

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104527

面向 5G 基站的射频功率放大器设计与实现 *

肖曼琳¹ 杜鑫威¹ 蔡丽媛² 雍伟³(1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院 上海 201620; 2. 飞骧科技(无锡)有限公司 无锡 214026;
3. 苏州能讯高能半导体有限公司 上海 201203)

摘要:近年来随着5G基站的全面投入使用,针对S波段功率放大器的各项指标又提出了更高的应用需求。为了满足高增益,高效率,宽频带、大功率、小型化等需求,本文在阶跃式匹配电路的基础上,采用并联开路微带线的方法,设计了一款工作在3.4~3.6 GHz的射频功率放大器。本次设计所采用的设计方法解决了晶体管动态阻抗难以精确测试,仿真与实测存在差距等问题。在本设计中,输入输出匹配网络采用并联开路微带线并且通过改变开路微带线的物理长度与宽度,使匹配网络处于动态匹配状态,有利于后期调试电路,从而确定最佳匹配电路。同时,微带线的采用使得整个电路更加小型化。为验证方案的可行性,本文采用了CREE公司的CGHV40030F晶体管设计了一款工作在3.5 GHz的射频功率放大器,并进行硬件制作与测试。仿真与测试结果均表明,该设计方法易于电路调试,便于准确地确定匹配网络,实测结果逼近仿真结果,幅度失真小于1,相位失真小于5°/dB,S11小于-5.1 dB,S12大于18.3 dB,输出功率大于45 dB,增益大于12 dBm,漏极效率大于66%等各项性能指标良好。

关键词:射频功率放大器;5G基站;匹配网络;开路微带线

中图分类号: TN722.75 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.5015

Design and implementation of radio frequency power amplifier for 5G communication base station

Xiao Manlin¹ Du Xinwei¹ Cai Liyuan² Yong Wei³(1. School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2. Feixiang Technology (Wuxi) Co., Ltd., Wuxi 214026, China; 3. Dynax Semiconductor Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: In recent years, with the full use of 5G base stations, higher performance of the S-band power amplifier has been required. In order to meet the needs of high gain, high efficiency, wide bandwidth, large power, miniaturization and so on, this paper designs a radio frequency power amplifier worked at 3.4~3.6 GHz with the parallel open circuit microstrip method based on the step matching circuit. The design method proposed in this paper aims to solve the difficulty of accurate measurement to the dynamic impedance of transistor and the non-negligible difference between theory simulation and practical testing. In this design, the input and output matching network always remain in a dynamic matching condition by utilizing the parallel open circuit microstrip with the adjustable physical length and width. This kind design is beneficial for the later debugging circuit to reach the best matching state. In order to verify the feasibility of the design scheme, this paper designs a radio frequency power amplifier operating at 3.5 GHz with CREE CGHV40030 and completes circuit implementation and test. The simulation and test results demonstrate that it's easy to debug circuit, determine the optimum matching network, realize the test results very closed to the simulation results and obtain good performance by utilizing the proposed design method. The AM-AM distortion is less than 1, the AM-PM distortion is less than 5°/dB, S11 is less than -5.1 dB, S12 is larger than 18.3 dB, the output power is larger than 45 dB, the gain is larger than 12 dBm, and the drain efficiency is larger than 66%.

Keywords:射频功率放大器;5G通信基站;网络匹配;开路微带线

0 引言

射频功率放大器作为无线通信基站系统中核心器件,其性能指标影响着整个无线通信系统的工作性能,故设计一款性能良好的射频功率放大器具有十分重要的意义。随着近年来无线通信技术在军事、民用、卫星、海洋等领域的应用愈来愈多^[1-2],不同应用下对射频功率放大器的带宽、线性度、功率和效率等性能指标提出了不同的要求,因此从设计、实现到测试也有相应的重点和难点^[3-5]。特别地,以面向 5G 通信的基站射频功率放大器受到越来越多的关注。在 2017 年国际移动通信发布的 5G 频谱白皮书中指出,3 300~4 200 MHz 频段为连续 5G 频谱^[6]。2019 年,工业和信息化部发文明确 3 300~3 600 MHz 和 4 800~5 000 MHz 频段作为 5G 系统的工作频率^[7]。所以,面向 5G 工作频段设计实现射频功率放大器具有十分重要的意义。

目前针对无线通信应用,L、S、C 波段的功放研究也收到学界和业界的广泛关注,主要是从提高功放的增益和效率,减小功放的非线性失真,小型化设备等几个方面展开。文献[2]在 S 波段对功放的非线性部分进行良好的估计,然后通过高增益温补放大电路和预失真补偿电路完成整体电路设计,但电路相对复杂,虽然线性度指标 AM-AM,AM-PM 较好,但是功放的效率不高仅为 35%。工作在 L 频段的文献[8]虽然采用集总电路对设备进行了小型化,但是由于其采用的器件 Q 值不够高,导致高频电路衰减大,使得整个电路的带宽较窄,工作频率偏向低频部分。文献[9]采用了大信号模型和负载牵引技术,获得了较好的效率 76%,但是在低频和高频处有明显的效率和功率的下降,仅为 10% 和 30 dBm。文献[4]进行了稳定性设计,负载牵引和内匹配设计等,使得功放有相对较好的输出功率和效率,但其增益 16 dB 还达不到应用预期水平。

