

文章编号: 2095-4980(2025)07-0742-06

基于阻抗拟合的频率可重构功率放大器设计

林 韬, 于翠屏, 刘元安*

(北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘 要: 本文实现了一种高效率频率可重构 AB 类功放, 通过阻抗拟合算法优化匹配结构, 实现了不同频率条件下的复阻抗与 50Ω 输出负载阻抗的同步匹配, 提升漏极效率(DE)并拓展了带宽。测试结果表明, 在 2.2~2.6 GHz 的 400 MHz 内, 饱和输出功率为 39.74~42.05 dBm, 漏极效率为 62.29%~76.19%; 在 3.1~3.5 GHz 的 400 MHz 内, 饱和输出功率为 41.03~42.71 dBm, 漏极效率为 46.91%~71.19%。

关键词: 频率可重构; 阻抗拟合; 功率放大器; 漏极效率

中图分类号: TN722

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2023376

Design of reconfigurable Power Amplifier based on impedance fitting

LIN Tao, YU Cuiping, LIU Yuanan*

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: A highly efficient frequency-reconfigurable Class AB power amplifier is presented. By optimizing the matching structure through impedance fitting algorithms, it achieves synchronous matching of complex impedance with a 50Ω output load impedance under different frequency conditions, thereby improving Drain Efficiency(DE) and extending the bandwidth. Test results show that within the 400 MHz band from 2.2 to 2.6 GHz, the saturated output power ranges from 39.74 to 42.05 dBm, and the DE ranges from 62.29% to 76.19%; within the 400 MHz band from 3.1 to 3.5 GHz, the saturated output power ranges from 41.03 to 42.71 dBm, and the DE ranges from 46.91% to 71.19%.

Keywords: reconfigurable; impedance fitting; Power Amplifier(PA); Drain Efficiency

功率放大器(PA)是射频通信系统的核心器件。随着 5G 通信技术的发展以及通信标准的持续升级, 频谱资源日益紧缺^[1]。功率放大器需覆盖更宽频段, 以满足多样化的设计要求, 同时提供高增益和足够的输出功率^[2]。此背景下, 设计双频/多频可重构功率放大器成为研究热点。

2018 年 Zhang 等提出将可重构匹配结构计算思路从传统的端接阻抗单向推导方法^[3], 改进为两端并行计算方法, 优化了匹配网络的设计思路。2020 年 Cai、Zhang 等采用八开关的可重构结构, 将带宽拓展至 800/1 000 MHz^[4]。2022 年 Der A 等探讨了可重构结构中开关功耗系数(Figure of Merit, FoM)对提升功放效率的影响^[5]。同年, Zhang 等设计了基于宽带滤波结构的可重构功率放大器^[6]。通过对三阶低通结构进行诺顿变换, 得到三阶带通滤波结构, 并结合可重构器件引入闭合理论实现带宽拓展。

本研究旨在设计并实现一种基于拟合算法, 工作于 2.6 GHz 和 3.5 GHz 双频切换的可重构功率放大器。该算法可在匹配网络的不同开关状态下, 快速精确地计算出满足多个频点目标阻抗的网络参数, 以实现在开关通断状态下的频段切换。

收稿日期: 2023-11-17; 修回日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62090015; 61821001); 深圳市科技计划资助项目(CJGJZD20210408092001003)

*通信作者: 刘元安 email:yuliu@bupt.edu.cn

引用格式: 林韬, 于翠屏, 刘元安. 基于阻抗拟合的频率可重构功率放大器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(7):742-747. DOI:10.11805/TKYDA2023376.

Citation format: LIN Tao, YU Cuiping, LIU Yuanan. Design of reconfigurable Power Amplifier based on impedance fitting[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025,23(7):742-747. DOI:10.11805/TKYDA2023376.

