

Ka波段增强型负载调制的超宽带高效率Doherty功率放大器研究

杨琳^① 闫成宇^① 王彦平^② 张明^① 王保柱^① 韩琦^①
何宇航^① 侯卫民^{*①} 李康^③

^①(河北科技大学信息科学与工程学院 石家庄 050018)

^②(北方工业大学人工智能与计算机学院 北京 100144)

^③(西安电子科技大学集成电路学院 西安 710003)

摘要: Ka波段是未来新一代高通量卫星的核心频段, 卫星通信发射系统对功率放大器提出了高回退效率的严苛要求。Doherty功率放大器(DPA)通过有源负载调制显著提高了功率回退状态下的工作效率, 但Doherty架构的固有阻抗变换网络严重限制了其工作带宽, 同时, 其在毫米波段的饱和与回退效率均大幅下降, 这成为制约其在毫米波高通量卫星通信系统中应用的关键瓶颈。针对上述问题, 本文提出了一种超宽带增强型有源负载调制技术, 有效突破Doherty功率放大器带宽和回退效率相互制约的瓶颈, 实现毫米波Doherty架构的效率增强和带宽扩展。同时, 创新的提出了一种超宽带相位补偿非等分功率分配网络, 扩展了高效率带宽, 同时缩小了芯片面积。为验证所提理论, 基于0.15 μm GaN工艺, 设计了一款毫米波超宽带高效率Doherty功率放大器芯片, 最终在24-33 GHz (相对带宽达到31.6%)的超宽频带内, 实现了21.8-23.8 dB的小信号增益, 28.9-31.0 dBm的饱和输出功率, 饱和功率附加效率(PAE)为25.2%-33.5%, 6dB回退PAE为15.5%-19.8%。在目前所报道的相近频带的毫米波GaN Doherty功放中, 具有最高的小信号增益及饱和PAE, 高的饱和输出功率和6 dB回退PAE等一系列优异性能, 同时在目前所报道的2-3级DPA芯片中具有最小的芯片面积。

关键词: 卫星通信; 毫米波; Doherty功率放大器; 超宽带; 高效率

中图分类号: TN43

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2026)00-0001-10

DOI: 10.11999/JEIT260514

CSTR: 32379.14.JEIT260514

1 引言

卫星通信是构建未来空天地一体化网络的重要支撑技术^[1], 近年来, 随着卫星通信技术的快速发展, 传统的C和Ku频段的频率资源已趋于饱和, 难以满足需求, Ka波段由于其可用带宽范围大、传输速率高、小型化的优点成为目前卫星通信的重要发展方向^[2]。功率放大器(Power Amplifier, PA)芯片作为卫星通信发射系统的核心部件, 其输出功率、效率、带宽及线性度等性能通常可以主导整个

发射系统的性能, 直接影响卫星通信信号的质量, 面临着高效率 and 宽频带的挑战^[3,4]。在卫星通信发射系统中, 功率放大器的功耗约占整体的50%以上, 提高卫星通信发射系统中功率放大器芯片的效率就成为了研究的热点。此外, 在有限的卫星平台空间内, 实现芯片的高集成度与小型化至关重要。同时, 为了最大化频谱效率, 毫米波卫星通信的调制方式将具有高峰均功率比(Peak to Average Power Ratio, PAPR)的大动态范围^[5]。因此, 设计具有高饱和效率、高回退效率和紧凑尺寸的毫米波功率放大器至关重要。传统的功率放大器在输出功率达到饱和时也能达到最大效率, 但是, 功率回退6 dB甚至更多时其效率大幅下降, 不仅造成能量浪费也对系统的散热带来了极大负担, 无法满足快速发展的卫星通信系统的要求。Doherty功率放大器通过主/辅功放的有源负载调制显著提高了回退功率下的工作效率^[6,7]。然而, Doherty功率放大器的带宽受限于其内部复杂的多重阻抗变换网络, 同时在毫米波段, 晶体管的高寄生参数和低增益, 使得阻抗变换网络的设计更为复杂, 其固有效率优势难以发挥, 导致Doherty架构饱和与回退效率均大幅下降, 这成为制约DPA在毫米波高通量卫星通信系统中应用的关键瓶颈。所以, 如何突破毫米波Doherty功

收稿日期: 2026-04-27; 改回日期: 2026-06-24; 网络出版: 2026-07-02

*通信作者: 侯卫民 jerry.ioa.bj@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(62441401), 国家重点研发计划(2022YFB4400400), 国家重点实验室基础科学研究创新基金(IFN20230113), 河北省重大科技支撑项目(24290201Z), 河北省自然科学基金(F2024208020), 河北省教育厅青年拔尖人才项目(BJK2024089)

Foundation Items: National Natural Science Foundation of China (No.62441401), National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB4400400), National Key Laboratory of Basic Scientific Research for Innovation Fund (No. IFN20230113), Major Science and Technology Support Project of Hebei Province (No.24290201Z), Hebei Natural Science Foundation (No. F2024208020), Science and Technology Project of Hebei Education Department (No. BJK2024089)

率放大器带宽和效率的限制成为国内外学者研究的热点[8]。

文献[9]提出了一种输出匹配网络可重构的Doherty功率放大器,采用具有紧凑型可切换短截线的输出网络,使功率级晶体管在宽频带内达到合适的负载调制阻抗,从而拓展Doherty架构的带宽。Meng Ren等人提出了一种连续逆F类Doherty架构,同时后匹配网络结合等效传输线负载调制结构,有效吸收了有源器件的寄生与封装参数,从而提升了DPA效率和带宽[10]。Liu Ruijia等人[11]提出了一种具有最佳相位色散特性的阻抗逆变器,并应用于毫米波非对称Doherty架构,实现了宽带有源负载调制。文献[12]提出了一种具有二次谐波控制的连续模式Doherty功率放大器架构,并分析了峰值晶体管的阻抗轨迹对连续模式Doherty功放带宽的限制。文献[13]提出了一种连续逆F类输入谐波相位控制方法,通过控制输入端二次谐波相位来重构晶体管漏极时域波形,在保证高效率的同时获得阻抗设计空间的大幅提升,实现功率放大器的带宽扩展和效率增强。此外,基于变压器的四路Doherty架构也被应用于提升DPA的高效率回退范围[14]。尽管目前已发表了一些毫米波GaN MMIC DPA,但大多数DPA只能在窄带内保持良好的效率性能,并且载波和峰值晶体管电流相位的对准只能在中心频率处得到保证,这无疑会对DPA的负载调制产生不利影响。

