

双频功率放大器与圆极化天线的直接集成设计

叶 敏, 陆云龙*, 黄季甫, 孙立莹

(宁波大学信息科学与工程学院, 浙江宁波 315211)

摘要: 本文介绍了一种高效率双频段圆极化缝隙耦合天线与氮化镓(Gallium Nitride, GaN)功率放大器(Power Amplifier, PA)的直接集成方案. 通过电磁-电路协同优化, 使天线输入阻抗在双频点直接与 PA 漏极输出的最佳负载阻抗匹配, 消除传统 PA 输出匹配网络的插入损耗和失配损耗, 在维持天线辐射性能稳定的同时有效提升系统效率. 双频圆极化天线采用“I”型缝隙激励旋转式辐射贴片实现圆极化波辐射, 同时可以调控天线输入阻抗特性. 为验证设计的有效性, 加工了工作在 2.6 GHz 和 3.5 GHz 的双频功率放大器集成天线(Power Amplifier Integrated Antenna, PAIA), 并在微波暗室中进行了实验测试. 测量结果表明, 3 dB 轴比(Axial Ratio, AR)带宽与阻抗带宽的重叠区域分别为 200 MHz 和 300 MHz, 中心频点处等效全向辐射功率(Effective Isotropic Radiated Power, EIRP)分别达到 46 dBm 和 48.2 dBm, 饱和功率附加效率(Power Added Efficiency, PAE)分别超过 67% 和 71%, 呈现出优异的整体效率和稳定的圆极化辐射特性.

关键词: 功率放大器; 双频; 圆极化天线; 集成设计

基金项目: 国家自然科学基金(No.62171242); 浙江省自然科学基金(No.LR24F010001); 宁波市自然科学基金(No.2024J027); 宁波市科创甬江 2035 重点研发计划项目(No.2025Z206)

中图分类号: TN917

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)08-2962-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250064

Integrated Design of Dual-Band Power Amplifier and Circularly Polarized Antenna

YE Min, LU Yun-long*, HUANG Ji-fu, SUN Li-ying

(Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract: This paper presents a highly efficient dual-band circularly polarized slot-coupled antenna directly integrated with a gallium nitride (GaN) power amplifier (PA). Through electromagnetic-circuit co-optimization, the antenna input impedance is directly matched to the optimal load impedance of the PA drain output at dual frequencies, eliminating the insertion loss and mismatch loss of traditional PA output matching networks. This approach effectively enhances system efficiency while maintaining stable antenna radiation performance. The dual-band circularly polarized antenna employs an “I”-shaped slot to excite a rotating radiation patch, enabling circularly polarized wave radiation while simultaneously regulating the antenna input impedance characteristics. To validate the design, a dual-band power amplifier integrated antenna (PAIA) operating at 2.6 GHz and 3.5 GHz was fabricated and experimentally tested in an anechoic chamber. Measurement results demonstrate that the overlapping regions of the 3 dB axial ratio (AR) bandwidth and impedance bandwidth are 200 MHz and 300 MHz, respectively. The effective isotropic radiated power (EIRP) at the center frequencies reaches 46 dBm and 48.2 dBm, while the saturated power added efficiency (PAE) exceeds 67% and 71%, respectively. These results highlight the excellent overall efficiency and stable circularly polarized radiation characteristics of the proposed design.

Key words: power amplifier; dual frequency; circular polarization antenna; integrated design

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62171242); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (No.LR24F010001); Ningbo Natural Science Foundation (No.2024J027); Ningbo Municipal Science and Technology Innovation Yongjiang 2035 Key Research and Development Plan (No.2025Z206)

1 引言

随着大规模多输入输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 技术的广泛应用, 无线通信系统对发射模块的小型化、低损耗和高效率提出更高要求. 在复杂的阵列系统中, 每个发射通道需集成独立的功率放大器 (Power Amplifier, PA) 与天线辐射单元, 其匹配电路设计与辐射性能直接决定系统传输效率与可靠性^[1], 这对高性能发射机架构的实现提出严峻挑战. 近年来, PA 集成天线技术 (Power Amplifier Integrated Antenna, PAIA) 因能有效降低链路损耗、提升集成度, 成为学术研究热点^[2].

当前, 无线通信存在多频共存的情况, 这要求发射射频前端和天线同时支持多频工作^[3]. 同时, 为抑制多径效应和反射引起的极化失真, 提升系统抗干扰能力, 采用圆极化 (Circular Polarization, CP) 天线发射电磁信号成为优选^[4-8]. 因此, 实现双频圆极化辐射的 PAIA 受到关注^[9].