本文在 5G 工作 S 频段 3.4~3.6 GHz,针对基站所要求的输出功率、效率、增益、线性度等指标,采用 Cree 公司的 CGHV40030 晶体管,基于 ADS (advanced design system) 仿真平台设计了一款射频功率放大器。考虑到基站对功放的线性度要求较高,故本设计中牺牲小部分效率让射频功放管工作在 AB 类。同时,AB 类设计又是在设计 Doherty 结构的功放时,其主功放设计的重要技术环节^[3],故展开对 AB 类功放性能的研究与设计仍十分必要。进一步,本文针对晶体管动态阻抗难以精确测试^[10],仿真与实测差距较大等问题^[11],输入输出匹配网络采用并联开路微带线,通过改变开路微带线的物理长度与宽度,使匹配网络处于动态匹配状态,有利于后期电路调试,从而确定最佳匹配电路,使电路性能指标达到预

期要求。

1 射频功率放大器

1.1 功率放大器分类

功率放大器根据功放偏置电压和输出负载电路特性不同,可以将功率放大器工作状态分为 A 类、B 类、AB 类、C 类、D 类、E 类和 F 类等^[12-13]。通过设置功放偏置电压,对功放管的导通周期进行控制,当线性功率放大器在输入信号的整个周期内导通时,称为工作在 A 类。当功放在半个周期内导通,称为工作在 B 类。当功放导通周期处于 A 类和 B 类之间时,称为工作在 AB 类。

图 1(a) 表示线性功率放大器静态工作点处的 $i_D - v_{GS}$ 图,偏置电路的栅极电压 v_{GS} 控制功放管处偏置在不同的工作状态不,使其静态工作点处于不同位置。图 1(b) 表示 $i_D - v_{GS}$ 输出特性曲线,不同静态工作点处的输出特性曲线各不相同。由图 1 可知当信号波形位于 v_{DS} 横坐标下方时,信号无法通过功放被放大输出。

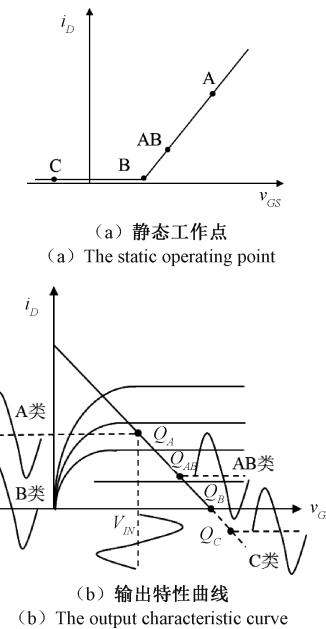


图 1 线性功率放大器静态工作点和输出特性曲线

Fig. 1 The static operating point and the output characteristic curve of the linear power amplifier

具体而言,A类功放的静态工作点较高,故全部波形可以通过晶体管放大,导通角为 360°;AB类功放静态工作点低于 A类,大部分波形可以通过放大,部分波形无法输出,导通角为 180°~360°;B类功放静态工作点低于 AB类,半波形可以通过,导通角为 180°;C类功放静态工作点低于 B类,仅有小部分波形可以通过放大,导通角小于 180°^[14]。综上所述,工作在不同区域的功率放大器,

具备不同的电气特性,表 1 总结了功放在不同区域的导通角度及理想效率。

表 1 4 类线性功率放大器的基本特性

Table 1 Basic characteristics of four types of the linear power amplifiers

分类	A	B	AB	C
导通角(2θ)/(°)	360	180	180~360	<180
最大效率(η)/%	50	50~78.5	78.5	78.5~100

从表 1 中可以看出,当功放工作在 A 类时,导通角最大,故其线性度最高,由于在工作过程中功放管一直处于导通状态,其效率最低。当功放工作在 C 类时,其最大效率可以超过 78.5%,甚至接近 100%,但是其导通角度受限,其线性度随之降低。而 AB 类功放可以在满足最大效率约为 78.5% 时,保证较高的导通角,从而保证其线性度的需求^[15]。而 D 类功放已经不再具备放大功能而是开关的作用。针对 5G 通信中信号带宽大大增加,峰均比相较于前几代通信信号也大幅度提高,故对射频功放的线性度提出了更高要求。因此,针对 5G 基站的射频功放需求,在确保线性度的前提下尽可能提高效率,故本设计选择功放工作在 AB 类。

1.2 开路微带线

在做匹配网络设计时,通常采用分立元件构成的 II 形、L 形、T 形等匹配网络,或阶跃式的微带线^[16]。在硬件调试阶段,往往需要反复改变匹配电路以确定最佳匹配网络。故需要匹配电路敏感部分方便可调,处于动态可调状态。一般采用的匹配方法可调性不强,操作不便。然而,在匹配电路中开路微带线为较为敏感部分,对放大器性能参数影响较大,且通过改变其物理长度和宽度可方便地确定最佳匹配电路。因此本文采用在阶跃式微带线上并联开路微带线的方法,解决后期调试问题。