本文提出了一种超宽带增强型有源负载调制理论,将超宽频带内负载阻抗调制到最佳阻抗空间,对多频率点进行阻抗调谐,在超宽频带内实现充分的负载调制,创新性地引入了基波阻抗可调偏置匹配网络(Impedance Tunable Bias Network, ITBN)与双驱动阻抗调控机制,实现毫米波Doherty架构的效率增强和带宽扩展。同时,提出了一种超宽带相位补偿的非等分功率分配网络,在超宽频带内实现充分的负载调制,同时将载波与峰值功放的相位差进行精确补偿,缩小了芯片面积。为验证所提方法,设计了一款24-33 GHz超宽带高效率Doherty功率放大器芯片。在目前报道的毫米波GaN Doherty功放中具有31.6%的最大相对带宽,最高的小信号增益和饱和PAE,高的饱和输出功率及6 dB回退PAE等一系列优异性能,同时,在目前所报道的2-3级DPA芯片中具有最小的芯片面积。

2 超宽带增强型有源负载调制理论分析

在毫米波段,Doherty功率放大器的饱和效率及回退效率均大幅降低,如何在超宽频带内实现充分的负载调制,成为最大的挑战。为增强Doherty

功率放大器在超宽频带内的饱和及回退效率,本文创新性的提出超宽带增强型有源负载调制技术,充分将全频带负载阻抗调制到最佳阻抗空间,拓展负载阻抗空间,提高毫米波Doherty功放的高效率工作带宽。首先改进功率级载波与峰值晶体管的负载阻抗空间,将载波功放的负载阻抗调制以最大PAE为调制目标,而峰值功放则以最大饱和输出功率(P_{sat})为调制目标,补偿C类工作的峰值功放输出功率的不足。本文Doherty功放的设计目标是29 dBm,因此每个载波及峰值功放分支需提供26 dBm输出功率以确保充分的负载调制,最终确定饱和区载波与峰值晶体管最佳负载阻抗区域,如图1所示,载波与峰值功放两支路在该阻抗空间均达到>35%的PAE和>26 dBm的 P_{sat} 。

本文提出的新型超宽带增强型宽带负载调制网络如图2所示,本文将GaN-HEMT器件的输出电容 C_{out} 吸收进载波与峰值功放输出匹配网络。传统Doherty功放基于 $\lambda/4$ 传输线负载调制网络,只能在中心频点处实现负载调制,宽频带负载调制效果差,不适合超宽带Doherty功放,同时占用了较大的面积。本文提出超宽带 $\lambda/4$ 传输线等效网络(Wideband Equivalent Quarter-Wave Transmission Line, WEQWTL),如图2所示,载波功放输出匹配网络采用特征阻抗为 R_{OPT} (最佳负载阻抗)的WEQWTL,扩展主功放负载调制带宽。同时,由于毫米波段晶体管寄生参数影响显著,峰值功放输出匹配网络与传统特征阻抗为 R_{OPT} 的 0° 传输线不同,本文峰值功放采用电长度为 Θ 的超宽带等效网络(Wideband Equivalent Angle-defined Transmission Line, WEATL),用于对毫米波段峰值晶体管寄生参数进行有效的补偿,提升负载调制效果,同时扩展负载调制行为的带宽。图2中采用后匹配网络(Post-Matching Network, PMN)将 50Ω 系统阻抗变换至 $R_{OPT}/2$ 。

图2中输出匹配网络(Output Matching Network, OMN)OMN1的ABCD矩阵可表示为:

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_{out_c} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\Theta_{m1} & jR_{OPT}\sin\Theta_{m1} \\ \frac{j}{R_{OPT}}\sin\Theta_{m1} & \cos\Theta_{m1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_{m1} + \frac{1}{jR_{OPT}\tan\Theta_{m2}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{j\omega C_{m2}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