针对功放与天线的集成设计, 国内外学者开展了相关研究工作. 传统集成方式是将 PA 与天线分别匹配至 50Ω 并通过同轴传输线级联. 为实现多频段发射, 需要部署多组分立式 PA 与天线模块并依赖控制电路进行频段切换, 导致系统复杂度与制造成本激增, 且无源网络引入较多插入损耗, 难以满足 MIMO 阵列的高效紧凑布局需求. 文献[10]提出逆 F 类功放与双负载宽缝天线 (Slot Loaded Stacked Antenna, SLSA) 的集成方案, 通过优化 SLSA 短截线尺寸直接匹配 PA 的基波与谐波阻抗, 在 3.3~3.8 GHz 频段内实现了高达 70.1% 的 PAE. 然而, 其依赖复杂短截线设计, 加工精度要求苛刻, 且缺乏多频切换和极化抗干扰能力. 文献[11]采用平面倒 F 天线 (Planar Inverted-F Antenna, PIFA) 直接匹配 PA 晶体管, 通过外置电容组来动态调控天线输入阻抗, 在 2~4 GHz 实现多频段可调谐集成设计, 且带内 PAE 大于 60%. 然而, 该设计无法实现多个频段同时工作. 此外, 上述工作都是基于线极化天线实现. 实现双频段^[12-15]同时工作且支持稳定圆极化辐射的功率放大器-天线直接集成设计^[16-20]仍是挑战.

本文提出一种基于缝隙耦合结构的双频圆极化天线-PA 直接集成设计方案. 核心突破在于, 通过对馈电层与辐射层的协同设计, 使得在不影响天线圆极化辐射的同时实现对输入阻抗的调控, 从而在两个频率处实现了功放晶体管输出端与天线的直接匹配. 这不仅提升了功放-天线的集成度, 而且在双频段均获得了高效率、稳定的圆极化辐射性能.

2 PAIA 损耗分析与设计流程

2.1 损耗分析

图 1(a) 是功放与天线的传统级联结构模型, 从晶

体管输出端到自由空间的辐射功率存在 4 个损耗因子, 分别是输出匹配网络与晶体管、天线之间的失配损耗 M_{L1} 和 M_{L2} , 输出匹配网络的插入损耗 I_L 及天线辐射效率 η . 天线辐射功率 P_r 的线性表达式^[11]为

$$P_r = 10^{\frac{P_{out}(\text{dBm}) - M_{L1}(\text{dB}) - I_L(\text{dB}) - M_{L2}(\text{dB})}{10}} \cdot \eta \quad (1)$$

其中, P_{out} 为晶体管输出功率. 晶体管阻抗随工作频率及功率电平变化呈现非线性动态特性, 因此 M_{L1} 本质上无法完全消除. I_L 与 M_{L2} 源于输出匹配网络的固有损耗及其与天线的阻抗失配, 即 $Z_{ant} \neq Z_{out}^*$, 失配损耗表达式如下:

$$M_{L2} = 20 \log_{10} \left(\sqrt{1 - \left| \frac{Z_{ant} - Z_{out}}{Z_{ant} + Z_{out}} \right|^2} \right) \quad (2)$$

如图 1(b) 所示, 一体化级联设计通过去除功放输出匹配网络实现链路简化, 其核心在于将天线输入阻抗与晶体管最佳负载阻抗直接匹配, 满足 $Z_{ant} = Z_{load_opt}$, 优化后链路损耗因子仅剩 M_{L1} 和 η , 彻底消除了 I_L 与 M_{L2} 的影响. 相较于传统架构, 该设计能够提升链路能效.

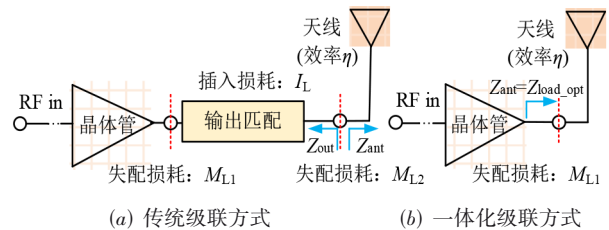


图 1 功放-天线

2.2 协同设计流程

本节阐述提出的协同设计与联合优化流程, 包括两大核心模块: 功放电路设计与天线选型及优化设计. PA 使用 keysight Advanced Design System (ADS) 软件完成, 天线建模与仿真依托 High Frequency Structure Simulator (HFSS) 平台实现. 在满足圆极化辐射约束要求的前提下, 实现 PA 与天线的高效集成与协同优化.

整体设计流程如图 2 所示, 基于负载牵引提取晶体管双频最佳负载阻抗, 直接匹配至圆极化天线输入阻抗, 并通过联合电磁-电路仿真优化, 实现更加紧凑的结构与更高的系统效率. 具体设计步骤如下.

(1) 根据目标输出功率、效率和工作频段范围, 选取适合的 PA 晶体管, 设计功放的栅极、漏极偏置和稳压电路, 确保电路稳定性和最佳工作状态.

(2) 进行源牵引和负载牵引仿真, 在最大化输出功率和效率的情况下, 提取晶体管在双频下的最佳源阻抗 $Z_{source_opt,f}^{PA}$ 和负载阻抗 $Z_{load_opt,f}^{PA}$, 作为后续匹配设计的目标.

