

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306655

可重构宽带功率放大器设计*

南敬昌¹ 戴涛¹ 丛密芳² 刘超¹ 南星伊¹ 任建伟²

(1. 辽宁工程技术大学电子与信息工程学院 辽宁 葫芦岛 125105 2. 中国科学院微电子研究所 北京 100029)

摘要:随着未来无线通信需求的增长,通信系统需适用更多的频带和标准。针对可重构功率放大器各模式下工作带宽窄的缺点,本文基于简化实频技术和可重构理论,提出了一种拓展可重构功率放大器工作带宽的设计方法。通过在可重构理论中融入简化实频法的宽带设计方法,在设计过程中加入新的误差函数,对可变模式下的可重构电路结构进行判别,进而实现可重构宽带功率放大器设计。为了验证该方法的有效性,并满足实际设计指标,采用中国科学院微电子研究所自主研发的LDMOS晶体管设计并制作了适用于GSM网络和LTE网络的一个频率可切换的宽频可重构功率放大器。测试结果表明,该可重构功率放大器在不同模式下可分别工作在0.6~1.1 GHz和1.1~1.6 GHz频段,饱和输出功率超过40 dBm,漏极效率(DE)在50%~60%之间。因此,本文提出的设计方法可以降低可重构宽带功率放大器的设计难度,较好的发挥晶体管性能,降低成本,在实际基站射频电路设计中具有很好的应用意义。

关键词:可重构;宽带;简化实频法;误差函数;功率放大器

中图分类号: TN722

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.10

Reconfigurable broadband power amplifier design

Nan Jingchang¹ Dai Tao¹ Cong Mifang² Liu Chao¹ Nan Xingyi¹ Ren Jianwei²

(1. School of Electrics and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;

2. School of Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: With the future wireless communication demand growth, communication systems need to apply more frequency bands and standards. Aiming at the shortcomings of the narrow operating bandwidth of reconfigurable power amplifiers in each mode, this paper proposes a design method to expand the operating bandwidth of reconfigurable power amplifiers based on the simplified real-frequency technique and reconfigurable theory. By incorporating the broadband design method of simplified real-frequency method in the reconfigurable theory, a new error function is added in the design process to discriminate the reconfigurable circuit structure in variable modes, then realize the reconfigurable broadband power amplifier design. In order to verify the effectiveness of the method and meet the actual design specifications, a frequency-switchable wideband reconfigurable power amplifier for GSM network and LTE network is designed and fabricated by using LDMOS transistors independently developed by the Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences. The test results show that the reconfigurable power amplifier can operate in the frequency bands of 0.6~1.1 GHz and 1.1~1.6 GHz in different modes, respectively, with a saturated output power of more than 40 dBm, and a drain efficiency (DE) of between 50% and 60%. Therefore, the design method proposed in this paper can reduce the design difficulty of reconfigurable broadband power amplifiers, better utilize the transistor performance, and reduce the cost, which is of great significance for application in the design of RF circuits of practical base stations.

Keywords: reconfigurable; wideband; SRFT; error functions; power amplifiers

0 引言

随着无线需求的增长,许多国家正在众多行业中发展通信技术。未来的无线通信系统将拥有越来越多的频段和标准^[1],因此通信系统组件将需要能够在各种模式下运行。这种需求给作为无线通信系统中核心器件的射频功率放大器设计带来了很大的挑战^[2]。

如今,宽带、双频带和频率可重构方法是当前实现多频带和多模式应用的主要手段。宽带技术可以很好地接受单个频段,但为了实现扩展带宽,必须在许多频段之间匹配非必要频段^[3],这必然会降低某些频段的性能,使设计更加复杂^[4-5]。通过设计匹配电路以产生两个频带的双频带技术可以去除非必要频带,但该方法在计算上较为复杂并且具有有限的带宽^[6]。而高设计灵活性即具备在目标频带内切换的能力是可重构方法的益处^[3,7-8]。2020年,Gilasgar等^[7]使用MEMS开关设计一款可重构功率放大器,该放大器可在900MHz和1800MHz之间切换选择,具有较好的效率和功率,但电路设计中使用了7个开关,增加了电路的复杂度,并且只能工作在较窄的频带内,无法适用于当前发展迅速的无线通信系统。随着计算机处理速度的提升,使用计算机辅助优化来设计硬件得到了普及,在1977年,Yarman等^[9]提出了一种实频技术,该方法根据频域中的增益响应来创建匹配网络。该方法的物理基础使计算机辅助优化设计的实现变的简单。从那时起,原始实频方法经历了广泛的研究和改进,产生了直接实频计算和简化实频方法,并且以此方式设计的放大器性能良好^[10-12]。