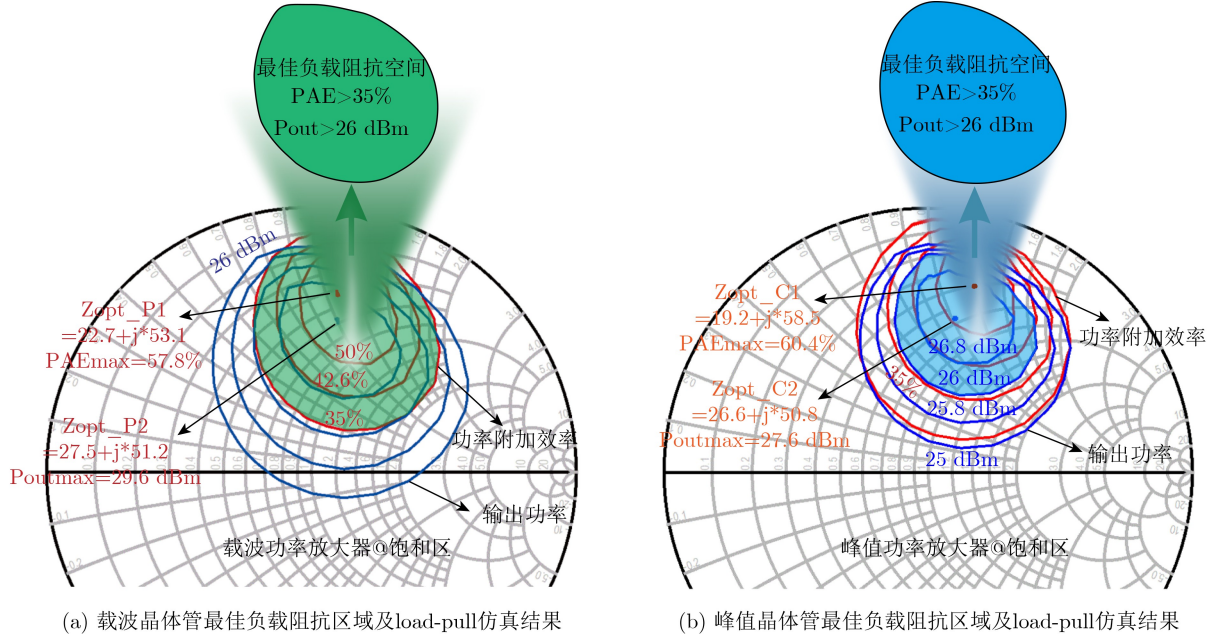


图 1 载波与峰值晶体管最佳负载阻抗空间

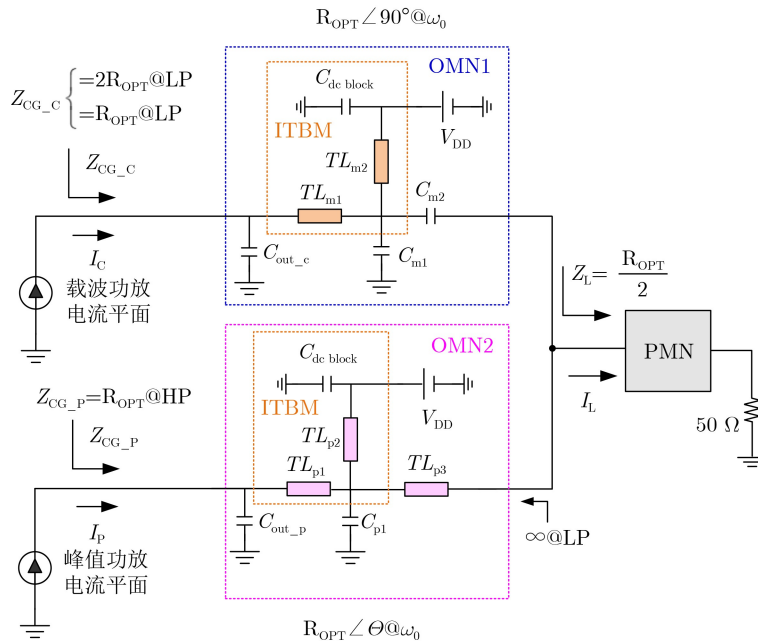


图 2 提出的新型超宽带增强型有源负载调制网络

式(1)中, θ_{m1} 和 θ_{m2} 分别为载波功放主路串联微带线 TL_{m1} 和直流偏置馈线 TL_{m2} 的电长度, 其特征阻抗为 R_{OPT} 。与传统偏置电路射频开路的设计不同, 本文引入基波阻抗可调偏置网络(ITBN), 如图2所示, ITBN网络包括两个串联微带线 TL_{m1} 、 TL_{m2} 及旁路电容 $C_{dc\ block}$, $C_{dc\ block}$ 在工作频段形成理想对地短路, 设计直流偏置馈线 TL_{m2} 的电长度 $\theta_{m2} < 90^\circ$, 该偏置支路不再对基波完全开路, 引入等效电抗 $1/jR_{OPT}\tan\theta_{m2}$, 深度参与到WEQWTL网络的基波阻抗匹配。

OMN1满足超宽带 $\lambda/4$ 传输线等效网络WEQWTL, 因此OMN1的目标ABCD矩阵应满足

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & jR_{OPT} \\ j & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

联立式(1)与式(2), 令式(1)的实际等效矩阵与式(2)的理想阻抗逆变器矩阵相等, 推导获得OMN1网络各参数初始解, 进一步在超宽频带内调节优化网络参数, 使OMN1在饱和与回退区均能平滑收敛至最佳负载阻抗空间。

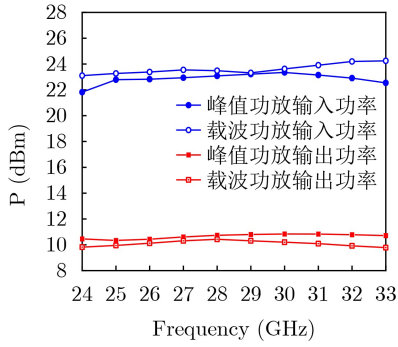


图3 载波与峰值功放输入/输出功率仿真结果

对于峰值功放, 如图2所示, 其电流平面输出匹配网络OMN2等效为电长度为 θ 的传输线, 该WEATL网络的ABCD矩阵应满足:

$$\begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & jR_{OPT} \sin \theta \\ \frac{j}{R_{OPT}} \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

图2中OMN2的ABCD矩阵可表示为:

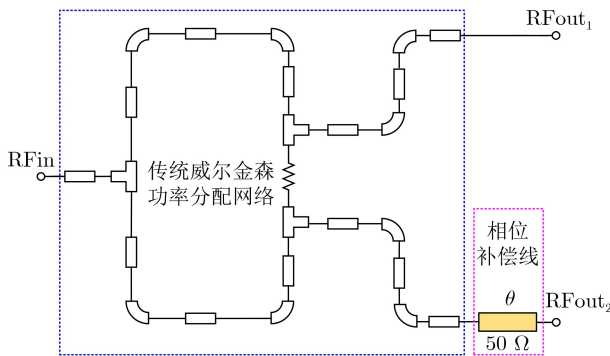
$$\begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_{out_p} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_{p1} & jR_{OPT} \sin \theta_{p1} \\ \frac{j}{R_{OPT}} \sin \theta_{p1} & \cos \theta_{p1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_{p1} + \frac{1}{jR_{OPT} \tan \theta_{p2}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_{p3} & jR_{OPT} \sin \theta_{p3} \\ \frac{j}{R_{OPT}} \sin \theta_{p3} & \cos \theta_{p3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(1)中, θ_{p1} 、 θ_{p2} 及 θ_{p3} 分别为OMN2中微带线 TL_{p1} 、 TL_{p2} 、 TL_{p3} 的电长度, 其特征阻抗为 R_{OPT} , 令式(3)与式(4)矩阵相等。WEATL网络增加了参数变量数量, 显著增加了峰值功放输出匹配网络的调谐自由度, 能够对超宽带内多个频点进行