(3) 基于 f_1 和 f_2 处提取的最佳源阻抗 $Z_{source_opt,f}^{PA}$ 进行

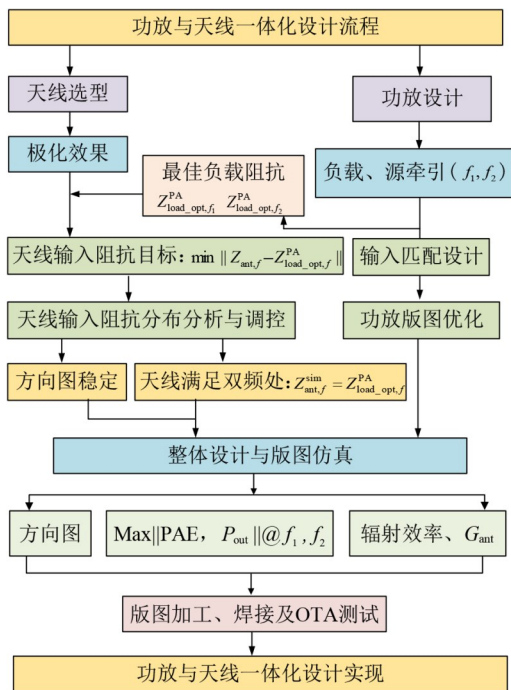


图2 功放天线集成系统协同设计与联合优化流程

双频输入匹配设计,完成功放版图优化。

(4)根据系统辐射需求与极化特性,选取合适的天线结构,确保在工作频段范围内天线方向图具有稳定的极化性能和良好增益。

(5)对天线的输入阻抗分布进行分析与调控,使得双频处天线输入阻抗 $Z_{ant,f}^{sim}$ 分别与晶体管最佳负载阻抗 $Z_{load_opt,f}^{PA}$ 匹配,同时保证圆极化辐射方向图的稳定。

(6)进行 PAIA 整体版图设计与仿真优化,在保证结构的紧凑性和热管理性能的基础上,达成核心目标:辐射方向图稳定性、双频高效 PAE 和 P_{out} , 以及最佳辐射效率和增益性能。

(7)完成 PAIA 版图加工制造与测试,验证系统在实际工作条件下的性能,包括极化特性、PAE、输出功率及天线辐射增益等关键指标。

3 功放-天线协同设计

3.1 电路结构设计

本设计 PA 采用 MACOM 公司的 GaN HEMT 晶体管,型号为 CGH40010F(饱和输出功率 10 W)。衬底材料采用 30 mil 的 Rogers 4350B 板材(介电常数为 3.48, $\tan\delta=0.0037$),电路架构如图 3 所示。

输入网络由稳定电路、栅极偏置电路、基波匹配网络与射频馈源构成。由于晶体管输出端的阻抗匹配由天线实现, V_{ds} 输出网络仅包含偏置网络和焊盘结构。功放直流偏置电压设定为 $V_{ds}=28\text{ V}$, $V_{gs}=-2.8\text{ V}$, 晶体管工作于 AB 类模式。偏置网络采用双频 Π 形传输线结

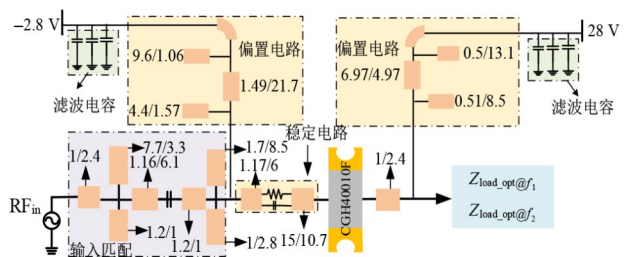


图3 电路结构图

构,确保在 f_1 和 f_2 两个频段的匹配网络看向偏置电路的阻抗为开路,实现高效扼流。稳定电路通过 RC 并联实现,使功放的稳定系数大于 1,抑制高频振荡。所有微带线设计基于 Keysight Momentum 全波电磁仿真,集总元件调用 Modelithics CLR 库精确模型。在 ADS 中完成晶体管的双频源牵引和负载牵引仿真分析,兼顾高效率和大功率输出的需求,最终得到表 1 所示的最佳负载阻值,为天线优化提供目标。

表 1 PA 的最佳负载阻值

频率	$Z_{load_opt,f}^{PA}$	$Z_{source_opt,f}^{PA}$	PAE/%	P_{out}/dBm
2.6 GHz	12.9+j19.2	5.26-j2.97	68.3	41.5
3.5 GHz	13.1+j3.0	4.17-j10.8	72.8	42.3