通过分析上述研究成果发现,现有大部分可重构功放往往为单频点或窄带的设计,而在对于可重构功率放大器的设计中既要保证带宽的需求又要减小尺寸则有一定的难度,即使牺牲部分效率换取一定的工作带宽,也只能保证该功放在非常窄的频带内具有期望的性能,并不能很好地满足未来无线通信系统对带宽和效率的要求。因此,为适用于GSM网络和LTE网络基站低成本,高性能的设计要求,本设计利用可重构技术设计一款功率放大器,提出了一种基于简化实频法的可重构宽带功率放大器设计方法。该方法结合了可重构方法与简化实频技术,将两种理论的优势进行结合设计了一个具有两个稳定工作带宽的可重构功率放大器。并在设计过程中使用达林顿合成公式进行分析和推导,进而得到可重构电路中接入的电容值。这种设计方法的优点是用简化实频法降低了可重构宽带功率放大器的设计难度,降低了计算量。并且采用计算机辅助设计来设计匹配电路,既能扩展带宽并以相对简单的电路结构实现两个频带的转换,又可以获得相对理想的带内性能。基于该方法,设计

的功放同时具有宽带、灵活性高、体积小等特点。为了验证该方法的正确性,使用中国科学院自行研制的LDMOS功率器件,设计了一个可重构宽带功率放大器,并在0.6~1.1GHz和1.1~1.6GHz频段进行了测试。

1 理论分析

1.1 简化实频法

由于计算机行业的快速发展和计算机辅助设计的日益普及,使用S参数表征匹配电路的技术方法被广泛用于PA设计^[13]。无损均衡器可以通过SRFT中的归一化散射参数来描述。根据Belevitch的理论,S参数矩阵可以表示为^[14]:

$$\mathbf{S}(s) = \begin{bmatrix} S_{11}(s) & S_{12}(s) \\ S_{21}(s) & S_{22}(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{g(s)} \begin{bmatrix} \pm h(-s) & f(s) \\ f(s) & h(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

当源阻抗为复阻抗时,等效网络如图1所示。Belevitch形式的匹配网络的传输功率增益为^[15]:

$$T = \frac{|S_{21}|^2(1 - |S_{L11}|^2)}{|1 - S_{22}S_{L11}|^2} \quad (2)$$

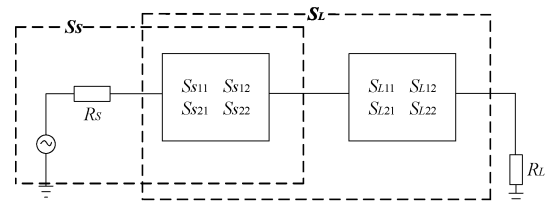


图1 源阻抗为复阻抗时的等效网络

Fig. 1 Equivalent network when the source impedance is complex impedance

网络的阻抗函数可以表示如下^[10]:

$$Z(s) = \frac{g(s) + h(s)}{g(s) - h(s)} \quad (3)$$

其中对应 $f(s)$ 、 $h(s)$ 和 $g(s)$ 的多项式为:

$$f(s) = f_0 + f_1s + \dots + f_ns^n \quad (4)$$

$$h(s) = h_0 + h_1s + \dots + h_ns^n \quad (5)$$

$$g(s) = g_0 + g_1s + \dots + g_ns^n \quad (6)$$

其中, n 是将要设计的阶梯匹配网络的阶数。 $\{f_0f_1 \dots f_n\}$ 、 $\{h_0h_1 \dots h_n\}$ 和 $\{g_0g_1 \dots g_n\}$ 是相应多项式系数。在获得阻抗值之后,可以使用达林顿合成法来获得匹配电路。网络综合技术用于将阻抗的曲线点函数实现为相应的物理网络,确定网络拓扑结构,并取相应分量为结构中元器件值。通过根据达林顿合成方法对阻抗应用长除法变换,可得:

$$Z(s) = L_1s + \frac{1}{C_2s + \frac{1}{L_3s + \dots + \frac{1}{L(C)_ns + 1}}} \quad (7)$$

其中, L_1, L_3, L_5, \dots 和 C_2, C_4, C_6, \dots 是所得到的 LC 梯形匹配电路中相应的元件值, 电路原理图如表 1(a) 所示。任何可实现的阻抗函数都可以用电阻端接的无损耗 LC 梯形网络来实现, 因此该方法可用于功率放大器的设计。

1.2 可重构理论

由于其适应性, 可重新配置技术经常用于通信中, 并且可以利用各种器件来实现, 包括 PIN 开关、MEMS 开关和变容二极管等^[16]。PIN 二极管经常用于在可重构功率放大器的构造中执行开关功能, 因为模拟开关具有更高的开关速率并且更好地适应实际应用中的开关需求^[17]。在本设计中使用的是在通信系统中广泛使用的 SMP1302-087LF 二极管。

表 1(b) 给出了二阶 LC 匹配网络的理想可重构电路布局的框图。与常规 LC 匹配电路相比, 可重构电路在原

有电容 C_2 处增加一个由 PIN 开关控制的电容, 接入电容 C_{PIN} 受 PIN 开关状态的影响。当 PIN 截止时, C_{PIN} 不连接, 但当 PIN 导通时, C_{PIN} 连接。

