

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209157

# 超宽带功率放大器设计

朱磊<sup>1,3</sup> 年夫顺<sup>2,3</sup> 宁曰民<sup>2,3</sup> 张文强<sup>2,3</sup> 朴智棋<sup>2,3</sup>(1. 中北大学仪器与电子学院 太原 030051; 2. 中电科思仪科技股份有限公司 青岛 266555;  
3. 电子测试技术重点实验室 青岛 266555)

**摘要:** 设计了一款工作频率低、频带宽的 HF/UHF 波段功率放大器。为满足指标要求,该设计采用三级晶体管级联。选定晶体管之后,根据各级晶体管的结构和性能设计了输入、输出以及级间匹配网络。采用多级 L 型匹配网络实现功率放大器的输入阻抗匹配电路,采用多级 L 型匹配网络结合 1:1 同轴巴伦阻抗匹配网络实现输出阻抗匹配电路,将增益级晶体管的输出阻抗和驱动级晶体管的输入阻抗各自匹配到 50 Ω,再级联实现两者之间的级间匹配电路设计,将驱动级晶体管的输出阻抗与输出级晶体管的输入阻抗通过多级 L 型匹配网络直接匹配到一起,实现驱动级晶体管和输出级晶体管之间的级间匹配电路设计。加工制作了 500 kHz~1 GHz 功率放大器,经测试验证,输出功率可达 20 W 以上,增益平坦度优于±3.0 dB,工作效率 20% 左右。

**关键词:** 阻抗匹配;同轴巴伦;功率放大器

**中图分类号:** TN72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Design of ultra-wideband power amplifier

Zhu Lei<sup>1,3</sup> Nian Fushun<sup>2,3</sup> Ning Yuemin<sup>2,3</sup> Zhang Wenqiang<sup>2,3</sup> Piao Zhiqi<sup>2,3</sup>

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. CETC Ceyear Technology, Qingdao 266555, China;

3. Technology on Electronic Test &amp; Measurement Laboratory, Qingdao 266555, China)

**Abstract:** A VLF/UHF band power amplifier with low operating frequency and wide bandwidth is designed. In order to meet the index requirements, the design adopts three-stage transistor cascade. Selected crystal after the transistor, the input, output and inter-stage matching networks are designed according to the structure and performance of transistors at each stage. The multi-stage L-shaped matching network is really due to the power amplifier's output. In the impedance matching circuit, the output impedance matching circuit is realized by multi-stage L-shaped matching network combined with 1:1 coaxial balun impedance matching network. The output impedance of the gain stage transistor and the input impedance of the driver stage transistor are matched to 50 Ω respectively, and then the inter-stage matching circuit design between them is realized in cascade. The output impedance of the driver stage transistor and the input impedance of the output stage transistor are directly matched together through the multi-stage L-shaped matching network, and the inter-stage matching circuit design between the driver stage transistor and the output stage transistor is realized. Process a 500 kHz~1 GHz power amplifier is manufactured. The test results show that the output power can reach more 20 W, the gain flatness is better than ±3.0 dB, and the working efficiency is about 20%.

**Keywords:** impedance matching; coaxial balun; power amplifier

## 0 引言

随着低频、短波、超短波通信技术快速发展,需要能够兼容低频、短波和超短波频段的功率放大器,对相关通信设备进行性能测试与电磁兼容试验<sup>[1]</sup>。目前我国低频功率放大器工作带宽比较窄,一般均采用多波段分别覆盖的方式,

实现 HF/UHF 波段功率放大,缺少能够覆盖低频、短波和超短波频段的超宽带功率放大器<sup>[2]</sup>。2013 年,吕航<sup>[3]</sup>采用 LC 低通滤波器实现超宽带匹配,设计了一款工作频段为 12 MHz~1 GHz,输出功率为 1 W 的功率放大器,其匹配电路所占面积较大。2018 年,侯钧等<sup>[4]</sup>采用传输线变压器实现超宽带匹配网络,设计了一款工作频段为 20 MHz~1 GHz,输