3.2 天线元件设计

所设计的 PAIA 三维几何结构如图 4 所示,包含两层基板和一个馈电层。底层电路层集成 PA 电路和微带馈电网络,通过金属馈电层与辐射部分隔离。这种多层结构在抑制电路微带线对辐射性能干扰的同时,兼顾了结构紧凑性与热管理等方面的需求。金属馈电层位于两介质基板之间,通过两个纵向缝隙宽度不同的“ I ”型结构耦合馈电,上下缝隙结构高度分别为 $h_1=4.5\text{ mm}$ 和 $h_2=1.5\text{ mm}$ 。上半部宽缝区 ($W_{d1}=17.3\text{ mm}$) 等效为低阻抗耦合路径以增强低频段的能量传输,下半部窄缝区域 ($W_{d2}=0.85\text{ mm}$, $W_{d3}=2\text{ mm}$) 通过电流路径压缩来提升高频段的耦合效率。调整缝隙尺寸与两端水平槽参数,可以优化双频输入阻抗。此外,金属馈电层兼具散热功能,能够实现电气性能与热管理平衡。

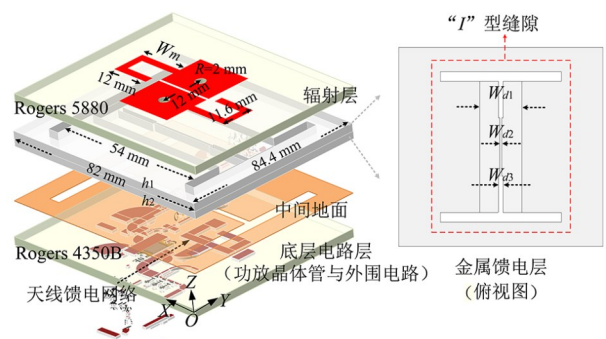


图4 圆极化天线-功放透视图

辐射层位于金属馈电层的上方,由一对中心开缝的方形贴片及旋转对称的弯曲辐射臂构成,辐射臂通过几何扰动改变电流路径,为电场正交分量提供 90° 相位差,从而实现圆极化辐射效果.天线辐射部分介质基板选用 Rogers 5880(介电常数为 2.2, $\tan\delta=0.0009$),厚度为 20 mil.

为了进一步说明天线的圆极化辐射机制,图 5 给出了一个周期内的矢量电流分布.在 2.6 GHz 和 3.5 GHz 两个频率处,一个周期内合成的电流矢量均呈现右旋圆极化.

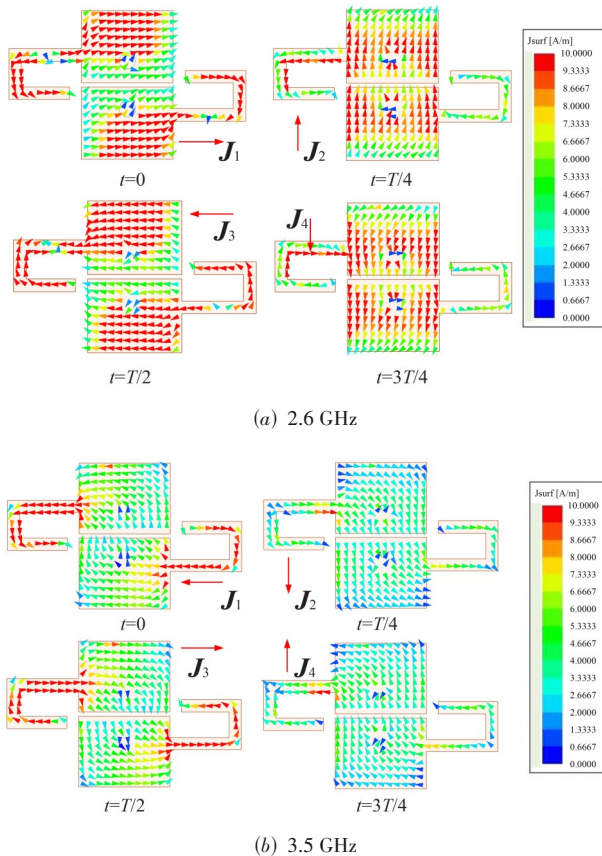


图 5 圆极化天线表面电流矢量分布

3.3 关键参数分析

天线馈电层“ I ”型空腔尺寸对天线输入阻抗的变化范围起主导作用,馈电网络物理参数及馈电点位置决定输入阻抗的具体数值.与传统单频 PAIA 设计不同,本设计需要系统评估双频模式下参数对阻抗分布的综合影响,以选取最优参数组合实现双频阻抗匹配.图 6 展示了固定“ I ”型空腔与馈电网络参数下,不同馈电位置对双频输入阻抗的影响.由于其结构对称,图中仅展示一半的结构.馈电点位置与耦合槽中心的距离定义为 L_s .当馈电位置向两侧偏移,即 L_s 增大时, $f_1=2.6$ GHz 对应的输入阻抗实部和虚部呈现出不同的变化规律,

