

对合成电路优化的 126 W Doherty 功率放大器

侯富诚, 宋贺伦, 曾大杰, 顾滕锋, 张耀辉

(中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215103)

摘要: 基于自主研发的 RF LDMOS 功率晶体管以及散热法兰, 设计了一款用于无线通讯以及 L 波段和 S 波段雷达系统的大功率高效率的功率放大器。在保证器件的射频接地以及散热的前提下, 在封装内部设计了输入内匹配和输出内匹配电路, 提高了管芯的阻抗点以便于电路板匹配。利用 Doherty 功率放大器结构可以提高功率回退处效率的特点, 结合输出内匹配对负载阻抗点的翻转作用, 得到了一种结构优化的 Doherty 实现方案, 在峰值功率处达到 398 W 的输出功率, 52% 的漏极效率; 以及功率 8 dB 回退的平均功率处 126 W 的输出功率, 43% 的漏极效率。这种改进技术进一步提高了功率回退处的效率, 相对普通 Doherty 功率放大器结构, 性能提升了 16%, 改善了无线通信系统的射频性能。

关键词: RF LDMOS; 内匹配电路; L 和 S 波段雷达; Doherty 功率放大器

中图分类号: TN402 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0420001

Optimized combining circuit for 126 W Doherty power amplifier

Hou Fucheng, Song Helun, Zeng Dajie, Gu Tengfeng, Zhang Yaohui

(Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215103, China)

Abstract: Based on the RF LDMOS transistor and flange from the independent research, a power amplifier was developed for wireless communication as well as L band and S band radar system with high power and efficiency. On the basis of electric grounding and heat sinking, the input and output internal matching circuits were designed to increase the impedance of the transistor. Using the characteristics of the Doherty power amplifier for the backed off efficiency enhancement and internal matching for the inversion of impedance, a power amplifier with the performance of 398 W, 52% at peaking point and 126 W, 43% at 8 dB backed-off power average point was achieved. The optimized technique enhances the backoff efficiency of Doherty power amplifier, 16% relative increase to common structure, and improves the radio frequency performance of the wireless communication system further.

Key words: RF LDMOS; internal matching circuit; L&S band radar; Doherty power amplifier

收稿日期: 2015-08-24; 修订日期: 2015-09-27

基金项目: 国家科技重大专项(2014ZX03003009); 国家自然科学基金(51377159); 中国科学院先导专项(XDA06010705); 江苏省科技计划项目(BK2011362); 苏州市科技计划项目(SYG201335)

作者简介: 侯富诚(1983-), 男, 博士生, 主要从事高性能功率放大器与功率晶体管匹配的研究工作。Email: fchou2013@sinano.ac.cn

导师简介: 张耀辉(1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事功率器件的研究工作。Email: yhzhang2006@sinano.ac.cn

0 引言

射频横向双扩散金属氧化物晶体管(Radio Frequency Laterally Double Diffusion Metal Oxide Transistor, RF LDMOS), 由于在功率和线性度方面优异的性能, 以及工艺上的稳定性等优势, 而在无线通信、工业科研医疗电子、广播电视以及 L 波段和 S 波段雷达发射机领域得到了广泛的应用。射频功率晶体管作为大功率放大组件的基本单元, 在一台大型雷达发射机上的应用可能会需要到几千甚至上万个功放组件, 这对功率放大器的射频性能, 尤其是线性度以及效率都提出了更高的要求^[1]。

目前针对这种通讯需求的功率放大器结构包括 LINC 发射机技术、包络消除和恢复技术、包络追踪技术和 Doherty 技术。LINC 发射机技术和包络消除和恢复技术对信号处理的要求较高, 都需要复杂的外围电路辅助实现; 包络跟踪技术受开关电源频率的限制, 所能处理的信号带宽较窄, 一般都在几兆以下; Doherty 技术由于其简单的电路结构, 最重要的是不需要额外的有源器件而被广泛运用。

目前全世界绝大部分应用中驱动级和输出级的功率放大器大多是采用 RF LDMOS 功率晶体管的, RF LDMOS 功率晶体管从工艺成熟度及性价比上都远远超过 GaN, 因此被广泛使用。但是该市场几乎全部由 Freescale 和 NXP 两家公司所垄断, 而军用雷达相关的产品又是对国内禁运的, 目前国内研发雷达应用的功率晶体管还局限在 1 GHz 以下的低频小功率, 缺少 L 波段和 S 波段的功率等级百瓦的大功率晶体管产品。为全面打破国外对功率晶体管的垄断地位, 提升国内通信和雷达系统的核心竞争力, 该文基于自主研发的性能优异的功率晶体管而设计的射频功率放大器, 其大功率、高线性度以及高效率的特点完全满足现在通信和雷达发射系统的要求。