通过对达林顿合成法中对多阶 LC 阶梯匹配电路的综合计算公式进行分析, 结合理想开关下电容改变的二阶 LC 可重构匹配电路结构的理想电路, 电容 C_{PIN} 的值可以通过将频带 1 和频带 2 下的阻抗函数 Z_1 和 Z_2 联立来获得, 即:

$$C_{PIN} = \frac{\frac{1}{Z_2(s) - L_1s} - \frac{1}{L_3s + \frac{1}{C_4s + 1}}}{s} - C_2 \quad (8)$$

其中, L_1, C_2, L_3, C_4 由模式 1 下的阻抗拆分得到。

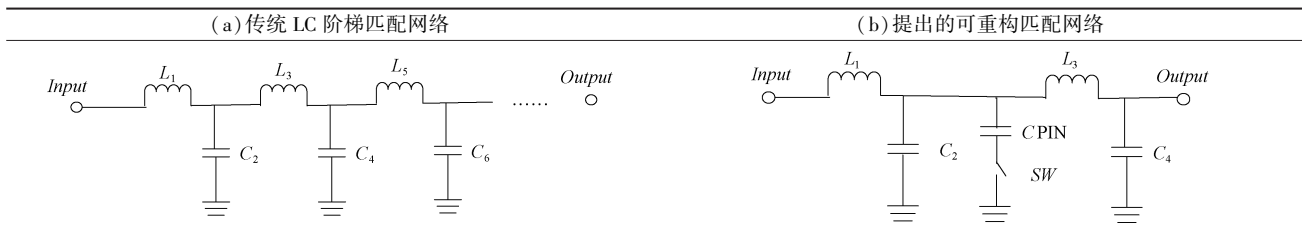
2 可重构宽带功率放大器设计

2.1 输出匹配电路的设计

输出匹配电路用作该设计方法的说明。修改 C_{PIN} 的电容状态来进行模式转换。

表 1 传统结构与所提可重构电路的比较

Table 1 Comparison of conventional structures and the proposed reconfigurable circuit



模式 1 和模式 2 分别对应 0.6~1.1 GHz 和 1.1~1.6 GHz 的频段范围。首先需要选择在两个频段内适当的目标阻抗, 以便满足根据单个电容的变化来实现宽带阻抗转换的要求。由于在本设计中使用了中科院微电子研究所自研的 LDMOS 晶体管 IME36S20N, 所以负载牵引工作必须在真实的晶体管本身而不是模型上进行。设计的功放漏极偏置电压为 28 V, 栅极偏置电压为 2.2 V。在这种情况下, 功率放大器具有良好的线性度和效率, 工作在 AB 类。

根据负载牵引系统的牵引结果, 所选择的两个频带的目标阻抗值如表 2 所示。然后使用 SRFT 技术进行匹配电路的设计并通过误差函数固定两个频带的电路结构, 使其满足可重构电路要求, 其中开关被假设为理想开关, 目标函数 Z 被设置为趋近目标阻抗 Z_0 ^[10]。阻抗误差函数设置为:

$$\Delta Z = 100\% \times \sum_{i=1}^N \left| \frac{Z(w_i) - Z_0(w_i)}{Z_0(w_i)} \right|^2 \quad (9)$$

在各自频段的阻抗综合之后, 为了使两个频段的电

路结构相同, 加入一个误差函数。

$$\Delta A = |L_1 - L_5|^2 + |L_3 - L_7|^2 + |C_4 - C_8|^2 \quad (10)$$

其中, L_1, L_3, C_4 由工作在模式 1 的阻抗进行阻抗综合得到。 L_5, L_7, C_8 由工作在模式 2 的阻抗进行阻抗综合得到。使用最小二乘法对阻抗误差函数 ΔZ 和匹配电路误差函数 ΔA 同时优化, 使阻抗逼近目标阻抗的同时, 保证两个频段阻抗综合后的匹配电路尽可能相似, 最终可以得到一个可重构宽带匹配电路。

经过上述方法之后获得的初始可重构 LC 结构示于图 2 中。以 50 Ω 为终端负载的匹配电路阻抗分布和目标负载阻抗分布如图 2 所示。该曲线图示出了在输出端端接有 50 Ω 的可重构 LC 电路的阻抗与目标阻抗之间的趋势类似, 但值存在一些差异, 可见在使用单个开关实现可重构电路时, 为保证宽带和可重构设计, 阻抗会和目标阻抗逼近并且趋势类似。当开关关断并且电容未接入时, 功率放大器工作在模式 1。当开关打开时, 功率放大器工作在模式 2。两种模式的目标阻抗值如表 2 所示。