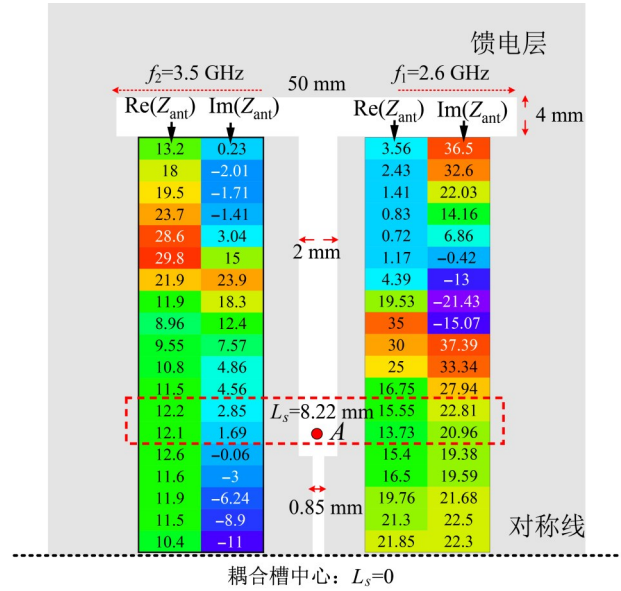


图 6 不同馈电点对应的阻抗

而 $f_2=3.5$ GHz 对应的输入阻抗实部和虚部整体先增大后减小.通过分析阻抗分布,选定满足双频匹配条件的馈电区域,如图 6 中的红色虚框所示,最终确定馈电点 A(即 $L_s=8.22$ mm)作为设计基准.

为优化匹配性能,系统分析了馈电结构参数对双频输入阻抗的影响,基于参数扫描的阻抗变化趋势,绘制馈电网络不同长宽时对应的阻抗分布热力图,如图 7 所示.图 7(a)和图 7(b)分别为天线阻抗在 f_1 处的实部和虚部,图 7(c)和图 7(d)分别为天线阻抗在 f_2 处的实部和虚部,通过 $\text{Min}\|Z_{\text{load,opt},f}^{\text{PA}} - Z_{\text{ant},f}^{\text{sim}}\|$ 准则,确定馈电网络长宽最佳参数范围,如图 7 黄色标选处,该点对应的双频实部和虚部均满足匹配要求.经迭代优化后,得到天线在两个频率的输入阻抗为 $Z_{\text{ant},f_1}^{\text{sim}}=13.2+j3$, $Z_{\text{ant},f_2}^{\text{sim}}=13.2+j3$,与 PA 双频最佳负载阻抗相匹配.

位于贴片边缘的旋转辐射臂结构可独立调控天线的辐射性能和圆极化特性,且对输入阻抗影响较小.图 8 展示了轴比和输入阻抗随辐射臂参数 W_m 变化的对比结果.当 W_m 在 13~18 mm 范围内变化时,两个频段的轴比呈现显著变化,而输入阻抗的实部和虚部保持稳定,验证了设计的有效性.最终,选择 $W_m=15$ mm 为最优值.其余参数如上述各图所示.

4 实验结果

4.1 测试结果

为验证设计方法的有效性,加工制作了实物进行测量验证.图 9 展示了实物结构:图 9(a)为底层正视图,集成 PA 晶体管、输入匹配网络、偏置路径、稳定电路以及天线馈电网络;图 9(b)为顶层正视图.多层 PCB 板通过螺钉固定,在微波暗室中进行测试.