1 高效率 Doherty 功率放大器

Doherty 功率放大器由 W. H. Doherty 于 1936 年首次发布^[2]。起初这种结构主要针对短波广播电台的千瓦级别功率电子管放大器应用, 其对功率回退点效率的提高非常适用于现代无线通信与雷达发射系统中对调制信号高线性度的要求^[3-4]。Doherty 结构

中一个最大的特点是使用了“有源阻抗调制”技术。普通工作在深度 ClassAB 或 ClassB 模式的功率放大器, 在输入功率回退时漏极效率会显著地下降, 有源阻抗调制可以根据输入功率的回退幅度按比例调节负载阻抗, 从而提高效率。

典型的 Doherty 功率放大器结构如图 1 所示, 上方的三角代表着的功率放大器称之为载波放大器, 下方的三角代表着的功率放大器称之为峰值放大器, 两个放大器的输出功率通过功率合成电路传递到系统负载上。经典的对称 Doherty 理论是假设输入功率从最大功率点回退 6 dB 的时候, 偏置在 ClassC 模式的峰值放大器关断, 而 Doherty 结构可以借助峰值放大器的关断与阻抗反相器的作用提高载波放大器负载阻抗。通过适当的阻抗变化调整, 可以使载波放大器在功率回退 6 dB 这段区域几乎一直维持着最高的效率。

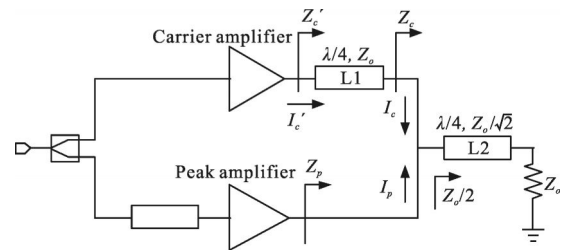


图 1 Doherty 功率放大器结构图

Fig.1 Diagram of Doherty power amplifier

通过阻抗调制技术在载波放大器和峰值放大器的输出端口得到的电流和电压随输入驱动 V_{in}/V_{max} 变化的波形如图 2 所示。载波放大器工作在 ClassB 模式, 在驱动电压摆幅超过阈值电压时使得晶体管导通才有输出电流; 而峰值放大器在输入功率 6 dB 回退时关断, 那么其导通角小于 π , 工作模式为 ClassC。虽然两个放大器工作模式不同, 但是在输入电压达到最大值 V_{max} 时, 会输出同样的最大基频电流 $I_{max}/2$ 。而载波放大器的输出电压可以在 6 dB 回退区域内保持最大的摆幅, 也保证了其最大效率的输出^[5]。

如图 3 所示, 就 Doherty 功率放大器总的效率来说, 由于回退区域的峰值放大器没有工作在饱和状态, 所以其拉低了 Doherty 功率放大器整体的效率。然而由于该区域内峰值放大器的输出功率都要比载波放大器小; 尤其是峰值放大器刚开启阶段效率极低, 但是其输出的射频功率以及消耗的直流功率都

要远小于载波放大器，所以对整体效率的影响其实并没有想象的那么严重^[6]。

$BV_{DSS}-V_{dc}$ 两者较小的值来决定。这说明在功率回退时，电压摆幅会有一部分摆动到晶体管的线性区域从而变大。这意味着随着功率的减小，晶体管可以得到越来越高的效率。

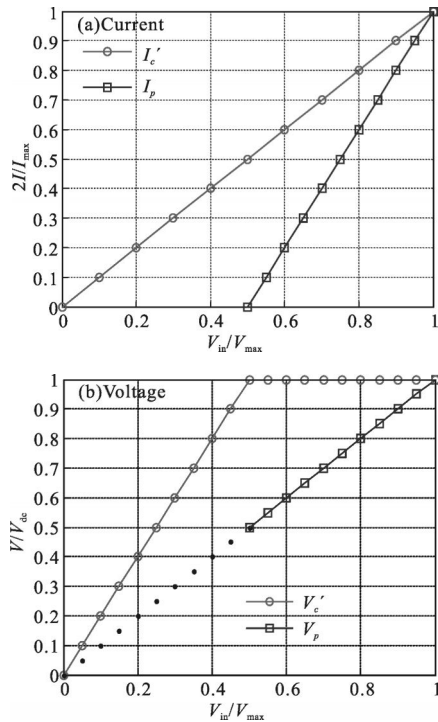


图 2 载波放大器和峰值放大器的电流电压变化
Fig.2 Current and voltage variation of carrier amplifier and peaking amplifier