表 2 目标负载阻抗值
Table 2 Target load impedance

状态	频率/MHz	目标阻抗/ Ω
模式 1	600	15.5 - j5.6
	700	15 - j1.3
	800	15.8 + j1.1
	900	17.5 + j4.9
	1 000	20.3 + j6.8
	1 100	24.3 + j7.1
模式 2	1 100	10.2 - j4.4
	1 200	10.9 - j4.3
	1 300	9.8 - j4.9
	1 400	8.1 - j5.3
	1 500	7.6 - j7.8
	1 600	6.7 - j9.2

配电路的 S 参数仿真结果如图 4 所示。可从图中看出目标阻抗和输入匹配电路的阻抗(终端阻抗为 50 Ω)有一定差异,但在小信号下的 S 参数测量显示,差异损失很小,证明输入匹配设计性能较好。

表 3 目标源阻抗值

Table 3 Target source impedance

频率/MHz	目标阻抗/ Ω
600	12.1 - j9.2
800	11.6 - j6.1
1 100	9.1 - j1.8
1 300	8.8 + j2
1 600	7 + j4.8

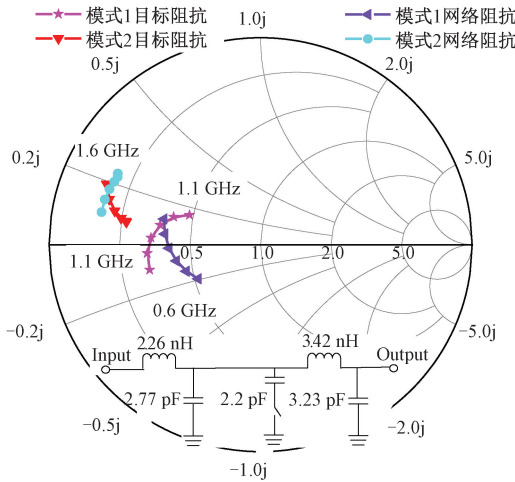


图 2 目标负载阻抗和匹配电路阻抗以及可重构电路
Fig. 2 Load target and matching network impedance and reconfigurable circuit

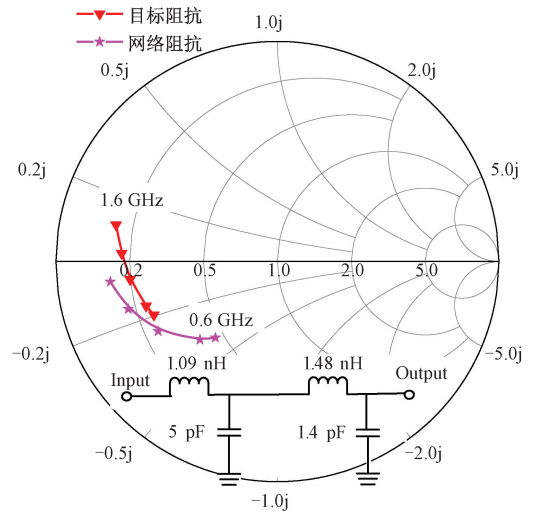


图 3 目标源阻抗和匹配电路阻抗以及匹配电路
Fig. 3 Source target and matching network impedance and matching circuit

2.2 输入匹配电路的设计

在功率放大器的设计中,匹配电路的设计十分重要,其整体性能起主要作用。在输入匹配电路的设计中,输入匹配电路的设计主要影响的是增益性能,因此在输入端添加可重构的设计将使功率放大器在实际使用中复杂化,同时对放大器的其他更关键的性能具有较小的影响,从而导致不必要的损耗。所以在该设计中,仅输出匹配电路状态可以被改变,而输入匹配电路使用宽带 SRFT 设计。优化目标 T_o 设置为 0.9,并且频率范围从 0.6 ~ 1.6 GHz。误差函数设置为:

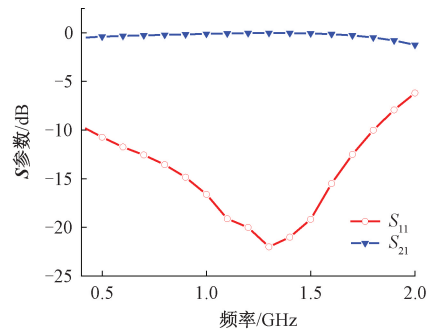


图 4 输入匹配电路 S 参数仿真结果
Fig. 4 The S-parameter simulation of the input MN

3 实物测试

3.1 设计指标

无线通信系统会在未来将多种通信标准整合到一

$$\Delta T = \sum_{i=1}^N |T(w_i) - T_o|^2 \quad (11)$$

表 3 中所示的目标源阻抗和通过简化实频法获得的输出端口为 50 Ω 的匹配网络阻抗分布在图 3 所示的史密斯圆图上。匹配网络的初始结构如图 3 所示。输入匹

起,本次主要设计性能指标如表4所示,为满足LTE、GSM频段、高功率、高效率 and 低成本要求,此次设计中可使用重构技术进行设计。

表4 设计性能要求

Table 4 Design Performance Requirements

级数	模式	输出功率/ dBm	工艺	漏级效率/ %
一级	LTE	>40	LDMOS	>50
一级	GSM	>40	LDMOS	>50

3.2 电路设计

由于分立器件的耦合效应,还需要使用Richard变换和Kuroda常数变换^[10]将多段梯形谐振LC网络转换为

微带线的形式,同时保留网络中的电容。

$$Y_{IN}(\Omega) = S \frac{1}{Z_0} = j \frac{1}{Z_0} \tan\left(\frac{\pi}{4} \Omega\right) \quad (12)$$