1 基于阻抗拟合的可重构网络

1.1 可重构输出匹配的阻抗拟合计算

阻抗匹配是设计功率放大器的重要步骤。然而, 在涉及到可重构匹配网络的不同开关状态时, 仅依赖仿真软件自带算法进行遗传优化, 可能会导致匹配结构优化周期过长。为了缩短阻抗匹配优化周期, 本研究采用了曲线拟合算法进行近似阻抗计算, 以寻求更高效的算法优化方式。该算法的优势在于通过拟合将阻抗点分布在目标实数阻抗范围内, 从而实现更多频点进行带宽拓展。此外, 该方法显著缩短了设计周期, 且其求解过程同样适用于其他可重构结构。

具体的2.6/3.5 GHz可重构匹配结构如图1所示, 流程如下:

设计带宽(Band Width, BW)为500 MHz, 以100 MHz为间隔进行负载牵引。通过2.6 GHz中心频点, 得到5个最佳基波负载阻抗; 同理, 以3.5 GHz为中心频点牵引得到另外5个最佳基波负载阻抗。将这10个最优阻抗表示为 $Z(f_x)$, 其中 f_x 表示牵引频点($x=1, 2, \dots, 10$)。在A点经过一段串联传输线TL1后的输出阻抗为 Z_B :

$$Z_A(f_x) = Z_{f_x} \quad (1)$$

$$Z_B(f_x) = Z_{TL1} \frac{Z_A(f_x) + jZ_{TL1} \tan \theta_{TL1}}{Z_{TL1} + jZ_A(f_x) \tan \theta_{TL1}} \quad (2)$$

式中输入变量 Z_{TLk} 、 θ_{TLk} 分别表示第 k 段微带线的特征阻抗和电长度($k=1, 2, \dots, N$, N 为结构中微带线数量)。

并联(单支节)传输线TL2以电纳的形式参与匹配:

$$Z'_B(f_x) = \frac{-jZ_{TL2}}{\tan \theta_{TL2}} \quad (3)$$

$$Z_C(f_x) = \frac{Z_B(f_x)Z'_B(f_x)}{Z_B(f_x) + Z'_B(f_x)} \quad (4)$$

$$Z_D(f_x) = Z_{TL3} \frac{Z_C(f_x) + jZ_{TL3} \tan \theta_{TL3}}{Z_{TL3} + jZ_C(f_x) \tan \theta_{TL3}} \quad (5)$$

由式(1)~式(5), 解出以 Z_{f_x} 表示的导纳 $Y_D(f_x)$ 。式中 $G_D(f_x)$ 为 $Y_D(f_x)$ 的电导, $B_D(f_x)$ 为其电纳:

$$Y_D(f_x) = \frac{1}{Z_D(f_x)} = G_D(f_x) + jB_D(f_x) \quad (6)$$

已知开关参与控制匹配电路为单支节并联微带线, 其主要以电纳的形式参与匹配。由于实阻抗倒数为纯电导, 通过逆向推导得出: 对式(6)构建解析方程组, 首先满足将 $G_D(f_x)$ 匹配到0.02 S, 再经过单支节并联开关微带线消除电纳, 完成50 Ω 匹配。

为构建解析模型, 以2.6 GHz和3.5 GHz为中心的共10个频率点为样本点, 提取结点D处的导纳值, 得到解析方程组:

$$\forall x \in (1, 2, 3, \dots, 9, 10), \text{Re}(Y_D(f_x)) = 0.02 \quad (7)$$

计算过程如下:

1) 以特征阻抗 Z_{TLk} 和电长度 θ_{TLk} 共6个作为输入变量, 在10个频率样本点上建立方程组。由于方程数量大于输入变量个数, 该方程组为超定方程组, 需采用数值方法进行近似求解。

2) 设定输出导纳 $Y_D(f_x)$ 仅有实部为纯电导形式, 限制 $Y_D(f_x)$ 的实部电导 $G_D(f_x)$ 的近似误差在 ± 0.0004 S内, 作为特征分布来确定有解空间; 同时限制 $Y_D(f_x)$ 的虚部电纳 $B_D(f_x)$ 在 (0 ± 0.02) S内, 作为增强各频点间电纳抵消的计算。