开路微带线指传输线终端开路^[17]。此时,若传输线

长度 l 满足 $\frac{n}{2} < l < \frac{n\lambda}{2} + \frac{1}{4}\lambda$, 其输入阻抗 Z_{in} 为:

$$Z_{in} = -jZ_0 \cot \beta l = -jZ_0 \cot \frac{2\pi l}{\lambda} = -jX_{in} \quad (1)$$

其中, Z_0 表示传输线特征阻抗, X_{in} 为输入电抗, λ 为波长, n 可取 0、1、2 等整数。当采用终端开路的不同长度的传输线代替并联电容元件时,在 Smith 圆图上顺时针转动完成匹配,输入阻抗为:

$$\begin{cases} Z_{in} = -jZ_0 \text{ 等价为电容}, l = \frac{1}{8}\lambda \\ Z_{in} = jZ_0 \text{ 等价为电感}, l = \frac{3}{8}\lambda \\ Z_{in} = 0 \text{ 等价为短路}, l = \frac{1}{4}\lambda \end{cases} \quad (2)$$

根据分析,采用开路微带线时,改变微带线长度可产生不同的输入阻抗,可有效地改变匹配电路参数。

2 设计与仿真

2.1 工作条件

本文基于 ADS(advanced design system) 仿真平台进行设计,选定偏置使功放在 AB 类工作状态,设计一款面向 5G 工作在 3.4~3.6 GHz 频段的射频功率放大器。本设计采用 Cree 公司的 CGHV40030 晶体管,该晶体管属于新一代高电子迁移率 GaN 晶体管,具有较高的功率密度,输出功率大,效率高。本设计考虑到匹配电路动态可调性便于确定最佳匹配电路,从而在在匹配网络中采用并联开路微带线的设计方法。采用 Rogers4350B 板材,介电常数 $\epsilon_r = 3.66$,厚度 $H = 20$ mil,铜箔厚度为 35 μm 。在调试时,通过改变开路微带线的物理长度和宽度来确定匹配电路,这样更加有利于调试,从而达到最佳配置状态。

2.2 匹配网络设计

良好的匹配网络可以使输出端获得最大功率输出,从而实现最大功率传输,所以将采用并联开路微带线的方法,实现调试过程中确定最佳匹配电路。首先基于 ADS 通过负载牵引与源牵引计算得到最佳源阻抗与负载阻抗,分别为 $2.53-j \cdot 9.01\Omega$ 、 $7.32+j \cdot 4.58\Omega$ 。然后,通过 Smith 圆进行共轭匹配,从而实现最大功率传输。众所周知,通过仿真设计完成的匹配电路,在实际制版后还需要大量的调试才能实现匹配,让功放管工作在最佳状态。而调试的过程,通常需要花费有经验的工程师的大量时间和精力。为缩短功放的开发时间,在设计匹配电路时充分考虑到上述问题,故在阶跃式电路的基础上并联开路微带线,使匹配网络处于动态匹配状态,以便于后期调试电路,从而快速确定最佳匹配电路。

本次设计中偏置电路微带线宽度根据电流的大小确定,栅极和漏极偏置电路的微带线宽度均为 1 mm。通过设计与电路优化,射频功率放大器的输入输出匹配网络如图 2 和 3 所示。

图 4、5 是在输出匹配网络中心频点 3.5 GHz 时,对匹配电路的仿真。仿真结果表明,输入匹配电路 S11 为 -29.109 dB, S21 为 -0.083 dB, 输出匹配电路 S11 为 -30.4 dB, S21 为 -0.111 dB, S 参数仿真结果符合工程设计要求。