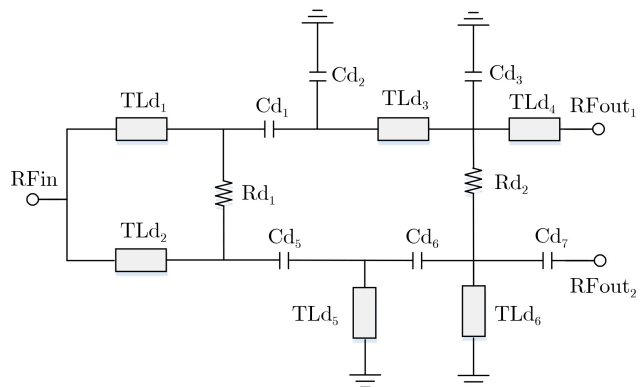
的阻抗收敛调控, 改变阻抗随频率变化的色散斜率, 从底层架构上突破了传统Doherty负载调制带宽的限制。由于方程的数量小于变量的数量, 故解不是唯一的, 考虑输出匹配网络中主路串联微带线电长度应尽量小, 在此基础上考虑工艺参数限制及最小插入损耗并确定最优解。最终, 在场路协同仿真中不断优化调整网络参数, 以获得最优性能。为进一步突破Doherty负载调制阻抗带宽的物理极限, 本文引入了辅功放双驱动阻抗调控机制, 在毫米波超宽带频带下, 由于回退区峰值功放关态的输出阻抗存在较大的频率色散, 传统理想的开路假设将破坏主功放的负载调制环境, 造成回退效率在频带边缘的恶化。本文所构建的峰值功放双驱动调控机制利用三级Doherty架构, 对峰值功放驱动级和功率级的栅极偏置电压进行了非对称协同设计, 提高功率级栅极偏压至 -3.0 V, 从而有效抑制辅功放回退区输出阻抗的频率色散, 增强回退区主功放的负载调制, 同时, 将驱动级栅极偏压设计为 -3.3 V, 保证深度C类工作状态, 避免辅功放在回退区的提前导通。提高了24-33 GHz频带边缘的6dB回退效率。使用MATLAB分析所提出的网络的负载调制过程的行为, 计算了载波/峰值功放的输入/输出功率, 如图3所示, 证明了良好的超宽带负载调制效果, 验证上述理论分析。

3 超宽带相位补偿功率分配技术

Doherty架构中, 载波与峰值功放基波电流存在较大相位差。传统DPA采用一定电长度的相位补偿线, 传统DPA相位补偿线一般级联于功率分配网络后, 如图4(a)所示, 相位补偿线对频率较为敏感, 无法适应宽带DPA MMIC设计。为了解决上述问题, 有文献报道了宽带相位补偿网络(Phase Compensation Network, PCN), 采用含多级微带线及并联电容所构成的人工传输线, 来取代传统的



(a) 传统DPA功率分配网络及相位补偿网络



(b) 提出的超宽带PCPDN

图4 所提出的超宽带PCPDN与传统结构对比图

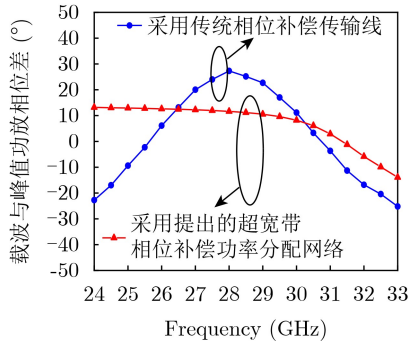


图 5 提出的新型超宽带PCPDN和传统的相位补偿传输线效果对比

相位补偿传输线, 对多频率点进行补偿, 从而拓展Doherty架构的高效率带宽, 但还是面临着补偿结构尺寸较大的问题。本文将宽带相位补偿网络结构及非等分功率分配网络进行改进, 提出一种新型超宽带相位补偿功率分配网络(Phase-Compensation Power Divider Network, PCPDN), 如图4(b)所示。此外, 在整体电路仿真中, 还需对宽带相位补偿功率分配网络中的微带线和电容参数进行适当调整和优化, 以实现宽带相位补偿和最小插入损耗。

图5为所提出的超宽带PCPDN和传统的相位传输线的相位补偿仿真结果, 该网络实现了 30° 以内的相位差, 优于传统相位补偿线的 60° 相位差, 验证了所提出的PCN的宽带相位补偿特性。同时相比较于单独的宽带相位补偿网络, 所提出的新型超宽带相位补偿功率分配网络尺寸更小、占用芯片面积更少。同时, 为了补偿由于峰值晶体管输出基波电流低所导致的载波晶体管负载调制不充分, 超宽带PCPDN将功率分配比 σ 提高至1.2, 使工作频带内载波与峰值功放输出基波电流相等, 提高Doherty架构饱和效率。

4 三级超宽带毫米波Doherty功放设计

目前报道最多的Doherty功率放大器为单级架构, 放大器增益较低, 一般不高于10 dB, 难以满足实际应用要求。本文提出了一种三级超宽带毫米波Doherty架构, 其简化的电路结构如图6所示。合理设计第一级输入级功放匹配网络, 级间匹配网络(Inter-stage Matching Network, ITMN), 以扩展增益带宽。第二级驱动级放大器用于提升整个放大器的增益, 第三级功率级提升Doherty功率放大器的PAE及输出功率。最终, 不断调试优化网络参数, 分析调整载波与峰值功放的负载调制行为和路径, 在超宽频带内实现载波与峰值功放的增强型有源负载调制及相位补偿。

5 电路测试

所设计的超宽带毫米波Doherty功放芯片显微镜下照片如图7所示, 芯片采用 $0.15\ \mu\text{m}$ GaN工艺设计和制造, 芯片的尺寸为(包含测试压点) $2.7\ \text{mm} \times 1.5\ \text{mm}$, 其中输入级功放工作在AB类, 栅极偏置电压 $V_{G1} = -1.8\ \text{V}$, 漏极偏置电压 $V_{D1} = 15\ \text{V}$ 。信号通过超宽带相位补偿功率分配网络后, 传输进入Doherty架构, 其中驱动级载波功放和功率级功放均工作在AB类, $V_{GC1} = V_{GC2} = -1.8\ \text{V}$, 漏极偏置电压 $V_{DC1} = V_{DC2} = 15\ \text{V}$ 。驱动级峰值功放和功率级峰值功放均工作在C类, 为有效抑制峰值功放回退区输出阻抗的频率色散, 提高功率级栅极偏压至 $-3.0\ \text{V}$, 增强回退区主功放的超宽带负载调制, 实现超宽带回退效率的增强。同时, 为避免峰值功放在回退区的提前导通, 将驱动级栅极偏压设计为 $-3.3\ \text{V}$, 保证深度C类工作状态。峰值功放漏极偏置电压 $V_{DP1} = V_{DP2} = 15\ \text{V}$ 。

