波器中的研究[J]. 电子元件与材料, 2012, 31(11): 49–51.
- 邓向科, 何松柏. Ku 波段交叉耦合波导滤波器的精确设计[J]. 现代电子技术, 2010, 33(5): 15–18.
- 侯飞, 钟丽, 张先荣. 电容加载波导双工器[J]. 信息与电脑(理论版), 2009(8): 123–124.
- 朱翔. H 面叠层结构波导小型化滤波器研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- 甘本祓, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与设计[M]. 北京: 科学出版社, 1973.
- GENTILI G G. Properties of TE-TM mode-matching techniques[J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 1991, 39(9): 1669–1673.
- UHER J. 天馈系统中波导元件: 理论与计算机辅助设计[M]. 杨乃恒, 译. 西安: 电子部十四研究所国防科技天线与微波重点实验室, 1995.
- 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.

(收稿日期: 2022-01-15)

### 作者简介:

张宇(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 天线与微波技术。

渠芳芳(1992-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 天线与微波技术。



扫码下载电子文档

424–426.

(收稿日期: 2022-04-20)

### 作者简介:

蔡俊祺(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 模拟/射频 IC 设计。

卜刚(1969-), 通信作者, 男, 博士后, 教授, 主要研究方向: 集成电路设计, E-mail: bugang@nuaa.edu.cn。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所