3) 在满足上述误差约束的前提下, 利用阻抗拟合求解符合特征分布条件的参数解。电导 $G_D(f_x)$ 的初始误差分布范围 ± 0.0004 S对应了实际阻抗的实部在49~51 Ω 之间。此外, 特征分布范围还涵盖虚部电纳分布误差, 即

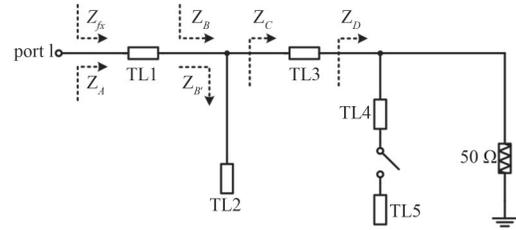


Fig.1 Schematic of the reconfigurable output impedance matching network
图1 可重构输出匹配结构

在由节点A到节点D的阻抗匹配过程中，允许输出阻抗含有可接受的±1j虚部误差。

图2展现了拟合计算的优势，核心在于可同时对两种可重构状态下的结构进行优化求解。灵活性不仅适用于传统的三微带线T型结构，还可拓展至四段、五段微带线结构，通过模块化构建组成解析式组即可完成建模和求解。将导纳 $Y_D(f_x)$ 以 $Z(f_x)$ 的函数形式表示，令输入变量 Z_{TLk} 和 θ_{TLk} 满足特征分布条件，可继续求得近似解。计算结果表明，D节点阻抗 $Z_D(f_x)$ 实部越大，匹配网络的带宽拓展能力越强。仿真结果进一步表明，允许目标阻抗与实际设计阻抗之间存在一定范围的偏差。并且随着阻抗虚部误差的增大，边带区域的阻抗失配现象明显增强。因此，应尽可能控制虚部误差，以提升整体匹配性能。

1.2 输入匹配与整体结构

以集总元件构建的滤波结构中，图3(a)展示了由串联电感和并联电容形成的低通滤波器(Low-Pass Filter, LPF)结构^[7]。图3(b)中，通过理查德变换(Richards Transformations)将串联电感等效为短路短截线，将并联电容等效为开路短截线^[8]。由于物理设计的局限性，需引入微带线补偿布局间距。由库洛达变换(Kuroda's Identities)得到短路短截线与两端的补偿微带线等效转换为并联开路短截线和串联短截线^[9]，最终通过两次等效变换将集总元件替换为如图3(c)所示的微带线结构。为满足整体频带需求，输入匹配结构末端的并联微带线被设计为T型双频结构，兼顾宽带滤波频稳定性与双频段特性。

基于输入/输出可重构结构的2.6 GHz/3.5 GHz双频功率放大器完整原理图如图4所示。该设计采用Load-Pull和Source-Pull联合优化方法确定最佳输入/输出偏置条件，并且本文使用PIN二极管SMP1345-079控制可重构网络的通断状态。输入和输出阻抗匹配网络仅针对基频的匹配设计，因此需要考虑谐波带来的影响。为有效抑制由输入端双频带通滤波结构引入的谐波干扰，设计输出偏置电路采用T型拓扑结构，以进一步优化谐波抑制性能^[10]。