2.3 功放电路性能仿真

通过 Smith 圆图解法确定匹配电路后,可完成整个射频功率放大器的电路设计,并对整体电路进行反复优化后,最终整体电路图如图 6 所示。利用 ADS 仿真平

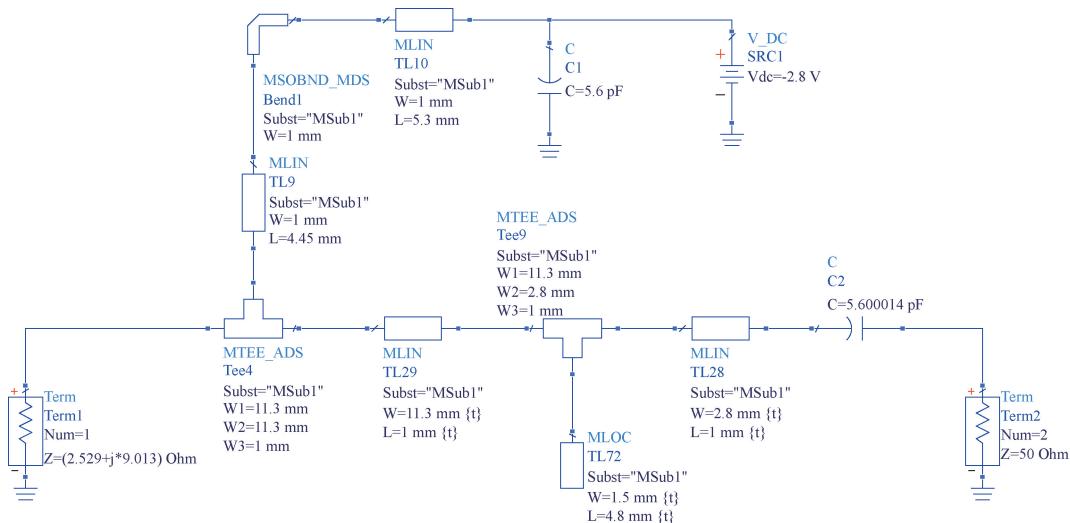


图 2 输入匹配电路

Fig. 2 The input match circuit

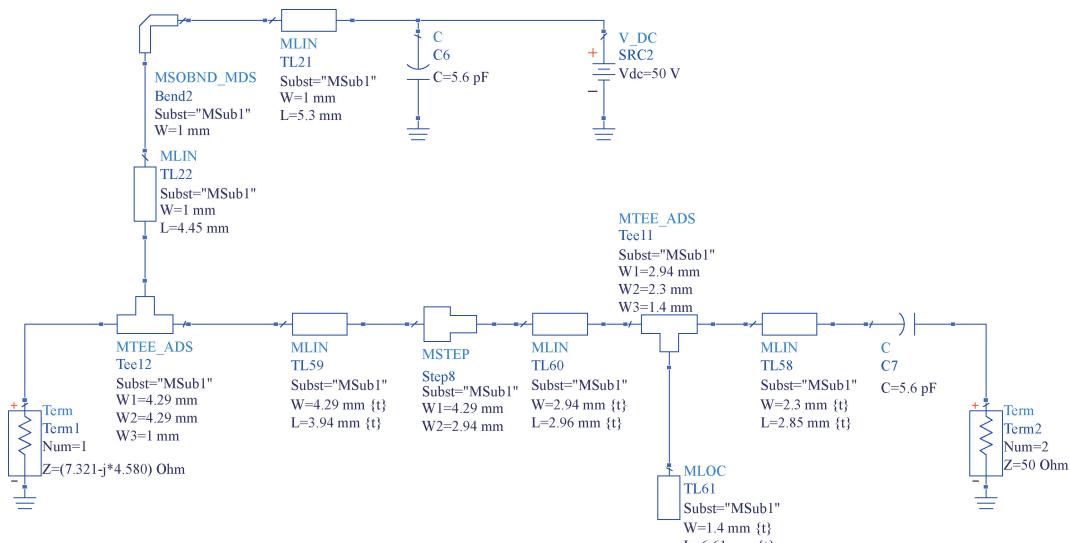


图 3 输出匹配电路

Fig. 3 The output match circuit

台,本文分别对射频功率放大器进行小信号和大信号仿真,其仿真结果如图 7、8、9 所示。

从图 7 的小信号仿真结果可知 S11 在 3.5 GHz 频点处小于 -10 dB , S21 为 17.812 dB 。针对大信号仿真,图 8 展示了增益随输出功率变化曲线,可以看出在 3.5 GHz 频点处,饱和输出功率为 46.443 dBm 时,饱和点的增益可达 11.043 dB ;图 9 展示了效率随输出功率变化曲线,可以看出在饱和点 46.443 dBm 时,对应的漏极效率为 74.328% 。仿真结果均到达设计指标,为后续电路现实奠定了良好的理论基础。

在完成大小信号仿真后,本文对射频功率放大器进

行线性度仿真。本次实验主要针对由 AM-AM 和 AM-PM 效应而引起的线性度下降进行失真度仿真。当一个幅度变化的信号经过一个非线性系统时,如果系统的增益随着输入信号幅度的变化而变化,那么输出信号与输入信号不成线性关系,这种现象被称为 AM-AM 失真。对于理想的功率放大器而言,输入信号和输出信号的相位差应该是零或者是一个常数,即输出信号相对于输入信号而言是经过了一个固定时间的延时。输入和输出信号之间的相位差随着输入信号幅度的变化而变化的效应被称为 AM-PM 失真。