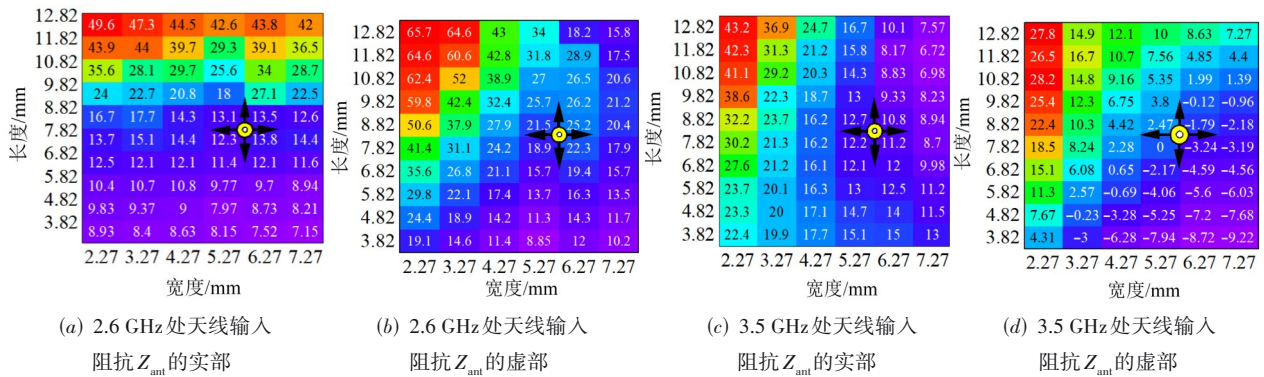


图7 馈电网络输入端口参数优化图

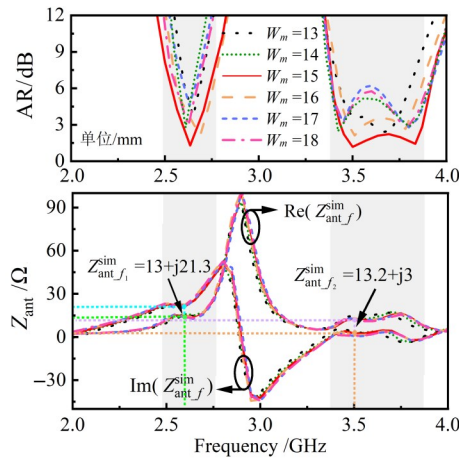


图8 参数 W_m 对轴比和阻抗的影响

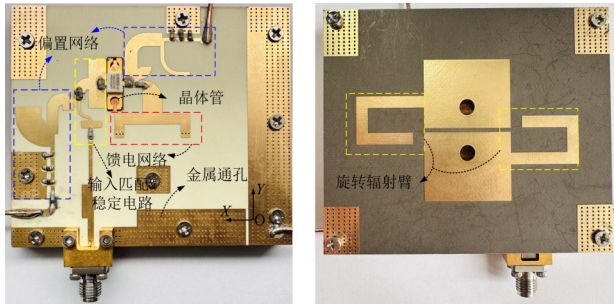


图9 功放集成天线的实物图

采用安捷伦 Agilent E8361C 矢量网络分析仪对 S 参数进行测量. 测试结果如图 10 所示, 在 2.4~2.65 GHz 和 3.4~3.7 GHz 频段的 $|S_{11}|$ 均小于 -10 dB, 与模拟仿真结果相接近, 双频匹配效果较好.

图 11 展示了 2.6 GHz 和 3.5 GHz 处仿真与实测结果的 xoz/yoz 面辐射方向图, 两者吻合较好. 交叉极化抑制均大于 15 dB, 显示出良好的圆极化效果.

图 12(a) 展示了 PAIA 在输入功率为 28 dBm (饱和时) 的等效全向辐射功率 EIRP 和有源增益 G_{ant} 的测试结果. 在 2.45~2.65 GHz 和 3.4~3.75 GHz 频段的有源增益均

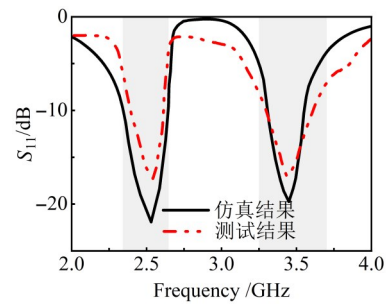
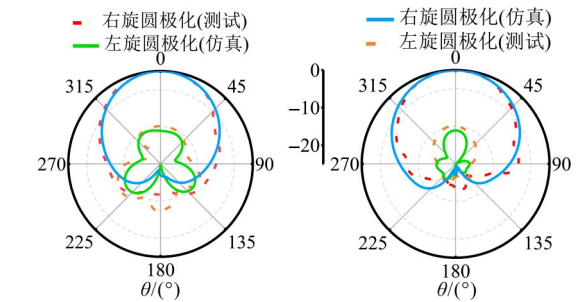
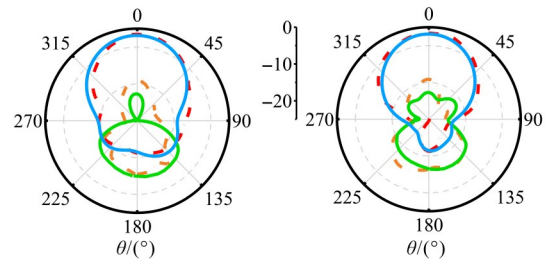


图10 S 参数的仿真与测试结果



(a) 3.5 GHz 的归一化辐射方向图 xoz 面 (b) 3.5 GHz 的归一化辐射方向图 yoz 面



(c) 2.6 GHz 的归一化辐射方向图 xoz 面 (d) 2.6 GHz 的归一化辐射方向图 yoz 面

图11 3.5 GHz 和 2.6 GHz 的归一化辐射方向图的 xoz 面和 yoz 面

高于 16 dBi, EIRP 大于 44 dBm. 天线和功放无缝集成, 无法单独测试天线的增益, 因此采用天线的仿真增益 G_{ant} (图 12(b)) 来估算 PAIA 输出功率 P_{out} ($P_{out} = EIRP - G_{ant}$). 图 12(c) 给出了 P_{out} 仿真和估测结果. 两个频段的饱和输

输出功率均大于 39.5 dBm,且带内输出相对平稳. 根据公式 $PAE = (P_{out} - P_{in})/P_{DC}$ 计算得出 PAIA 在饱和输入功率下的功率附加效率. 图 12(d)给出了 PAE 的仿真和测试值. 两个频段测试的 PAE 均高于 60%, 实现了良好的双频匹配性能. 图 12(e)为中心频点 2.6 GHz 和 3.5 GHz 处不同输入功率下 PAE 和 P_{out} 的仿真与测试结果. 实测 PAE 于 28 dBm 输入功率下分别达到饱和值 67% 和 71%, 与仿真数据吻合良好. 当输入功率超过 28 dBm 时, PAE 增长趋近于平缓, 主要受限于晶体管非线性特性和热效应.