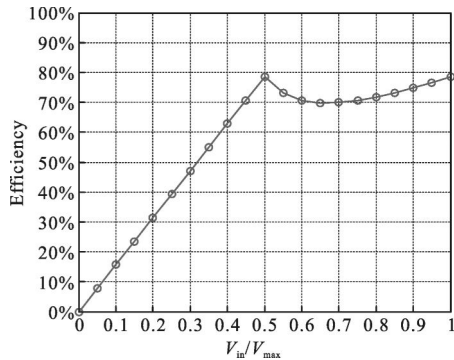


图 3 Doherty 功率放大器的效率变化
Fig.3 Efficiency variation of Doherty amplifier

2 Doherty 结构的缺陷以及改进

将 Doherty 结构应用在 RF LDMOS 功率晶体管时，由于其管芯结构比电子管更为复杂，所以在匹配方式以及性能上都与经典 Doherty 结构的分析有所差别。RF LDMOS 功率晶体管的输出特性如图 4 所示。由于管芯开启电压 V_k 的值与 V_{dc} 可比，按照负载线匹配时负载能够得到的电压最大摆幅由 $V_{dc}-V_k$ 与

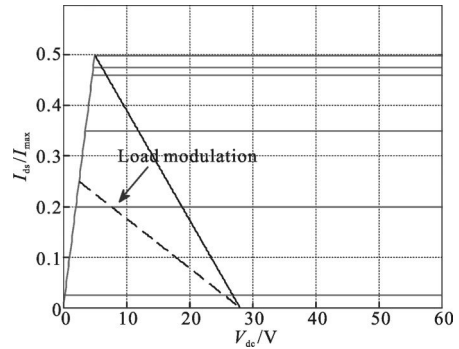


图 4 RF LDMOS 晶体管的输出特性
Fig.4 Output characteristic of RF LDMOS transistor

而另一方面 RF LDMOS 功率晶体管输出端并非为一个理想的电流源，其有限的输出电阻影响着负载实际可获得的功率比例。在理想的电流源假设中，其输出电阻是无穷大，这样电流源输出的电流会全部流向负载。然而对于 RF LDMOS 功率晶体管等效的电流源来说，输出电阻是个有限值，其与 R_{opt} 的比值可以用来分析功率晶体管的实际工作情况。在负载通过调制变大的同时，由于其与输出电阻并联，从而分得的电流会越来越小，这会导致负载所得到的功率比例变小从而使效率恶化。

综合以上分析，RF LDMOS 功率晶体管的负载调制系数与获得的效率关系如图 5 所示，该图假设 $V_{dc}=28\text{ V}$ 以及 $V_k=5\text{ V}$ ，可以看到输出最大功率时，由于 V_k 较大，其负载效率只有 64%左右。随着功率回退以及负载的调制，负载所能得到的最大效率有一个先升高后减小的趋势。不同功率回退下都会对应

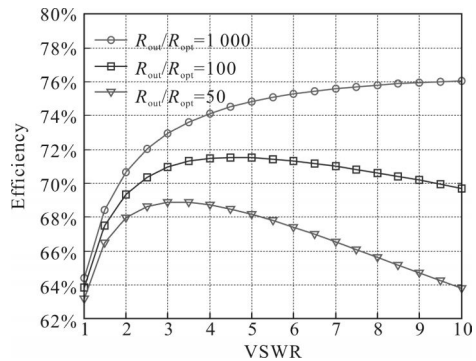


图 5 效率相对于负载调制
Fig.5 Efficiency versus load modulation

着一个特定负载以达到最大效率，这个负载以及最大功率负载在晶体管输出端口分别表现为 Z_{eff} 和 Z_{opt} 。而针对 RF LDMOS 功率晶体管的 Doherty 功率放大器设计是在最大功率点将负载调制到 Z_{opt} 以及在平均功率点将负载调制到 Z_{eff} 上去。