由图 10 可知随着输入功率不断增加,幅度失真小

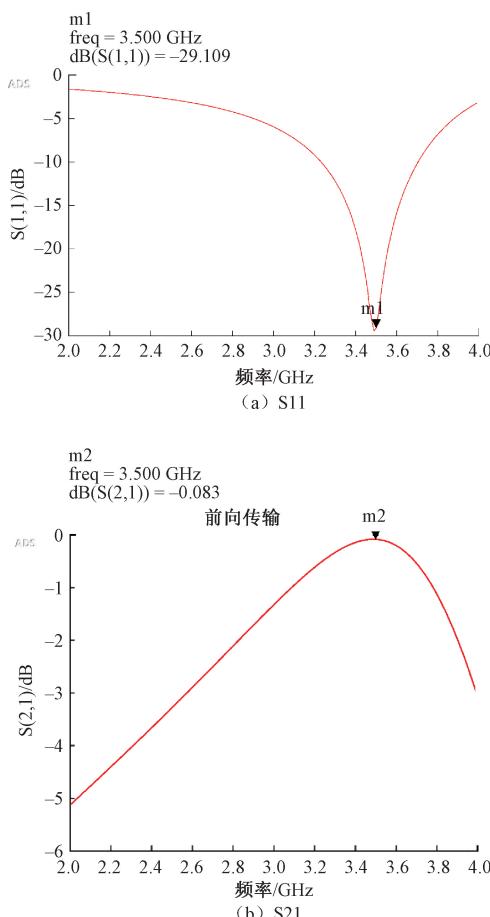


图 4 输入匹配电路仿真结果

Fig. 4 The simulation of the input match circuit

于 1,由图 11 可知随着输入功率不断增加相位失真不超过 5°。在工程上要求良好的线性度幅度失真不超过 1,相位失真要求在 P_{1dB} 时小于 5°/dB。对照该要求,本文设计的 AB 类功率放大器具有良好的线性度。

3 硬件测试与性能分析

3.1 硬件实现

在进行功放版图设计之前,要求功放信号原理图仿真已满足性能指标设计要求。如第 2 节所述的射频功放电路,原理图仿真已达到设计要求,现将确定的射频功放电路原理图转化为微带线版图,如图 12 所示。在版图绘制中不但要考虑到如设计后的微带线电路、固定孔、地孔、功放管封装槽等各个部件的实际物理尺寸,还要考虑到电磁干扰问题和调试时的可操作性,从而确定这些部件之间的距离和安装位置。

将功放管、隔离电容、耦合电容、螺丝等焊接安装在制作好的功放版图上,如图 13 所示。对完整的功率放大器进行信号测试,在实物调试过程中,为了使功放管工作

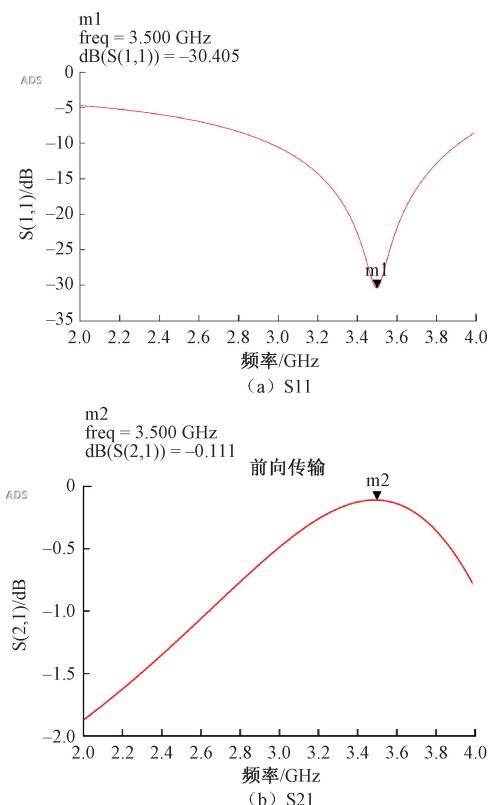


图 5 输出匹配电路仿真结果

Fig. 5 The simulation of the output matching circuit

到最佳状态,可不断观测输出信号的测试结果,并结合实际调试经验,反复对开路微带线进行物理尺寸的改变,即微调其阻抗,从而确定更加准确的匹配电路,获得更加优良的测试结果。

3.2 驻波测试结果

本文利用两路直流电源(Agilent E3631A 和 N5767A)分别提供栅压和漏压,通过网络分析仪(R&S ZNB 8)对放大电路的主要小信号测试指标——驻波比 S11 和 S21 进行测试,其结果如图 14 所示。由图可知分别对感兴趣的 3 处频点 3.4、3.5、3.6 GHz 进行测试,S11 在 3 个频点处分别为 -5.8、-5.7 和 -5.1 dB。S21 在 3 个频点处分别为 18.3、18.4、18.3 dB,上述指标均满足射频功放的性能指标要求。

3.3 功放放大信号测试结果

满足驻波测试之后,搭建大信号测试平台包括直流电源、信号源(Agilent N5182A)、频谱仪(Keysight N9020A)、功率计(R&S NRP2)和衰减器(上海华湘 WDT5100-30dB),并进行相同频点的大信号测试,测试结果如图 15 和 16 所示。图 15 为增益随输出功率的变化曲线,图 16 是效率随输出功率的变化曲线。由测试结果可知该射频功放在 3.4 GHz 工作频点处的饱和输出功



图 6 射频功放整体电路

Fig. 6 The schematic of the RF power amplifier

率 46.11, 增益 14.2, 漏极效率 74.12%, 3.5 GHz 工作频点处的饱和输出功率 46.02 dBm, 增益 12.06 dB, 漏极效率 74%, 3.6 GHz 工作频点处的饱和输出功率 45.44 dBm, 增益 12.03 dB, 漏极效率 66.75%。

3.4 测试结果分析

本文以 3.5 GHz 为例, 对比仿真结果和实物测试结果, 如表 2 所示。实物测试的饱和输出功率略低于电路原理图仿真 0.42 dB, 饱和效率略低于 0.3%。这一结果