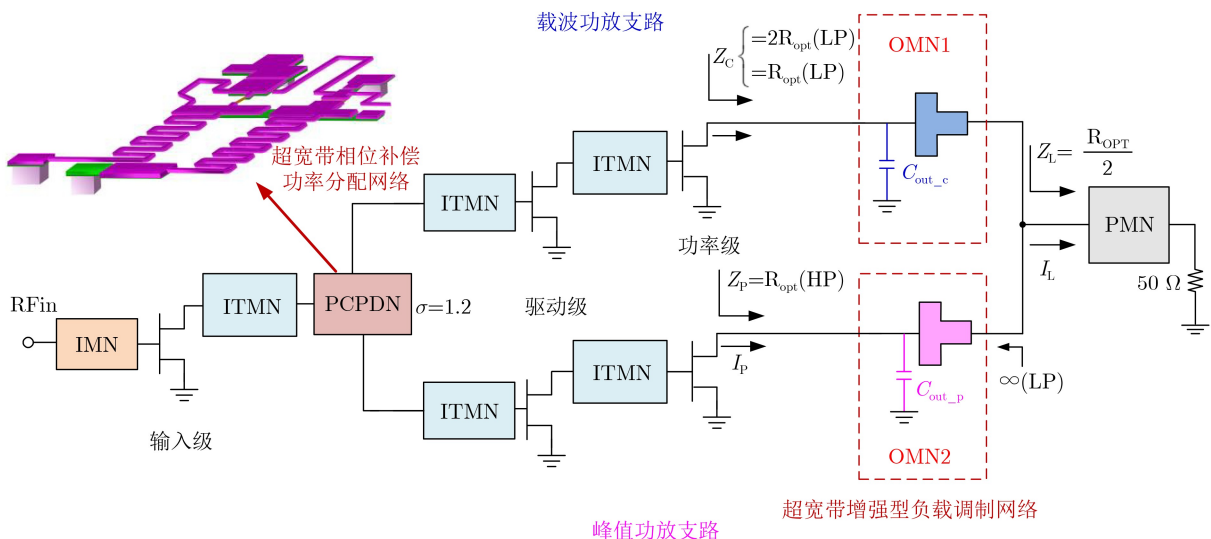


图 6 三级毫米波超宽带紧凑型高效率Doherty功率放大器简化结构图

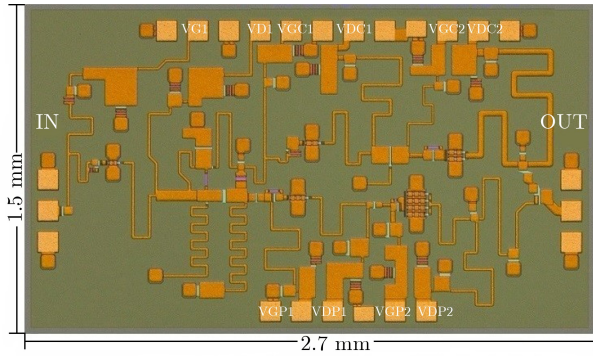


图 7 24-33 GHz超宽带高效率Doherty功率放大器芯片照片

在室温环境下，Doherty功放芯片进行测试，芯片S参数测试与仿真结果如图8(a)所示，在24–33 GHz的超宽带内，设计加工的DPA测试小信号增益 $|S_{21}|$ 为21.8-23.8 dB，增益平坦度为 ± 1.0 dB，输入回波损耗 $|S_{11}|$ 和输出回波损耗 $|S_{22}|$ 分别低于-3.6 dB和-7.9 dB，测试结果与仿真结果具有较好

的一致性，芯片在超宽带内具有较高的小信号增益、优异的增益平坦度和良好的输入/输出匹配。

采用连续波信号进行功率、效率测试，芯片的PAE随输入功率变化的测试结果如图8(b)所示，测试频率步进为1 GHz，在带内最高频带内33 GHz处，芯片饱和PAE为26.2%，相应的6 dB回退效率为17.0%。

芯片的输出功率和功率增益随输入功率变化的测试结果如图9(a)所示，随着输入功率的增加，Doherty功放逐渐趋于饱和，功率增益出现一定的压缩，当输入功率达到12 dBm时，放大器饱和，在带内最高频点33 GHz处，该Doherty功放芯片饱和输出功率为28.9 dBm，饱和状态下的功率增益为17.0 dB。如图9(a)所示，在32–33 GHz的频点下Doherty功率放大器出现一定的增益扩展，这主要是由于器件的输入功率增加时，器件的动态工作点相对于静态工作点发生变化，表现为栅压、漏电流