$$Z_{IN}(\Omega) = SZ_0 = jZ_0 \tan\left(\frac{\pi}{4} \Omega\right) \quad (13)$$

基于上述理论,并考虑到电容和二极管的寄生效应,实际电路还需要进行优化和调试。图5展示了完成的整体电路结构,可重构功放原理框图如图6所示,当开关断开时,输出匹配电路处于模式1下,当开关闭合,输出匹配电路处于模式2。版图设计如图7所示,实物制版如图8所示。设计中使用的电介质基底材料是FR4,板材的厚度是0.8 mm,介电常数是4.5。设计的PA漏极偏置电压为28 V,栅极偏置电压为2.2 V。

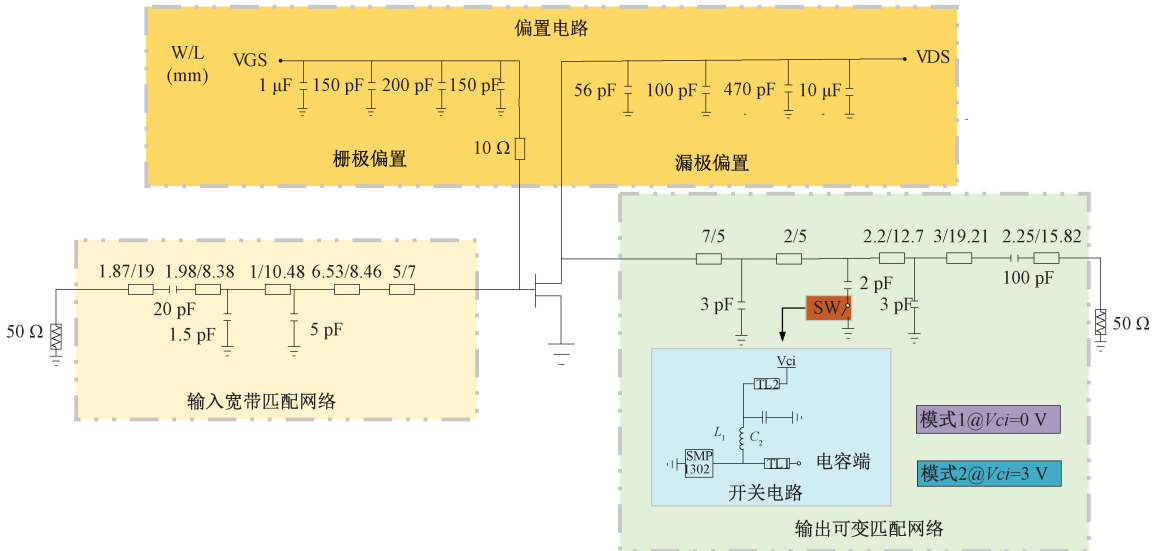


图5 设计的整体电路结构

Fig. 5 The overall circuit structure of the design

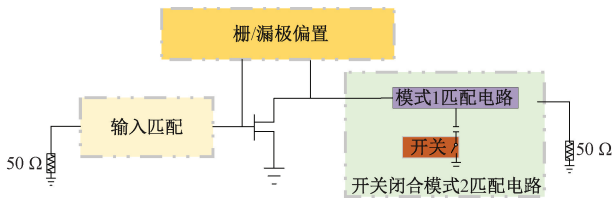


图6 可重构功放原理

Fig. 6 Reconfigurable amplifier block diagram

在两个模式下对功放分别进行了效率、输出功率和增益测试,以评估设计的功率放大器的性能如何。在测试中,在P3dB条件下测量了饱和输出功率,并在此功率下测量计算了漏极效率。为了更容易看到仿真和实际测量之间的差异,在0.4~1.8 GHz频段进行实物测试,两个模式的测试和仿真结果如图9和10所示。