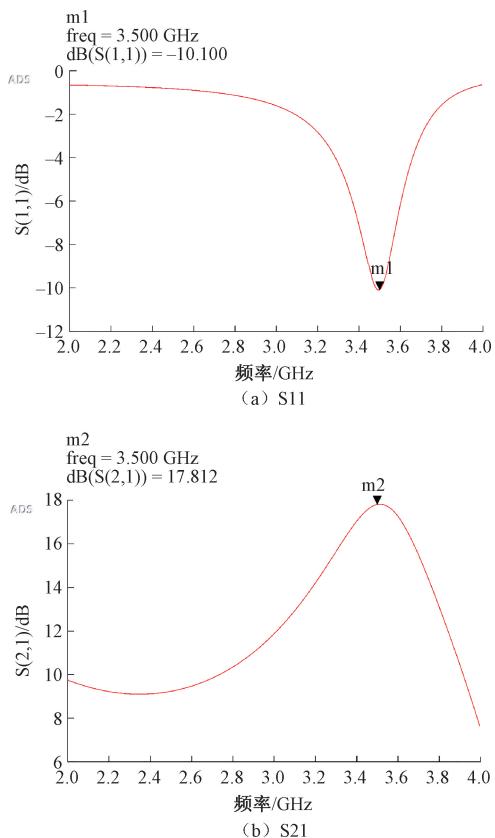


图 7 整体电路小信号仿真结果

Fig. 7 The small signal simulation

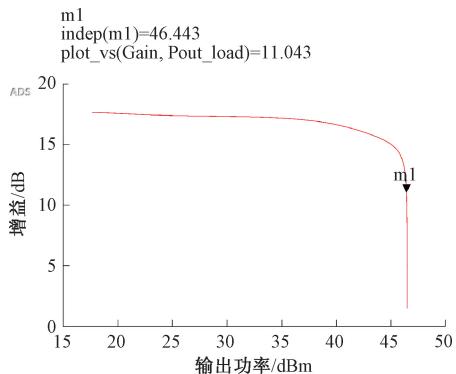


图 8 增益仿真结果

Fig. 8 The gain simulation

说明在匹配电路设计时, 若采用并联开路微带线方法, 有利于后期硬件调试, 使得调试后的电路非常接近预期设计结果。虽然实物测试的整体结果略差于电路仿真, 这是由于电路损耗、加工误差、分立元件的寄生效应, 网路测试设备校准不确定性^[18-20]等原因。实物测试结果十分逼近电路仿真结果, 证明该方法的有效性。表 2 也展示了和相似频段的其他工作相比较的结果。从结果可以看出, 虽然工作带宽窄于文献[2] 和文献[5], 但本设计中

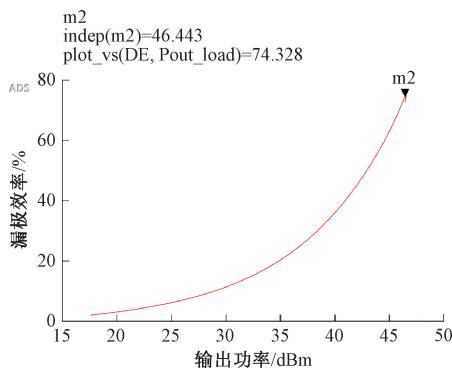


图 9 漏极效率仿真结果

Fig. 9 The drain efficiency simulation

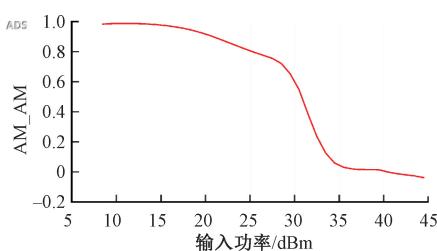


图 10 AM-AM 仿真

Fig. 10 The AM-AM simulation

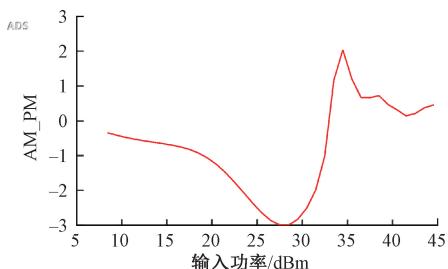


图 11 AM-PM 仿真

Fig. 11 The AM-PM simulation

的放大器的工作频带更高,设计的难度更大。本工作相较于其他工作,饱和输出功率和漏极效率都明显优势,满足设计需求。

表 2 3.5 GHz 仿真、实测和其他工作的性能指标比较

Table 2 The comparison of the simulation and measured performance at 3.5 GHz with other work

性能指标	工作频率/GHz	饱和输出功率/dBm	饱和效率/%
文献[2]	2.0~4.0	42.5~44	33.2
文献[4]	0.9~1.1	43.2	47
文献[5]	0.5~2.5	42~44	46~50
本文仿真	3.4~3.6	46.44	74.3
本文实测	3.4~3.6	46.02	74