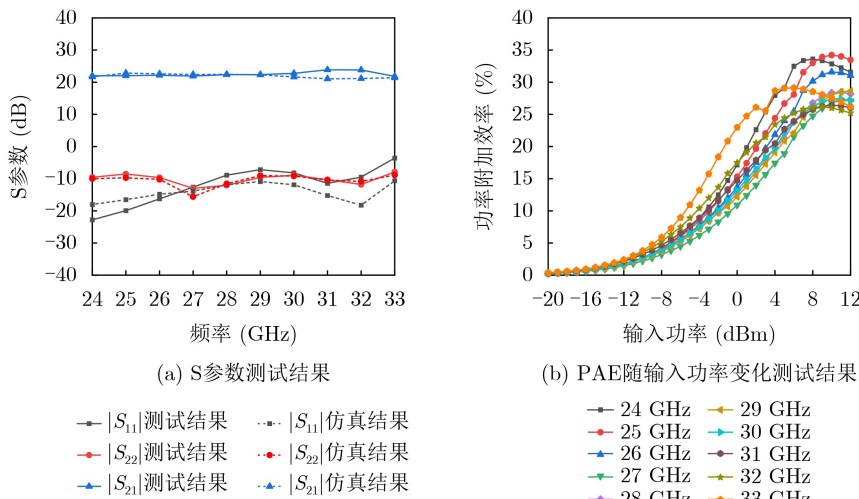


图 8 芯片S参数及PAE随输入功率变化测试结果

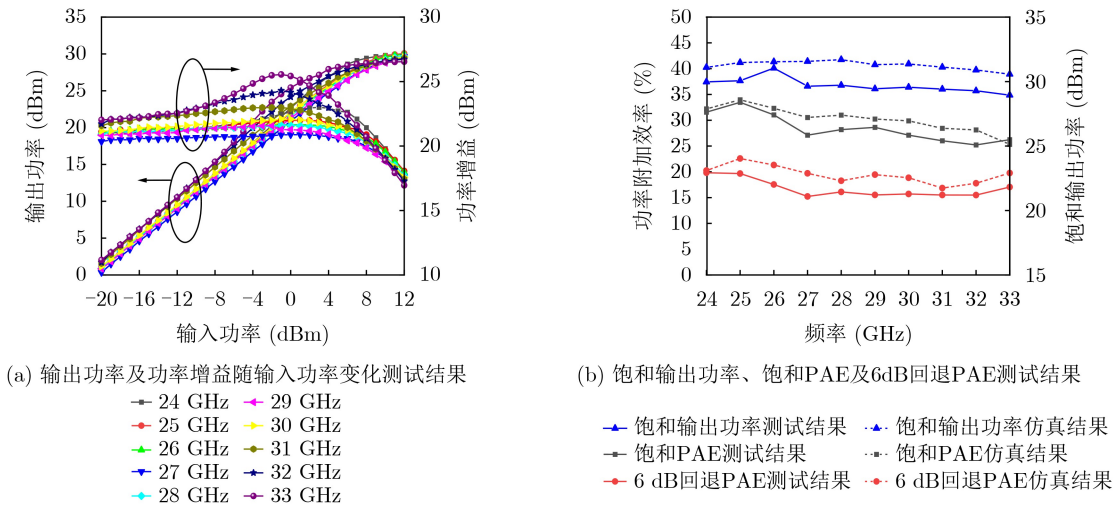


图 9 芯片输出功率及功率增益随输入功率变化、饱和输出功率、饱和PAE及6dB回退PAE测试结果

变大。当激励功率处于一个特定范围, 器件工作点提高但是仍处于线性工作状态, 此时放大器的功率增益高于小信号增益。

图9(b)为芯片的饱和输出功率、饱和PAE及6dB回退PAE测试与仿真结果, 在24-33 GHz的超宽频带内, 设计加工的DPA测试饱和输出功率达到了28.9-31.0 dBm, 饱和PAE达到了25.2%-33.5%, 6dB回退PAE达到了15.5%-19.8%, 在工作频带内, 仿真结果略高于测试结果, 在Ka波段高的工作频率下, 极小芯片面积内无源走线间的杂散交叉耦合及通孔寄生电感等难以在场路协同仿真中被完全精确提取, 同时, 晶体管大信号模型在深C类偏置下非线性拟合的固有误差, 共同导致了测试数据相较于理想仿真环境出现了合理范围内的下降, 总体而言, 测试结果曲线波动趋势与仿真结果高度吻合, 充分验证了本文设计的有效性。图9(b)中, DPA的饱和PAE及6 dB回退PAE的测试结果在频带边缘(24-26 GHz及33 GHz处)出现了一定的波动, 这主要由于为实现W级的功率输出, 提高了

功率级晶体管尺寸, 其寄生参数对器件Q值的影响导致有源和无源器件之间的匹配不能在所有频点都做到最优, 匹配电路在频带边缘会产生一些失配, 导致效率出现了较小的波动。同时, 测试验证了放大器的稳定因子在DC-50 GHz频带内均严格大于1, 进一步验证了功放芯片的绝对稳定性。

表1对本设计和其他相近频段的毫米波GaNDPA的性能参数进行了比较, 本文所提出的DPA MMIC具有24-33 GHz的超宽频带, 相对带宽达到了31.6%, 不同于目前所报道的Doherty功率放大器大多数采用的1-2级结构, 本文Doherty功放芯片采用三级放大结构, 实测小信号增益达到了21.8-23.8 dB, 克服了单级Doherty功放增益较低, 无法满足实际工程应用的不足。在目前已报告的相近频带的毫米波DPA MMIC中, 本文所报道的DPA在24-33 GHz的超宽频带内, 具有最高的小信号增益与饱和PAE, 最小的芯片面积, 及高的饱和输出功率和6 dB回退效率等一系列优异的性能, 在毫米波卫星通信系统中具有广泛的应用前景。

表 1 与目前报道的毫米波GaNDPA MMIC性能对比表

参考文献	频率 (GHz)	相对带宽 (%)	级数	Psat (dBm)	增益 (dB)	PAE (%) @Psat	PAE (%) @ 6dB PBO	芯片面积 (mm ²)	年份	所采用工艺
[11]	24-28	15.4	2	36.8-38.1	16.4-20	29.7-36.8	18.6-32 ^a	7.44	2024	0.15um GaN
[15]	24-28	15.4	2	35.4-36	14.9-19.7	27.8-36.8	18.1-30.1	5.95	2022	0.15um GaN
[16]	24-30	22.2	2	31.6-32.7	9.8-14.9	20-27.6	18.2-22.4	6.3	2025	0.12um GaN
[17]	24-29	18.9	2	34.8-36.1	15.7-19.5	25-31.7	19-24.8	5.32	2024	0.15um GaN
[18]	28-29.5	5.2	3	34.6	13	24	21	11.78	2024	0.15um GaN
[19]	29.1	-	1	30	9	44	28	5.38	2022	0.15um GaN
本文	24-33	31.6	3	28.9-31.0	21.8-23.8	25.2-33.5	15.5-19.8	4.05	2026	0.15um GaN

注: a:8dB回退效率

6 结束语

本文聚焦毫米波卫星通信发射系统前端对宽带高回退效率功放芯片的迫切需求, 针对目前所报道的毫米波Doherty功放芯片普遍无法在超宽频带内实现充分有源负载调制的问题。提出了一种超宽带增强型有源负载调制技术, 在超宽频带内实现充分的有源负载调制, 创新性地引入了基波阻抗可调偏置匹配网络(ITBN)与双驱动阻抗调控机制, 实现毫米波Doherty架构的效率增强和带宽扩展。同时, 将宽带相位补偿技术融合到功率分配网络中, 提出了一种超宽带相位补偿非等分功率分配网络, 精确补偿载波与峰值功放的相位差, 同时缩小了芯片面积。为验证所提方法, 基于0.15 μm GaN工艺, 设计了一款毫米波超宽带高效率Doherty功率放大器芯片, 最终在24-33 GHz(相对带宽达到31.6%)

的超宽频带内, 芯片的小信号增益达到了21.8-23.8 dB, 实现了28.9-31.0 dBm的饱和输出功率, 对应的饱和PAE为25.2%-33.5%, 6 dB回退PAE为15.5%-19.8%。与目前所报道的毫米波GaNDoherty功率放大器相比, 具有最高的小信号增益和饱和PAE, 高的饱和输出功率及6 dB回退PAE等一系列优异的性能, 同时, 在所报道的2-3级DPA芯片中具有最小的芯片面积, 测试结果证明了本文所提理论的可行性, 该芯片可广泛应用于毫米波卫星通信发射系统中。