功率放大器在PIN导通或截止的状态对应的工作模

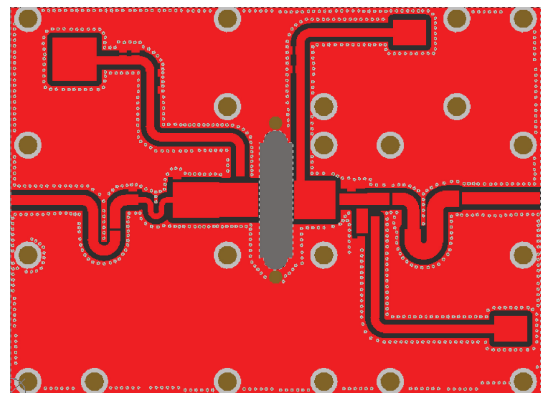


图7 功率放大器版图

Fig. 7 Power amplifier layout

式如表5所示。由图9可知,当功率放大器工作在模式1时,0.6~1.1 GHz频段内的性能较好,饱和输出功率高达

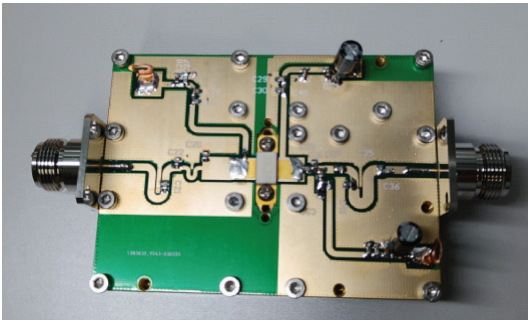


图 8 实物电路图

Fig. 8 Actual circuit photograph.

42.7 dBm,功率附加效率(power added efficiency, PAE)超过 50%,由图 10 可知工作在模式 2 时,1.1~1.6 GHz 频段的性能有所提高,饱和输出功率大于 40.3 dBm,效率达到 60%。此外,每种模式下的输出功率饱和增益较为平坦在 15~16.5 dB 之间。因此,在满足设计成本的要求下,该实现方式可很好的提高所需带宽的性能指标,使其满足实际设计要求。

表 5 功放工作模式

Table 5 The operating modes of amplifier

模式	开关状态	电容状态	频率/GHz
模式 1	截止	断开	0.6~1.1
模式 2	导通	接入	1.1~1.6

由于仿真依靠的是假设开关和开关控制的电容是理想的条件,以便于计算推导更加容易,而测量数据是电路在实际条件下修正和调试的结果。所以,模拟和测量之间存在一些误差。

采用此方法设计的可重构宽带功率放大器将宽带内频带分成两部分,利用可重构技术改善由于保证宽带效果而造成的性能损失,使用较简单的电路结构充分发挥该晶体管的性能,并在可重构宽带电路设计方法中采用简化实频法进行设计,思路清晰,阻抗显示更直观,计算复杂度较低。

表 6 总结了几个可重构功率放大器的性能,它也包括了所提出的 PA 指标,以供比较。文献[18-21]均为可重构功放设计,每个设计中均使用了一定数量的 PIN 开关,并且其中[18-20]设计的各模式带宽较窄,但效率较高,文献[21]为可重构宽带设计,具有一定的相对带宽,但效率较低,而本文基于该技术的可重构功率放大器在保持效率和功率的同时,可以扩展工作带宽,充分发挥 LDMOS 晶体管的性能,不仅相对带宽和效率较文献[21]大,而且使用的 LDMOS 晶体管也很好的降低设计成本,并且电路结构简单,实用性更强。该种方法的求解过程使用计算机辅助设计,大大降低计算难度,顺应了当今射频功率放大器多模式工作和智能化的发展潮流。

表 6 同类型功放性能对比

Table 6 Performance comparison of amplifiers of the same type

文献	频率/GHz	输出功率/dBm	相对带宽/%	工艺	漏级效率/%
[18]	0.9/1.8	39.1/38.5	/	GaN	69.5/57.9
[19]	1.75/2.45	40.5	/	GaN	69
[20]	1.9/2.14/2.6	41~42	/	GaN	63~67
[21]	1.2~2.0/ 2.2~3.0	40	50/30	GaN	37.4
本文	0.6~1.1/ 1.1~1.6	40~42.7	58.8/37	LDMOS	50~60