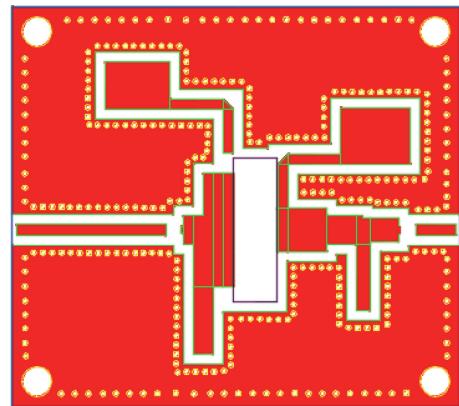


图 12 射频功放版图

Fig. 12 The layout of the RF power amplifier

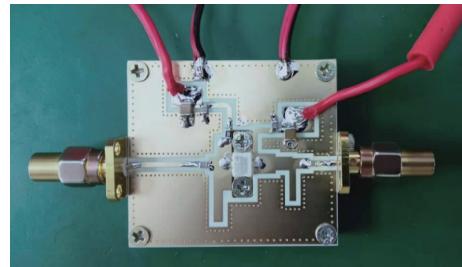


图 13 射频功率放大器实物图

Fig. 13 The Photo of the RF power amplifier



图 14 小信号测试结果

Fig. 14 The small signal test on broad

4 结 论

本文设计了一款面向 5G 频段的基站射频功率放大器。针对晶体管动态阻抗难以精确测试,仿真与实测差距大等问题,本文在设计输入输出匹配网络时采用并联开路微带线的方法使匹配网络处于动态匹配状态,以便于后期调试电路,容易通过简单改变微带线物理尺寸的方法确定最佳匹配电路。从测试结果可以看出,其性能参数接近仿真结果。该方法的使用为提高调试效率提供了可靠方法,同时为设计高效率射频功放打下了坚实

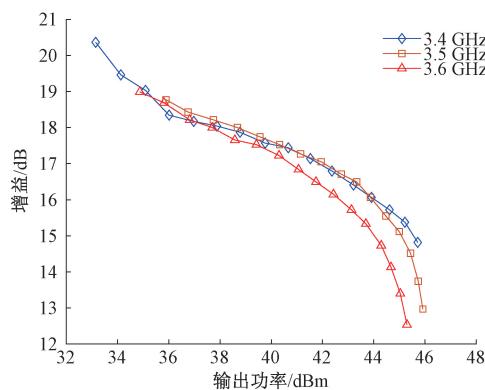


图 15 增益测试结果

Fig. 15 The gain test on broad

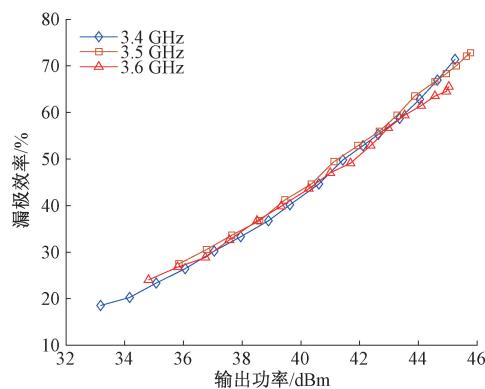


图 16 漏极效率测试

Fig. 16 The drain efficiency test on broad

基础。

参考文献

- [1] 孙昊. 5G 通信测试技术发展分析 [J]. 外国电子测量技术, 2019, 38(7): 17-21.
- SUN H. Development analysis of 5G communication testing technology [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(7): 17-21.
- [2] 菊卫东, 汪蕾, 王宇明, 等. 星用 S 频段 20 W 高增益线性化功率放大器的研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(8): 850-856.
- JU W D, WANG L, WANG Y M, et al. Research on S-band high-gain and linearity SSPA for satellite with 20W output power [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(8): 850-856.
- [3] 蔡丽媛, 肖曼琳, 雍伟, 等. 3.3~3.7GHz 宽带非对称 Doherty 率放大器设计 [J]. 电子测量技术, 2020, 43(17): 25-29.
- CAI L Y, XIAO M L, YONG W, et al. Design of 3.3~3.7 GHz broadband asymmetric Doherty power amplifier [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(17): 25-

29.

- [4] 高岩, 江肖力, 韩威, 等. L 频段 GaN 内匹配功率放大器研制 [J]. 电子测量技术, 2020, 43(20): 10-15.
- GAO Y, JIANG X L, HAN W, et al. Development of L-band GaN internally-matched power amplifier [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(20): 10-15.
- [5] 王利斌, 陈海波. 一种基于 GaN 的宽带功率放大器的设计与分析 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(9): 95-99.
- WANG L B, CHEN H B. Design and analysis of broadband power amplifier based on GaN [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39 (9): 95-99.
- [6] CHETTRI L, BERI R. A comprehensive survey on Internet of Things (IoT) toward 5G wireless systems [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(1): 16-32.
- [7] CHEN S, SUN S, KANG S. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G [J]. China Communications, 2020, 17(12): 156-171.
- [8] 孔娃, 夏景, 施丽娟, 等. 基于滤波匹配网络的连续逆 F 类功率放大器 [J]. 微电子学, 2017, 47(4): 469-472.
- KONG W, XIA J, SHI L J, et al. A continuous inverse class F power amplifier based on filtering matching network [J]. Microelectronics, 2017, 47(4): 469-472.
- [9] 黄发良, 游彬. 基于动态负载线 GaN HEMT 模型的谐波调谐功放设计 [J]. 电子技术应用, 2020, 46 (2): 48-52.
- HUANG F L, YOU B. Design of harmonic tuned power amplifier based on dynamic load-line GaN HEMT model [J]. Electronic Technology Application, 2020, 46(2): 48-52.
- [10] SUTULA S, DEI M, TERÉS L, et al. Variable-mirror amplifier: A new family of process-independent class-AB single-stage OTAs for low-power SC circuits [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2016, 63(8): 1101-1110.
- [11] KIM J, SONG S, ROH J. A high slew-rate enhancement class-AB operational transconductance amplifier (OTA) for switched-capacitor (SC) applications [J]. IEEE Access, 2020, 8: 226167-226175.
- [12] SILVA-MARTINEZ J, YAN T, JIANG J, et al. Efficient broadband class AB amplifier [C]. 2019 IEEE 62nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Dallas, TX, USA, 2019:1045-1048.
- [13] 王浩全, 郭昊, 郝明丽. 2~6 GHz 宽带功率放大器模块设计 [J]. 电子技术应用, 2017, 43(7): 8-10, 15.