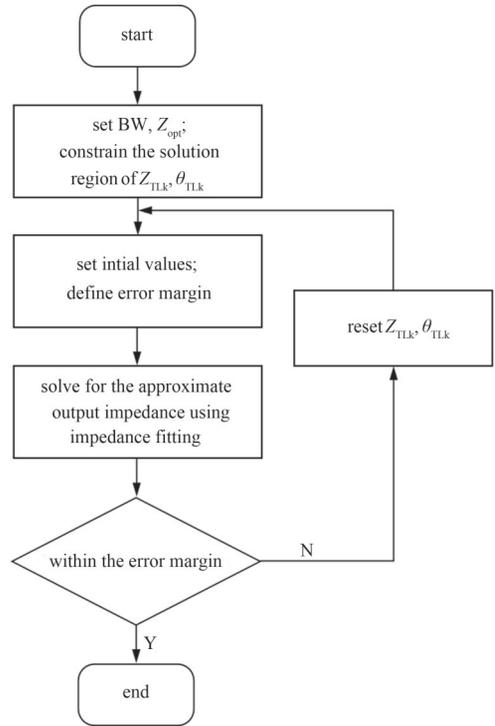


Fig.2 Diagram of impedance fitting
图2 阻抗拟合计算

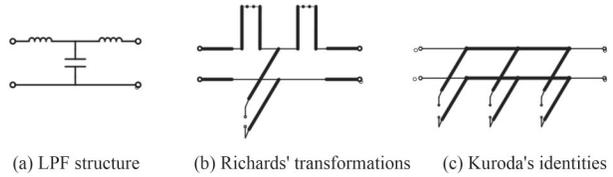


Fig.3 Input impedance matching network design
图3 输入阻抗匹配网络设计

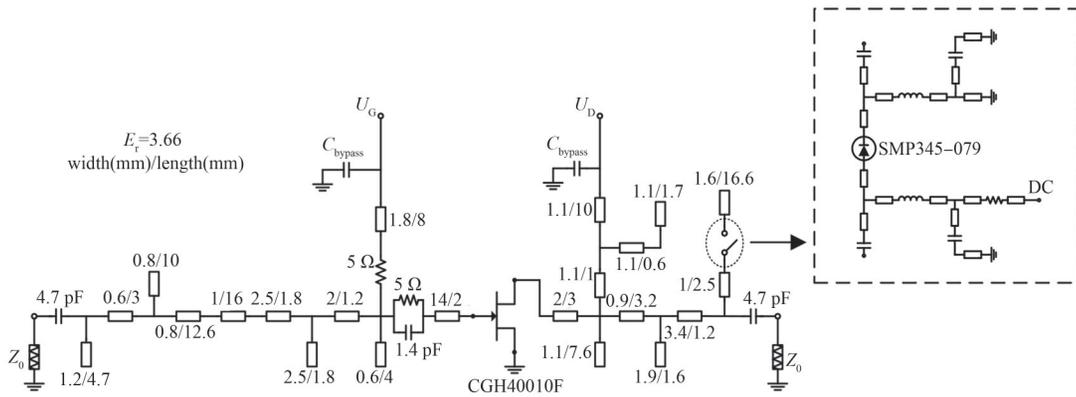


Fig.4 Schematic of the reconfigurable power amplifier
图4 频率可重构功率放大器原理图

2 仿真与测试

2.1 仿真设计

整体结构性能仿真结果如图 5 所示, 器件在 2.6 GHz 和 3.5 GHz 呈现可重构特性, 仿真漏极效率、输出功率及增益结果见图中所示。当开关断开时(SW_OFF), 功放在频段 2.42~2.83 GHz 内(30 dBm 输入功率)的仿真结果显示: 漏极效率为 70%~78.7%, 其中 2.47~2.73 GHz 效率在 75% 以上, 增益大于 10.6 dB, 输出功率大于 40.6 dBm; 当开关导通时(SW_ON), 在 3.01~3.53 GHz 频段内(30 dBm 输入功率), 漏极效率为 60%~70.2%, 增益大于 11.26 dB, 输出功率大于 41.26 dBm。与传统可重构功率放大器相比, 在带宽和高效率方面均有显著提升。

2.2 测试结果

可重构功率放大器采用 RO4350B 基板制作, 输出匹配电路由 SMP1345-079 单开关控制。单开关结构降低了功率放大器整体复杂度。可重构功率放大器实物如图 6 所示, 加工尺寸为 48 mm×86.5 mm。测试漏极电压设置为 28 V, 栅极电压设置为 -2.38 V(AB 类偏置), 开关由外部电压控制。