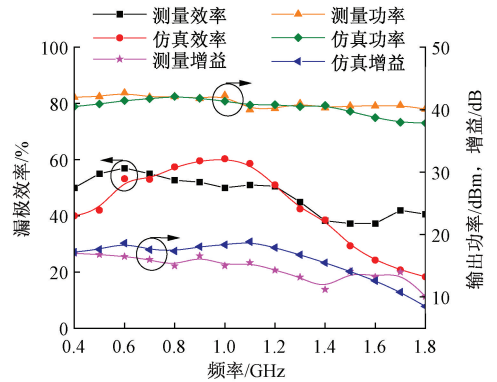


图 9 模式 1 下测试和仿真结果

Fig. 9 Test results and simulation results in mode 1

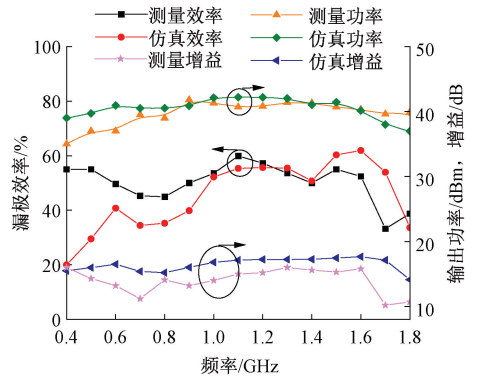


图 10 模式 2 下的测试和仿真结果

Fig. 10 Test results and simulation results in mode 2

4 结论

本文提出了一种宽带可重构电路匹配设计方法。通过分析可重构电路中模式变化后的阻抗变化,结合简化实频法,对阻抗进行分析,然后利用 PIN 二极管进行可重构电路设计,实现两频段的宽带匹配网络的组合。通过对实际电路的测试,设计并制造了一个适用于 GSM 网络和 LTE 网络的工作频率为 0.6~1.1 GHz 和 1.1~1.6 GHz 的频率可重构功率放大器,证明了方法的可行

性。测试结果表明,在整个工作频带内,该放大器的输出功率可以超过 40 dBm,漏级效率大于 50%,增益较为平坦,该可重构设计方法可以很好的发挥 LDMOS 晶体管的性能,使其兼顾带宽和性能。与其他可重构功率放大器相比,本文设计的功率放大器可以在保证一定带宽的前提下,进行可重构设计并使用计算机辅助设计,大大降低计算难度,并具有较小的尺寸,在实践中具有更广泛的应用。也使通信系统更“智能”,更适用于现代无线通信多模多带和高效率的需求。

参考文献

- [1] 孙昊. 5G 通信测试技术发展分析[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(7): 17-21.
SUN H. Analysis of 5G communication test technology development [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(7): 17-21.
- [2] 詹建. 新一代移动通信测试技术探讨[J]. 电子测量技术, 2012, 35(7): 119-124.
ZHAN J. Exploring the next generation of mobile communications testing technology [J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(7): 119-124.
- [3] 南敬昌, 李政, 南星伊. 可重构连续型 F 类超宽带功率放大器[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 67-77.
NAN J CH, LI ZH, NAN X Y. Reconfigurable continuous class F ultra-wideband power amplifier [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(5): 67-77.
- [4] ZHANG Z, CHENG Z, FUSCO V, et al. Design of a dual-band power amplifier using a simple method[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021, 31(2): 149-152.
- [5] ZHAO H, WU Y, WANG W, et al. A novel dual-band highly efficient power amplifier for 5G applications[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, Hoboken: Wiley, 2022, 32(5): e23093.
- [6] 林亮, 伊浩然, 罗敬原. 基于 Wi-Fi 6 频段双频 F 类功放的设计[J]. 无线通信技术, 2023, 32(1): 9-14.
LIN L, YI H R, LUO J Y. Design of Wi-Fi 6-band dual-band class F based amplifier [J]. Wireless Communication Technology, 2023, 32(1): 9-14.
- [7] GILASGAR M, BARLABE A, PRADELL L. High-efficiency reconfigurable dual-band class-F power amplifier with harmonic control network using MEMS [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Piscataway: Ieee-Inst Electrical Electronics Engineers Inc, 2020, 30(7): 677-680.
- [8] 刘文进, 王皓, 南敬昌. 基于 PIN 开关的可重构双波段功率放大器设计[J]. 电波科学学报, 2022, 37(1): 168-174.
LIU W J, WANG H, NAN J CH. Design of reconfigurable dual-band radio frequency power amplifier based on PIN switch [J]. Journal of Radio Wave Science, 2022, 37(1): 168-174.
- [9] YARMAN B, CARLIN H. A simplified real frequency technique applied to broad-band multistage microwave-amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, New York: IEEE-Inst Electrical Electronics Engineers Inc, 1982, 30(12): 2216-2222.
- [10] DAI Z, HE S, YOU F, et al. A new distributed parameter broadband matching method for power amplifier via real frequency technique[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Piscataway: IEEE-Inst Electrical Electronics Engineers Inc, 2015, 63(2): 449-458.
- [11] LIU G, ZHOU G, LI S, et al. Design of multi-octave continuous power amplifier based on broadband matching technique[J]. Ieice Electronics Express, Tokyo: Ieice-Inst Electronics Information Communications Eng, 2020, 17(16): 20200226.
- [12] 张宗昱, 王毅敏, 李佳旺, 等. 基于实频技术的宽带 AB 类射频功放设计[A]. 2022 年全国微波毫米波会议论文集(下册)[C]. 中国电子学会, 2022: 74-77.
ZHANG Z Y, WANG Y M, LI J W, et al. Wideband Class AB RF amplifier design based on real frequency technology [A]. Proceedings of the 2022 National Conference on Microwave Millimeter Waves (next volume) [C]. Chinese Institute of Electronics, 2022: 74-77.
- [13] SUN G, JANSEN R H. Broadband doherty power amplifier via real frequency technique [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Piscataway: IEEE-Inst Electrical Electronics Engineers Inc, 2012, 60(1): 99-111.
- [14] BELEVITCH V. Topics in the design of insertion loss filters[J]. IRE Transactions on Circuit Theory, 1955, 2(4): 337-346.
- [15] 代志江. 基于实频技术的功率放大器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
DAI ZH J. Research on power amplifiers based on real frequency technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [16] 李传昊, 王军波, 商艳龙, 等. 介质隔离高精度 MEMS 谐振式压力传感器[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 219-227.
LI CH H, WANG J B, SHANG Y L, et al. Dielectric isolated high precision MEMS resonant pressure sensors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 219-227.
- [17] 许丽敏. 基于 PIN 二极管的广电大功率微波组件设计[J]. 广播与电视技术, 2022, 49(7): 129-131.