- WANG H Q, GUO H, HAO M L. Design of a 2~6 GHz broadband power amplifier module [J]. Electronic Technology Application, 2017, 43(7) : 8-10, 15.
- [14] NGUYEN P, PHAM A. An ultra compact watt-level Ka-band stacked-FET power amplifier [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016, 26 (7) : 516-518.
- [15] GADALLAH A, ALLAM A, ABDEL-RAHMAN B, et al. A high-efficiency low-power 2.4 GHz class AB PA for WBAN applications using load pull [C]. 2017 Japan-Africa Conference on Electronics, Communications and Computers (JAC-ECC), Alexandria, Egypt, 2017: 29-32.
- [16] SURKANTI R, PATIL A, PAKALA H, et al. High bandwidth class-AB amplifier with high slew rate and fast current sensing for envelope tracking applications [C]. 2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Boston, MA, USA, 2017: 1220-1223.
- [17] YANG Y, CHOI K, WELLER P. DC boosting effect of active bias circuits and its optimization for class-AB InGaP-GaAs HBT power amplifiers [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 2004, 52: 1455-1463.
- [18] 郭庭铭, 苏江涛, 刘军, 等. 宽带矢量网络测试的 TRM 校准方法不确定度分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8) : 79-85.
- GUO T M, SU J T, LIU J, et al. Uncertainty analysis of TRM calibration method for broadband vector network measurement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8) : 79-85.
- [19] 何怡刚, 孙豪, 袁伟博, 等. 功率半导体器件栅氧化层状态监测方法综述与展望 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(11) : 1-11.
- HE Y G, SUN H, YUAN W B, et al. Review and prospect for condition monitoring method of power semiconductor devices gate oxide [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(11) : 1-11.
- [20] 林茂六, 张亦驰, 张喆, 等. 基于混频器的非线性矢量网络分析仪双端口校准方法 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10) : 2386-2393.
- LIN M L, ZHANG Y CH, ZHANG ZH, et al. Two-port calibration methods for mixer based nonlinear vector network analyzer [J]. Chinese Journal of Scientific

Instrument, 2010, 31(10) : 2386-2393.

作者简介

肖曼琳(通信作者), 2003, 2006, 2013 年分别于电子科技大学分别获得学士, 硕士, 博士学位, 现为上海工程技术大学讲师, 主要研究方向为信号与信息处理、电路与系统等。

E-mail: manlinxiao@sues.edu.cn

Xiao Manlin(Corresponding author) received her B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree in 2003, 2006 and 2013 respectively from University of Electronic and Science Technology of China. Now she is a lecturer in Shanghai University of Engineering Science. Her main research interests include signal and information processing, circuit and system.



杜鑫威, 2021 年于安徽大学获得学士学位, 现为上海工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为射频锁相环设计与实现。

E-mail: dxw12302021@163.com

Du Xinwei received his B. Sc. degree in 2021 from Anhui University. Now he is pursuing his M. Sc. degree in Shanghai University of Engineering Science. His main research interests include the design and implementation of the RF phase-locked loop.



蔡丽媛, 2018 年于华东交通大学获得学士学位, 2021 年于上海工程技术大学获得硕士学位, 现为飞骧科技(无锡)有限公司工程师, 主要研究方向为射频功放设计。

E-mail: liyuancai_sues@163.com

Cai Liyuan received her B. Sc. degree in 2018 from East China Jiaotong University, received her M. Sc. degree in 2021 from Shanghai University of Engineering Science. Now she is an engineer in Lansus Technologies (Wuxi) Co., Ltd. Her main research interest includes RF power amplifier.



雍伟, 2004、2007 年分别于电子科技大学获得学士、硕士学位, 现为苏州能讯高能半导体有限公司高级应用工程师, 主要研究方向为射频功放芯片应用。

E-mail: yongwei_0926@163.com

Yong Wei received his B. Sc. degree and M. Sc. degree in 2004 and 2007 respectively from University of Electronic and Science Technology of China. Now he is a senior RF application engineer in Dynax Semiconductor Co., Ltd. His main research interest includes RF power amplifier chip application.