参考文献

- [1] 王雪, 孟姝宇, 钱志鸿. 面向6G全域融合的智能接入关键技术综述[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(5): 1613-1631. doi: 10.11999/JEIT231224.
WANG Xue, MENG Shuyu, and QIAN Zhihong. An

- overview of key technologies for intelligent access toward 6G full-domain convergence[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(5): 1613–1631. doi: [10.11999/JEIT231224](https://doi.org/10.11999/JEIT231224).
- [2] FU Zihao, LI Mingxuan, MA T G, *et al.* Millimeter-wave GaAs ultra-wideband medium power amplifier and broadband high-power power amplifier for 5G/6G applications[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2024, 14(1): 111–121. doi: [10.1109/JETCAS.2024.3356010](https://doi.org/10.1109/JETCAS.2024.3356010).
- [3] TANG Miao, WANG Xin, JIANG Yi, *et al.* Efficiency Enhancement of 5.8-GHz power amplifier using average power tracking for microwave power transmission[J]. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, 2025, 35(8): 1210–1213. doi: [10.1109/LMWT.2025.3567481](https://doi.org/10.1109/LMWT.2025.3567481).
- [4] AHMAD A Z, SHUKOOR M S, and RAWAT K. GaN MMIC-based fully integrated multioctave distributed power amplifiers for C-Ku band[J]. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, 2025, 35(11): 1831–1834. doi: [10.1109/LMWT.2025.3589729](https://doi.org/10.1109/LMWT.2025.3589729).
- [5] YAO Yao, SHI Weimin, PANG Jingzhou, *et al.* Design of a dual-input Doherty power amplifier with selectable output port[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2023, 70(4): 1405–1409. doi: [10.1109/TCSII.2022.3223928](https://doi.org/10.1109/TCSII.2022.3223928).
- [6] 华均, 许高明, 陈景豪, 等. 等效跨导补偿的负载调制增强理想Doherty射频功率放大器研究[J]. *电子与信息学报*, 2026, 48(1): 429–435. doi: [10.11999/JEIT250789](https://doi.org/10.11999/JEIT250789).
- HUA Jun, XU Gaoming, CHEN Jinghao, *et al.* Research on load modulation enhancement of quasi-ideal Doherty power amplifier with equivalent transconductance compensation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2026, 48(1): 429–435. doi: [10.11999/JEIT250789](https://doi.org/10.11999/JEIT250789).
- [7] CHEN Yifei, CHOI W, SHIN J, *et al.* Comprehensive analysis of coupled transmission lines for broadband high-efficiency Doherty power amplifiers[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2025, 73(8): 4937–4953. doi: [10.1109/TMTT.2025.3546727](https://doi.org/10.1109/TMTT.2025.3546727).
- [8] IBRAHIM Y and NIKNEJAD A. A 23–28-GHz doherty power amplifier with a PVT insensitive power detection for adaptive biasing[J]. *IEEE Solid-State Circuits Letters*, 2025, 8: 41–44. doi: [10.1109/LSSC.2025.3528055](https://doi.org/10.1109/LSSC.2025.3528055).
- [9] FENG Jiahao, CHENG Tianyu, DONG Haitang, *et al.* A 25-to-34-GHz doherty power amplifier with reconfigurable output network[J]. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, 2025, 35(9): 1352–1355. doi: [10.1109/LMWT.2025.3569562](https://doi.org/10.1109/LMWT.2025.3569562).
- [10] REN Meng, GAO Ruibin, LIU Shuang, *et al.* Design of wideband Doherty power amplifier using inverse continuous class-F mode[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2024, 71(9): 4176–4180. doi: [10.1109/TCSII.2024.3379992](https://doi.org/10.1109/TCSII.2024.3379992).
- [11] LIU Ruijia, ZHU Xiaowei, XIA Jing, *et al.* A 24-to-28-GHz asymmetric GaN MMIC doherty power amplifier with 32% PAE at 8-dB back-off using optimal phase dispersion inverter[J]. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, 2024, 34(10): 1174–1177. doi: [10.1109/LMWT.2024.3450752](https://doi.org/10.1109/LMWT.2024.3450752).
- [12] SHI Weimin, SHI Wen, PENG Jun, *et al.* Design and analysis of continuous-mode Doherty power amplifier with second harmonic control[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2021, 68(7): 2247–2251. doi: [10.1109/TCSII.2021.3051734](https://doi.org/10.1109/TCSII.2021.3051734).
- [13] 黄超意, 聂泽宁, 熊珉. 输入谐波相位控制的宽带高效率连续逆F类功率放大器[J]. *电子与信息学报*, 2024, 46(8): 3428–3435. doi: [10.11999/JEIT231202](https://doi.org/10.11999/JEIT231202).
- HUANG Chaoyi, NIE Zening, and XIONG Min. Broadband high-efficiency continuous inverse class-F power amplifier based on input harmonic phase control[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(8): 3428–3435. doi: [10.11999/JEIT231202](https://doi.org/10.11999/JEIT231202).
- [14] ZHANG Xiaohan, GUO Hao, and CHI Taiyun. A millimeter-wave four-way Doherty power amplifier with over-GHz modulation bandwidth[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2024, 59(12): 3898–3914. doi: [10.1109/JSSC.2024.3453321](https://doi.org/10.1109/JSSC.2024.3453321).
- [15] LIU Ruijia, ZHU Xiaowei, XIA Jing, *et al.* A 24–28-GHz GaN MMIC synchronous Doherty power amplifier with enhanced load modulation for 5G mm-wave applications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022, 70(8): 3910–3922. doi: [10.1109/TMTT.2022.3176818](https://doi.org/10.1109/TMTT.2022.3176818).
- [16] LIU Ruijia, JIA Haoyang, QI Lin, *et al.* A 24-to-30-GHz GaN MMIC Doherty power amplifier using reduced peaking intrinsic output impedance for bandwidth extension[J]. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, 2025, 35(3): 362–365. doi: [10.1109/LMWT.2025.3528628](https://doi.org/10.1109/LMWT.2025.3528628).
- [17] LIU Ruijia, QI Lin, and ZHU Anding. A linearity-improved 24–29-GHz GaN MMIC Doherty power amplifier with reconfigurable self-adaptive peaking gate bias network[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2024, 72(12): 6845–6856. doi: [10.1109/TMTT.2024.3409944](https://doi.org/10.1109/TMTT.2024.3409944).
- [18] GIOFRÈ R, PIACIBELLO A, CAMARCHIA V, *et al.* A two-way GaN doherty amplifier for 5G FR2 with extended back-off range[J]. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, 2024, 34(3): 314–317. doi: [10.1109/LMWT.2024.3350435](https://doi.org/10.1109/LMWT.2024.3350435).
- [19] ISHIKAWA R, SESHIMO T, TAKAYAMA Y, *et al.* A 28-GHz-band GaN HEMT MMIC Doherty power amplifier