4.2 性能比较与讨论

表 2 对比了本设计与现有 PAIA 设计的性能. 与文

献中提出的 PAIA 相比, 本文兼具双频最佳阻抗匹配与圆极化辐射特性, 在输出功率、效率、EIRP 等方面都具有较好的改善效果. 需要指出的是, 本设计选取的 2.6 GHz 和 3.5 GHz 两个频段仅是为了进行验证. 从实际应用角度来说, 这两个频段更多地用于 4G/5G 的移动通信, 该移动通信领域的天线采用线极化天线居多. 对于线极化天线与功放的集成设计, 亦可参考本文的集成方法. 不同的是, 线极化天线需要在保证天线极化纯度的基础上进行调控阻抗, 而圆极化天线则需要在兼顾轴比的情况下调节阻抗特性.

表 2 本工作的功放集成天线与其他高效率设计的结果对比

方法	频率/GHz	P_{out}/dBm	EIRP/dBm	PAE /%	圆极化/(CP)	多频
文献[10]	3.3~3.8	40.6	44.52	70.1	否	否
文献[11]	2~4	38.5	40.5	65.0	否	是
文献[18]	2.45	41.0	46.8	73.0	是	否
文献[19]	20	24.7	30.7	34.8	否	否
本文	2.6	41.5	46.0	67.0	是	是
	3.5	41.8	48.8	71.0		

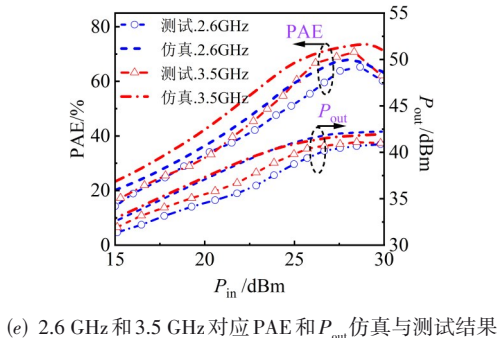
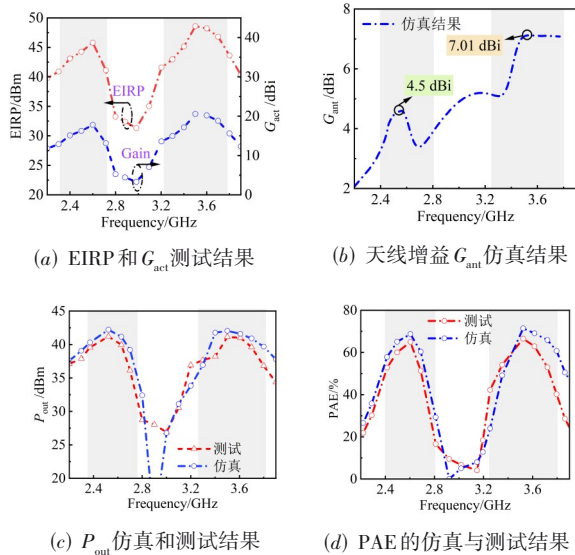


图 12 仿真与测试结果

上述采用功放与天线进行集成设计主要是面向发射机, 对于接收机来说, 通常采用低噪放与天线进行集成设计, 有助于改善接收机的噪声系数. 在具体设计时, 可以借鉴功放与天线的集成方式, 其区别在于: (1) 有源器件由功放替换为低噪放, 对于低噪放的最佳源阻抗选取, 需要综合噪声系数圆和增益圆来确定; (2) 天线由发射端变为接收端, 其阻抗要满足与低噪放的最佳源阻抗直接匹配, 实现集成设计. 与发射机的集成方法相同, 接收机天线的阻抗调控仍需要在保证极化特性的前提下进行.

5 结论

本研究设计了一款直接集成的双频功放-圆极化天线, 通过该集成结构实现双频段最佳阻抗匹配与稳定的圆极化辐射效果, 同时消除了传统双频功放输出匹配网络引入的损耗, 提升射频系统传输效率和稳定性. 整体电路采用上下紧凑布局, 大幅减少了版图尺寸成本, 同时降低了电路微带对天线辐射层的干扰. 实测与仿真结果吻合良好, 在 2.6 GHz 和 3.5 GHz 两个中心频处, 饱和 EIRP 分别为 46 dBm 和 48.2 dBm, 对应的 PAE 分别达到 67% 和 71%. 与此同时, 该功放-天线集成电路维持优异的圆极化辐射特性, 3 dB 轴比与阻抗匹配重叠带宽分别达到 200 MHz 和 300 MHz. 结果表明, 该双频功放-圆极化天线高度集成方案兼具可行性与高效性.