由于 RF LDMOS 功率晶体管的输出特性以及匹配电路损耗的影响,对称 Doherty 功率放大器负载端所能提供的负载调制幅度通常无法满足 Z_{opt} 和 Z_{eff} 对负载调制系数的变化要求,导致普通 Doherty 功率放大器功率回退时的效率相对于 ClassAB 模式的功率放大器的效率提升非常有限。文中匹配方案的优化如图 6 所示。普通 Doherty 功率放大器如图中虚线优先将最大功率点匹配到系统特征阻抗 Z_0 处,则最大效率点只能如点划线在功率回退时匹配到离负载 $2Z_0$ 较远的位置,所以无法有效地提高功率回退处的效率;而改进的匹配方案在优化掉阻抗反向器的情况下如圆点线优先将最大效率点匹配到负载 $0.5Z_0$ 处,则最大功率点按照负载调制系数会如粗实线在峰值功率处落在负载 Z_0 附近。这种匹配方案以牺牲峰值功率为代价保证了信号平均功率处的整体效率,这对于现代通信系统来说显然是一种更有效的设计结构。

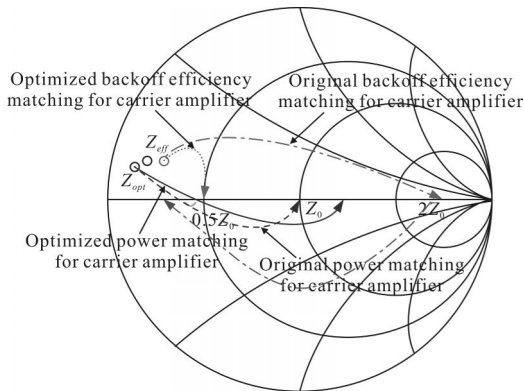


图 6 改进的 Doherty 匹配方案

Fig.6 Optimized matching plan of Doherty

另一个电路优化在于输出内匹配 L-shunt 结构增加了对匹配电路输出反射系数角度的调控,利用其与电路板输出匹配电路共同实现了原始 Doherty 结构中四分之一波长传输线 $L1$ 所起到的阻抗翻转的作用。如图 7 所示,在内匹配与外匹配网络的输出反射系数角度之和 $\angle \Gamma_{out}$ 达到的时候,其作用就可以代替四分之一波长传输线实现阻抗翻转^[7]。改进的 Doherty

结构通过这种方法舍去了其他 Doherty 中普遍存在的四分之一波长传输线,对结构的简化以及工作带宽的拓展都有着明显的作用。

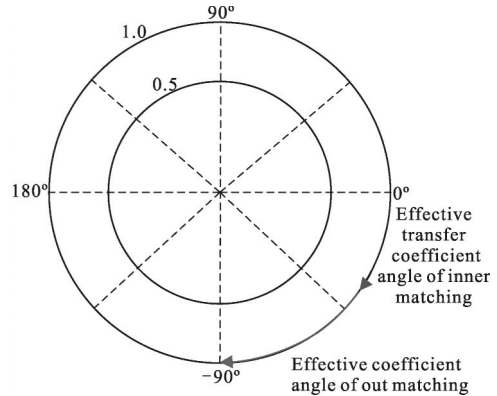


图 7 由匹配电路实现阻抗翻转

Fig.7 Impedance inversion from matching circuit

3 Doherty 功率放大器的实现与实验结果

最终的 Doherty 功率放大器为了满足输出功率等级如图 8 采用 2+2 的对称管芯配置,其中功率管芯采用自主研发的 RF LDMOS 芯片,该管芯通过优化场板的长度以及栅氧结构提高了管芯的鲁棒性,通过优化漂移区的离子注入将饱和功率密度提高到了 1.2 W/mm^2 ,饱和效率提高到了 65%。功率管芯以及内匹配电容焊接在散热法兰以微组装形式进行封装,该散热法兰为自主创新的五层 CMC 法兰结构,其热导率和热膨胀系数都要优于普通的法兰。从图中可以看到载波放大器和峰值放大器拥有相近的输出匹配结构,并没有比峰值放大器多出原始 Doherty 结构中的四分之一波长传输线作为反相器。载波放大器和峰值放大器都偏置在 28 V 的漏极电压上,不同之处在于载波放大器的静态偏置电流为 500 mA,而工作在 ClassC 模式的峰值放大器的静态栅压通过调

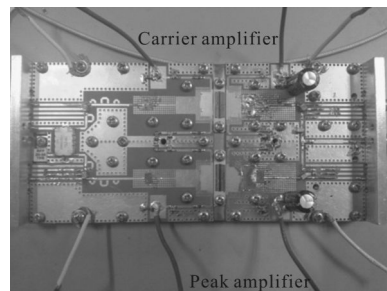


图 8 Doherty 功率放大器测试板

Fig.8 Test board of Doherty power amplifier

试后比载波放大器的静态栅压低 1.1 V。

图 9 是该功率放大器在 2.1 GHz 性能表现。在增益 3 dB 压缩点处,该 Doherty 功率放大器的输出功率达到 56 dBm,即 398 W,此时对应的漏极效率为 52%。从 3 dB 压缩点对应的输入功率 42 dBm 处进行回退,当回退 8 dB 到输入功率为 34 dBm 的时候输出功率为 51 dBm,即 126 W,此时对应的漏极效率为 43%。