当施加负电压时开关处于关断状态(OFF), 如图 7(a)所示, 在 OFF 状态下, 可重构功率放大器于 2.2~2.6 GHz 频段(带宽 400 MHz)内, 饱和输出功率为 39.74~42.05 dBm, 漏极效率为 62.29%~76.19%。图 7(b)表明, 边带的输出功率因阻抗拟合算法误差影响下降, 无法达到最佳性能。这一现象源于精确设计仅限于中心频带, 随着频点向边缘移动, 其精确度逐渐降低, 误差增大, 求解多个拟合频点的阻抗方程组随频点数增加而变得更复杂。

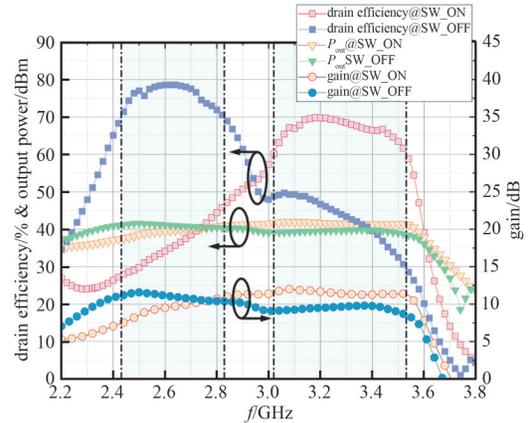


Fig.5 Simulation results of drain efficiency and gain in SW_ON or SW_OFF states

图 5 开关 ON 和 OFF 状态的漏极效率与增益仿真

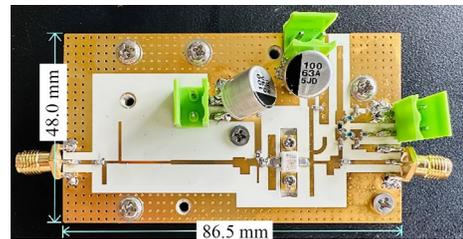


Fig.6 Photograph of the reconfigurable power amplifier

图 6 频率可重构功率放大器实物图

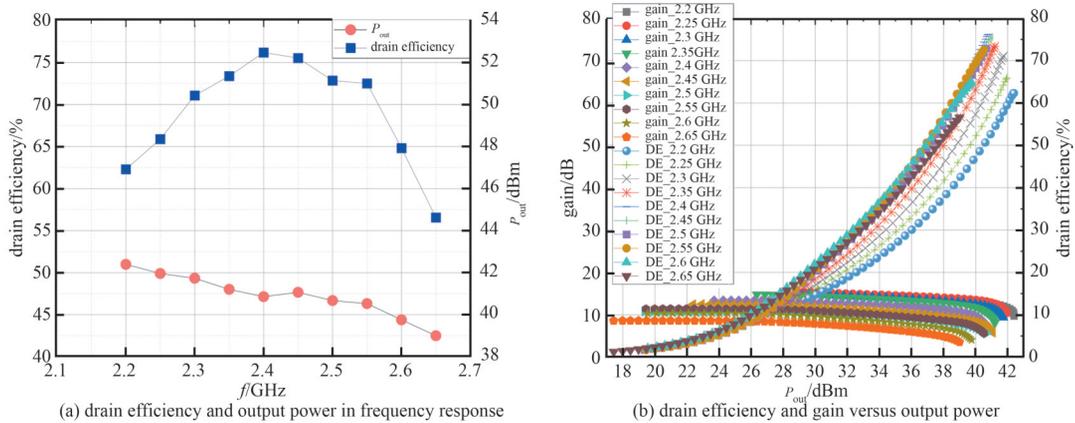


Fig.7 Test performance in SW_OFF state

图 7 开关 OFF 状态

通过外部施加正电压, 控制 PIN 二极管进入导通状态(ON), 即可实现仅用一个开关控制可重构结构效果, 测试结果如图 8(a)所示, 在 3.1~3.5 GHz 的 400 MHz 内, 饱和输出功率为 41.03~42.71 dBm, 漏极效率为 46.91%~71.19%。受到加工误差和焊接技术影响, 出现了部分频率偏移现象, 呈现出高频效率下降趋势。可以通过改进可重构结构中电感电容大小进行调试。