参考文献

- [1] ZHANG H, GUO Y X, ZHONG Z, et al. Cooperative integration of RF energy harvesting and dedicated WPT for wireless sensor networks[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2019, 29(4): 291-293.
- [2] NALLANDHIGAL S N, WU K. Unified and integrated circuit antenna in front end: A proof of concept[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(1): 347-364.
- [3] ZHU D F, ZHONG S C. A 1.3/2.8 GHz high efficiency dual-band GAN power amplifier[C]//2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium. Piscataway: IEEE, 2019: 1-3.
- [4] WU R, LIN J H, LI J F, et al. Wideband circularly polarized antenna with novel asymmetric Y-shaped arms[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(4): 1181-1185.
- [5] ZHANG K, SÄRESTÖNIEMI M, MYLLYMÄKI S, et al. A wideband circularly polarized antenna with metasurface plane for biomedical telemetry[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(6): 1879-1883.
- [6] SUN X Y, WU B, ZHANG H H, et al. Ultrawideband circularly polarized halved-type Vivaldi antenna with symmetrical radiation pattern[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(2): 633-637.
- [7] TAN Q Q, FAN K K, YU W L, et al. A circularly polarized magneto-electric dipole antenna array with wide AR and impedance bandwidth for millimeter-wave applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(9): 2250-2254.
- [8] 王亨辉, 孙胜. 基于槽线的圆极化漏波天线研究[J]. *电子学报*, 2024, 52(5): 1442-1449.
WANG H H, SUN S. Research on circularly polarized leaky-wave antenna based on slotline[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(5): 1442-1449. (in Chinese)
- [9] LU Y L, LIU Q, WANG Y, et al. Seamless integration of active antenna with improved power efficiency[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 48399-48407.
- [10] LIU W L, DENG J Y, YI C P, et al. Class-F-1 GaN power amplifier integrated active antenna with increased efficiency for wireless power transmission applications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(3): 2486-2497.
- [11] HUANG M Y, LU Y L, ZHU Q, et al. Highly integrated PA-PIFA with a wide frequency tuning range[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(8): 1433-1437.
- [12] AN N, ZHANG Y. Dual-band dual-sense circularly polarized antenna utilizing a radiating slot antenna as feeding structure[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(4): 1321-1325.
- [13] AYYADEVARA M V N M, NAGA KISHORE B S, MIDASALA V D, et al. Circularly polarized dual-frequency MIMO antenna with cosecant-squared radiation pattern for ku-band applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(6): 1341-1345.
- [14] KANG Y X, LIN X Q, LI Y, et al. Dual-frequency retro-directive antenna array with wide dynamic range for wireless power transfer[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(2): 427-431.
- [15] XIONG L, AN W X, DENG C J, et al. A ka-band dual-band reflectarray antenna with solar cells[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(6): 1889-1893.
- [16] LIAO W C, VILENSKIY A R, MAASKANT R, et al. mmWave metal bowtie slot array element integrating power amplifier MMIC via on-chip probe to enhance efficiency and bandwidth[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(9): 8110-8121.
- [17] 蔡奇, 朱浩慎, 曾丁元, 等. 基于0.15 μm -GaN工艺的输入输出谐波调谐高效率功率放大器设计[J]. *电子学报*, 2024, 52(7): 2320-2330.
CAI Q, ZHU H S, ZENG D Y, et al. Design of a high efficiency power amplifier with both output and input harmonic tuning in 0.15 μm -GaN technology[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(7): 2320-2330. (in Chinese)
- [18] LAI C J, CHEN H Q, DU Z X, et al. An inverse class-F circularly polarized active integrated antenna[C]//2024 IEEE 10th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Piscataway: IEEE, 2024: 1-3.
- [19] LIAO W C, MAASKANT R, EMANUELSSON T, et al. A directly matched PA-integrated K-band antenna for efficient mm-wave high-power generation[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(11): 2389-2393.
- [20] IUPIKOV O A, PEREZ-CISNEROS J R, MEYER P, et al. A cavity-backed patch antenna with distributed multiport feeding, enabling efficient integration with Doherty power amplifier and band-pass filter[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(8): 4412-4422.

作者简介



叶 敏 女,2000年出生于江苏省宿迁市。现为宁波大学信息科学与工程学院电子信息硕士研究生。主要研究方向为射频电路、电路-天线高效集成。

E-mail: 2211100166@nbu.edu.cn



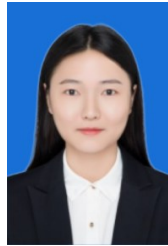
黄季甫 男,1960年出生于江苏省无锡市。现为宁波大学信息科学与工程学院教授。主要研究方向为微波与毫米波电路与系统、阵列天线。

E-mail: huangjifu@nbu.edu.cn



陆云龙 男,1984年出生于浙江省湖州市。现为宁波大学电子信息科学与技术学科教授。主要研究方向为微波/毫米波电路集成与器件、天线阵列及多端口滤波网络。中国电子学会会员编号:E190033751M。

E-mail: luyunlong@nbu.edu.cn



孙立莹 女,1995年出生于山东省潍坊市。现为宁波大学信息科学与工程学院博士研究生。主要研究方向为相控阵天线、射频电路和天线高效集成。

E-mail: 2201100038@nbu.edu.cn