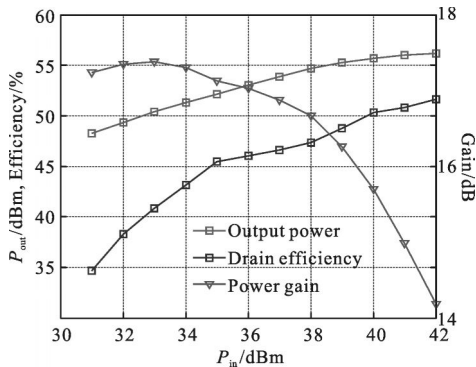


图 9 Doherty 功率放大器的射频性能

Fig.9 RF performance of Doherty power amplifier

图 10 列举了文中对 Doherty 功率放大器结构优化后对效率带来的提升。为了说明 Doherty 功率放大器在功率回退点处的优异性能,还特别加入了普通 ClassAB 模式下功率放大器的性能作为对比。同样在增益 3 dB 压缩点处功率回退 PBO 为 8 dB,ClassAB 功率放大器的回退效率只有 31%,而通过 Doherty 合成之后,功率回退 8 dB 处的效率提高到了 37%,这说明 Doherty 对效率的提升还是起到了一定的作用。而经过对功率合成电路的优化改变了匹配方案以后,功率回退 8 dB 处的效率提高到了 43%。相对 ClassAB 功

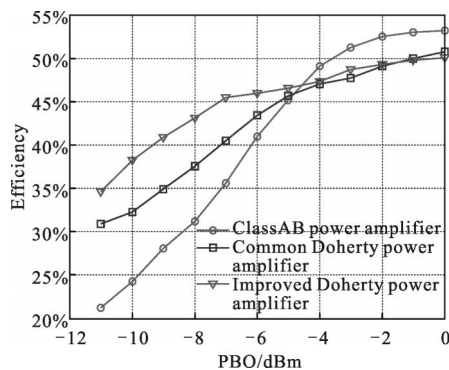


图 10 功率放大器的效率提升

Fig.10 Efficiency improvement of the power amplifier

率放大器的效率提升幅度达到了 39%,相对普通 Doherty 功率放大器的效率提升幅度也高达 16%。

4 结论

文中在自主研发的 RF LDMOS 功率晶体管与散热法兰的基础上,通过对 Doherty 结构在器件上移植特性的分析,提出了一种新的匹配方案并且对 Doherty 功率合成电路进行了优化,实验结果表明了功率放大器最终性能满足了大功率以及功率回退处高效率的要求,而且其对效率的提升相对普通 Doherty 结构又有了进一步的改善。

这种功率放大器在 2.1 GHz 频率下表现出的优异性能不但适合于无线通信应用,而且还可以调整匹配电路将其扩展到 1~2 GHz 的 L 波段以及 2~3.8 GHz 的部分 S 波段的雷达发射系统当中,其结构对功率回退点处效率的提升也适合于使用具有一定峰均比的调制信号作为通讯的雷达系统。

参考文献:

- [1] Guan Lei, Zhu Anding. Green communications digital predistortion for wideband RF power amplifiers [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2014, 15(7): 84-99.
- [2] Doherty W H. A new high efficiency power amplifier for modulated waves[J]. *Proceedings of Institute of Radio Engineers*, 1936, 24(9): 1163-1182.
- [3] Gil Wong Choi, Hyoung Jong Kim, Woong Jae Hwang, et al. High efficiency Class-E tuned doherty amplifier using GaN HEMT[C]//IEEE MTT-S Digest, 2009: 925-928.
- [4] Jakabosky J, Ryan L, Blunt S. Transmitter in-the-loop Optimization of Distorted OFDM Radar Emissions[C]//IEEE Radar Conference, 2013: 1-5.
- [5] Steve C Cripps. RF Power Amplifiers for Wireless Communications [M]. 2nd ed. Massachusetts: Artech House, Inc., 2006.
- [6] Rabb F H. Efficiency of Doherty RF power amplifier systems [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 1987, BC-33(3): 77-83.
- [7] Gunhyun Ahn, Min-su Kim, Hyun-chul Park, et al. Design of a high-efficiency and high-power inverted doherty amplifier [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2007, 55(6): 1105-1111.