- XU L M. PIN diode based design of high power microwave components for radio and television [J]. Radio and Television Technology, 2022, 49 (7): 129-131.
- [18] ISA S R, JUSOH M, SABAPATHY T, et al. Reconfigurable pattern patch antenna for mid-band 5G: A review [J]. Cmc-Computers Materials & Continua, Henderson: Tech Science Press, 2022, 70 (2): 2699-2725.
- [19] 王宋业, 程知群, 张志维, 等. F 类可重构功率放大器设计[J]. 微波学报, 2023, 39(2): 39-42.
WANG S Y, CHENG ZH Q, ZHANG ZH W, et al. Class F reconfigurable power amplifier design [J]. Journal of Microwaves, 2023, 39(2): 39-42.
- [20] MOHAMED A M M, BOUMAIZA S, MANSOUR R R. Reconfigurable doherty power amplifier for multifrequency wireless radio systems [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Piscataway: IEEE-Inst Electrical Electronics Engineers Inc, 2013, 61(4): 1588-1598.
- [21] ZHANG Z, CONG M, SONG L. Design of GaN reconfigurable power amplifier based on band-pass filter matching networks [J]. Ieice Electronics Express, Tokyo: Ieice-Inst Electronics Information Communication Engineers, 2022, 19(7): 1-6.

作者简介



南敬昌, 1993 年于阜新矿业学院获得学士学位, 2003 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2007 年于北京邮电大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学教授, 主要研究方向为射频电路与系统、信号处理与信息编码、通信系统仿真等。

E-mail: nanjc886@sina.com

Nan Jingchang received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 1993, M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2003 and Ph. D. degree from Beijing University of Posts & Telecommunications in 2007, respectively. Now he is a professor in Liaoning Technical University. His main research interests include RF circuits and systems, signal processing and information coding, communication system simulation, etc.



戴涛 (通信作者), 2021 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学研究生, 主要研究方向为射频电路与系统、射频频功率放大器设计等。

E-mail: 932358979@qq.com

Dai Tao (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2021. Now he is a M. Sc. candidate in Liaoning Technical University. His main research interests include RF circuits and systems, RF power amplifier design, etc.



丛密芳, 2008 年于河南师范大学获得学士学位, 2011 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 现为中国科学院微电子研究所高级工程师, 主要研究方向为射频大功率 MOS 器件与射频微波电路研究。

E-mail: cong mifang@ime.ac.cn

Cong Mifang received his B. Sc. degree from Henan Normal University in 2008, received his M. Sc. degree from Liaoning Technical University. Now he is a senior engineer in Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences. His main research interests include RF high-power MOS devices and RF microwave circuits research.



刘超, 2003 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2006 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2019~2020 年悉尼大学访问学者, 现为辽宁工程技术大学讲师, 测绘科学与技术专业在读博士研究生, 主要研究方向为射频电路与系统、信号处理与信息编码、高精度室内定位等。

E-mail: liuchao@lntu.edu.cn

Liu Chao received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2003, M. Sc. degree from LNTU in 2006, and visiting scholar at the University of Sydney from 2019 to 2020. Now he is a lecturer at LNTU, and a doctoral student majoring in Surveying and Mapping Science and Technology. His main research interests include RF circuits and systems, signal processing and information coding, and high-precision indoor positioning, etc.



南星伊, 2019 年于天津仁爱学院获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学研究生, 主要研究方向为射频微波电路与系统、射频频功率放大器设计、半导体器件可靠性。

E-mail: aananxy@163.com

Nan Xingyi received her B. Sc. degree from Tianjin Ren' Ai College in 2019. Now she is a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. Her main research interests include RF circuits and systems, RF power amplifier design and reliability of semiconductor devices.



任建伟, 2009 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2011 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 现为中国科学院微电子研究所高级工程师, 主要研究方向为射频大功率 MOS 器件与射频微波电路研究。

E-mail: renjianwei@ime.ac.cn

Ren Jianwei received the B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2009 and the M. Sc. degree from LNTU in 2011. She is now a senior engineer at Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences. Her main research interests include RF high power MOS devices and RF microwave circuits research.