designed by load resistance division adjustment[C]. 2021 16th European Microwave Integrated Circuits Conference, London, United Kingdom, 2022: 241–244. doi: [10.23919/EuMIC50153.2022.9783948](https://doi.org/10.23919/EuMIC50153.2022.9783948).

杨 琳: 女, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为无线通信前端芯片技术, 微波毫米波集成电路。
 闫成宇: 男, 硕士研究生, 研究方向为微波毫米波功率放大器技术。
 王彦平: 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 研究方向为雷达成像安全监测技术、遥感智能信息处理及应用。
 张 明: 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电磁波调控, 可重构超表面天线。

王保柱: 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为微电子与光电电子技术、半导体材料与器件、电路与系统应用。

韩 琦: 男, 讲师, 博士, 硕士生导师, 研究方向为光通信芯片和太赫兹探测器。

何宇航: 男, 讲师, 博士, 硕士生导师, 研究方向为新型半导体材料的太赫兹光子学、电磁超材料的设计与调控。

侯卫民: 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为阵列信号处理、无线通信。

李 康: 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为毫米波功率器件、太赫兹器件。

责任编辑: 余 蓉

Research on Ka-band Enhanced Load Modulation Ultra-wideband High-efficiency Doherty Power Amplifier

YANG Lin^① YAN Chengyu^① WANG Yanping^② ZHANG Ming^①
 WANG Baozhu^① HAN Qi^① HE Yuhang^① HOU Weimin^① LI Kang^③

^①(School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

^②(School of Artificial Intelligence and Computer Science, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

^③(School of Integrated Circuit, Xidian University, Xi'an 710003, China)

Abstract:

Objective The Ka band has become the main direction of satellite communication, which requires the core component of its transmission system, the millimeter-wave power amplifier, to be more compact in size. Meanwhile, to maximize spectral efficiency, millimeter-wave satellite communication signals will have a high peak-to-average power ratio (PAPR). Therefore, it is crucial to design a millimeter-wave power amplifier with high saturation efficiency, high back-off efficiency, and compact size. Doherty power amplifiers (DPAs) are renowned for their high efficiency and excellent linearity in power back-off states and have become a key solution to these problems. However, Doherty power amplifiers face the issue of a relatively narrow operating frequency band. Moreover, when the operating frequency extends to the millimeter-wave band, their efficiency also drops significantly. Thus, overcoming the narrowband and low efficiency problems of millimeter-wave Doherty power amplifiers is a critical challenge that needs to be addressed urgently in the satellite communication transmission chain.

Methods This paper presents an ultra-wideband enhanced active load modulation technique that effectively addresses the fundamental trade-off between bandwidth and back-off efficiency in Doherty power amplifiers. The proposed technique enables optimal impedance transformation for both carrier and peak amplifiers across an ultra-wide frequency band, while introducing an adjustable fundamental impedance bias matching network (ITBN) and a dual-drive impedance regulation mechanism. This improvement enhances load modulation performance while extending the bandwidth of load modulation behavior, achieving simultaneous efficiency enhancement and bandwidth expansion in the millimeter-wave Doherty architecture. Furthermore, a broadband phase compensation technique is integrated with an unequal power division network. This integration facilitates sufficient load modulation over ultra-wide bandwidth while maintaining precise phase difference compensation between carrier and peak paths. The proposed ultra-wideband phase-compensated power division network extends the high-efficiency bandwidth while reducing the overall chip area.

Results and Discussions A millimeter-wave ultra-wideband high-efficiency Doherty power amplifier chip was

designed and fabricated based on a 0.15- μm GaN process to validate the proposed technology. Within the ultra-wide frequency band of 24–33 GHz, the fabricated chip achieves a small-signal gain of 21.8–23.8 dB with excellent gain flatness (± 1 dB). It delivers a saturated output power of 28.9–31.0 dBm, corresponding to a saturated power-added efficiency (PAE) of 25.2%–33.5%, and a 6 dB output power back-off PAE of 15.5%–19.8%. Compared with state-of-the-art similar frequency-band GaN Doherty power amplifiers, the proposed design exhibits a maximum fractional bandwidth of 31.6%, highest small-signal gain and saturated PAE, high saturated output power and 6-dB back-off PAE. Furthermore, it features the smallest chip area among reported three-stage DPA chips.

Conclusions This paper presents an ultra-wideband enhanced active load modulation method, which achieves multi-frequency impedance tuning and thus realizes sufficient active load modulation throughout the entire working frequency band. At the same time, a novel ultra-wideband phase compensation unequal power distribution network is proposed, significantly reducing the chip area. To verify the proposed method, a millimeter-wave ultra-wideband high-efficiency Doherty power amplifier chip was fabricated using a 0.15- μm GaN process. Measurement results show that in the wideband range of 24 to 33 GHz, the small-signal gain is 21.8 to 23.8 dB, and the saturated output power is 28.9 to 31.0 dBm. The corresponding saturated PAE is 25.2% to 33.5%, and the 6 dB back-off PAE is 15.5% to 19.8%. Compared with the reported GaN Doherty power amplifiers in similar frequency bands, this paper achieves a maximum relative bandwidth of 31.6%, demonstrating excellent performance, including high small-signal gain, excellent saturated PAE, excellent saturated output power, and 6 dB back-off PAE. Moreover, it has the smallest chip area among the reported 2–3-stage DPA MMICs. These measurement results validate the effectiveness of the proposed technology and demonstrate the strong application potential of this chip in millimeter-wave satellite communication transmission systems.

Key words: Satellite Communications; Millimeter Wave; Doherty Power Amplifier; Ultra-Wideband; High Efficiency