近年频率可重构功率放大器设计性能指标对比如表 1 所示。由表 1 可知, 现有文献中多数设计基于双频可重构架构, 且使用多个开关实现可重构功能。文献[5]、文献[11]虽性能较优但带宽受限; 文献[4]、文献[6]带宽较宽但性能不足, 需进一步优化; 文献[12]采用多开关实现多频可重构, 但结构复杂度显著增加, 且带宽和性能受

到严重限制。对比同类文章,本文在拟合算法基础上综合频率可重构技术解决多频点阻抗匹配问题,提升带宽同时提高匹配精确度,实现良好性能指标设计,同时减少开关数量,显著简化了设计复杂度。

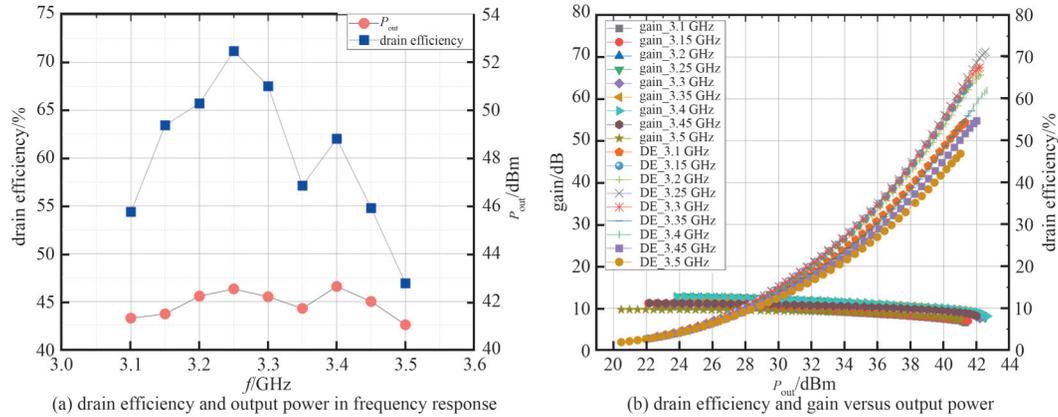


Fig.8 Test performance in SW_ON state

图8 开关ON状态

表1 本文与近年频率可重构功率放大器测试结果对比

Table1 Performance comparison with recent reconfigurable power amplifiers

ref.	f /GHz	BW/MHz	SW count	DE/(%)	P_{out} /dBm
[4]	2.2/3.5	1 000/800	8	53~65/50~64.5	38/38
[11]	0.9/1.8	100/100	7	72/63.5	39.1/38.5
[5]	2.2/3.5	200/400	2	70/48~60	41/42
[6]	1.6/2.6	800/800	10	37~59	41/42
[12]	1.5/1.8, 2.4/2.6	NBW(Notch Band Width)	4	63/44/48/56	38/40/40.5/41
this work	2.6/3.5	400/400	1	62.29~76.2/46.91~71.2	39.74~42.71

3 结论

本文设计了一种基于阻抗拟合匹配计算的可重构频率功率放大器。通过实现可重构匹配网络的快速计算,该研究成功构建了高性能功率放大器,其工作带宽及高效率区间均得到显著扩展。与现有采用两个及以上开关的可重构匹配设计相比,本文提出的单个开关结构不仅简化了设计复杂度,还减小了系统尺寸。

参考文献:

- [1] ROHDE U L,PODDAR A K,EISELE I,et al. Next generation 5G radio communication NW[C]// 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium. Besancon,France:IEEE, 2017: 113-116. DOI:10.1109/FCS.2017.8088817.
- [2] SAJEDIN M,ELFERGANI I T E,RODRIGUEZ J,et al. A survey on RF and microwave Doherty power amplifier for mobile handset applications[J]. Electronics, 2019,8(6):717. DOI:10.3390/electronics8060717.
- [3] ZHANG Tianyu,CHE Wenquan,CHEN Haidong. A wideband reconfigurable impedance matching network for complex loads[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018, 8(6): 1073-1081. DOI: 10.1109/TCPMT.2017.2786549.
- [4] CAI Qi,ZHANG Tianyu,CHE Wenquan. A diode-based wideband reconfigurable power amplifier[C]// 2020 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications(IMWS-AMP). Suzhou,Jiangsu,China:IEEE, 2020:1-3. DOI:10.1109/IMWS-AMP49156.2020.9199754.
- [5] DER A,WILLIAM S,BARTON T. Effect of switch figure of merit on frequency-reconfigurable power amplifier performance[C]// 2021 the 51st European Microwave Conference(EuMC). London, United Kingdom: IEEE, 2022: 954-957. DOI: 10.23919/EuMC50147.2022.9784260.
- [6] ZHANG Zhen,CONG Mifang,SONG Limei,et al. Design of GaN reconfigurable power amplifier based on band-pass filter matching networks[J]. IEICE Electronics Express, 2022,19(7):20220080. DOI:10.1587/elex.19.20220080.

- [7] 刘国华,周国祥,郭灿天,等. 基于改进简化实频技术的超宽带功率放大器设计[J]. 电子与信息学报, 2021,43(6):1617-1621. (LIU Guohua, ZHOU Guoxiang, GUO Cantianci, et al. Design of ultra-wideband power amplifier based on modified simplified real frequency technology[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(6): 1617-1621.) DOI:10.11999/JEIT200564.
- [8] NEMOTO Y, SATAKE M, SATO R. Equivalent transformation for the mixed lumped Richards' section and distributed circuit[C]// 1984 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Tokyo, Japan: IEEE, 1984: 1-4. DOI:10.1109/IEMC2.1984.7568102.
- [9] LIANG Guishu, DONG Huaying, WANG Tao, et al. Generalized Kuroda's identity and its applications in nonuniform transmission lines[C]// The 6th International Symposium on Antennas. Beijing: IEEE, 2003: 839-842. DOI:10.1109/ISAPE.2003.1276817.
- [10] 路宏敏, 吴保义, 姚志成, 等. 微带线直角弯曲最佳斜切率研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(5): 885-889. (LU Hongmin, WU Baoyi, YAO Zhicheng, et al. Research on the optimal percentage miter of the microstrip right angle bend[J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(5): 885-889.) DOI:10.3969/j.issn.1001-2400.2009.05.023.
- [11] GILASGAR M, BARLABÉ A, PRADEL L. High-efficiency reconfigurable dual-band class-F power amplifier with harmonic control network using MEMS[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(7): 677-680. DOI: 10.1109/LMWC.2020.2994373.
- [12] NAN Jingchang, WANG Qimeng, LI Zheng, et al. Design of reconfigurable channel-selective power amplifier[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2024, 39(3): 561-569. DOI:10.12265/j.cjors.2023138.

作者简介:

林 韬(1999-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为射频功率放大器 .email:1147511184@bupt.edu.cn.

刘元安(1963-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为无线通信与智慧微波、物联网与移动互联网等.

于翠屏(1983-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为微波电路与射频系统等.

(上接第741页)

- [13] 齐磊, 卢铁兵, 崔翔. 端接非线性负载的非均匀传输线瞬态分析[J]. 电波科学学报, 2003, 18(2): 153-156. (QI Lei, LU Tiebing, CUI Xiang. Transient analysis for nonuniform transmission lines with nonlinear loads[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(2): 153-156. DOI:10.3969/j.issn.1005-0388.2003.02.007.)
- [14] 陈智慧, 褚庆昕. 任意线性集总网络FDTD建模新方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 35(2): 262-266. (CHEN Zhihui, CHU Qingxin. Novel FDTD method for modeling arbitrary linear lumped networks[J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(2): 262-266. DOI:10.3969/j.issn.1001-2400.2008.02.015.)
- [15] 王为. 复杂传输线网络耦合建模与分析方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013. (WANG Wei. Studies on coupling model and analyzing techniques for complex transmission line network[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2013.)

作者简介:

张 胤(1994-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为天线理论与技术、传输线瞬态分析 .email:zhangyinzyll@163.com.