输出功率达 100 W 以上的功率放大器,其低频端的性能略有不足。本文设计了一款工作频率为:500 kHz~1 GHz,输出功率 20 W 的超宽带功率放大器。

本设计为满足设计指标要求,采用三级晶体管级联的方式,而选用的晶体管均为未匹配的晶体管,其源阻抗和负载阻抗值较小,且为复数。超宽带阻抗匹配电路设计是实现本文功率放大器的关键技术。

超宽带匹配电路设计是功率放大器设计的关键点,该功率放大器的匹配电路设计存在以下难题:1)工作频率低,阻抗匹配电路若采用微带线或集总参数电容电感的匹配方式,体积会非常庞大<sup>[5]</sup>;2)大功率晶体管的源阻抗和负载阻抗值很小,且为复数,匹配电路设计难度大;3)工作带宽有近 11 个倍频程,在如此宽的频带内进行阻抗匹配是一个极大的挑战。

针对上述设计难题,结合选用晶体管结构,本文采用多级 L 型匹配网络结合 1:1 同轴巴伦实现输出阻抗匹配电路,多级 L 型匹配网络实现输入阻抗匹配电路,级间匹配网络分别采用各自匹配到 50 Ω 再级联的方式,直接匹配级联的方式实现。

经测试验证,功率放大器在 500 kHz~1 GHz 范围内增益大于 45 dB,饱和输出功率大于 20 W,增益平坦度小于 ±3.0,输入端口驻波比为 1.48。

## 1 功放链路设计及晶体管选型

本文设计的功率放大器指标要求:工作频率为 500 kHz~1 GHz;增益大于 45 dB;饱和输出功率大于 43 dBm(20 W);输入端口驻波比小于 2.0 等。

如图 1 所示,根据指标要求,采用三级晶体管级联。其中输出级晶体管在全频段内输出功率可达 25 W 以上,增益大于 13 dB;驱动级晶体管的增益大于 12 dB;增益级晶体管的增益大于 22 dB。

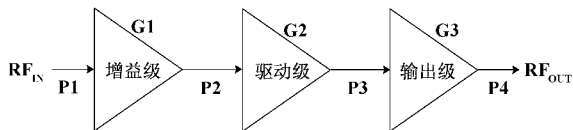


图 1 功率放大器链路结构图

三款晶体管均采用国外某公司生产的晶体管,输出级晶体管和驱动级晶体管均为推挽式结构。推挽式 N 沟道增强型 MOSFET 晶体管,其外形和电路符号如图 2 所示。其中 1、2 为漏极(对应 D1、D2),3、4 为栅极(对应 G1、G2),5 为源极(对应 S)。

推挽结构的场效应晶体管输入阻抗高、线性好,其热稳定性、抗失配能力和可靠性都有优势,且器件内 180°相位差降低了共模电感,增加了稳定性和工作带宽,还能抑制偶次谐波<sup>[6]</sup>。

增益级晶体管为 N 沟道增强型场效应管,其封装外形和电路符号如图 3 所示,其中 1 表示晶体管漏极(对应 D),

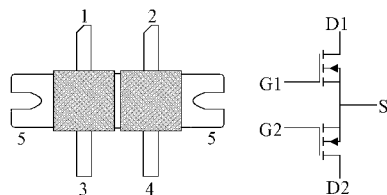


图 2 推挽式 MOSFET 晶体管的外形和电路符号

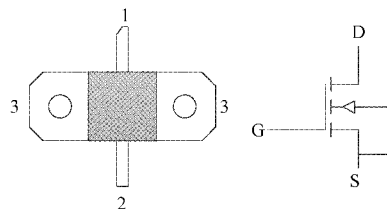


图 3 增益级晶体管的外形和电路符号

2 表示晶体管栅极(对应 G),3 表示晶体管源极(对应 S)。

这 3 款晶体管都是未匹配晶体管,其工作频带宽,工作频率低,其原阻抗和负载阻抗值较小,且为复数。阻抗匹配电路设计是功率放大器设计的关键技术。

## 2 匹配电路设计

为使超宽带功率放大器的输入、输出达到最佳的功率匹配,匹配电路的设计成为功率放大器的重要任务。要实现宽带内的最大功率传输,匹配电路设计非常困难<sup>[7]</sup>。本文设计的功率放大器涉及输入、输出阻抗匹配电路设计,级间阻抗匹配电路设计。

### 2.1 同轴巴伦阻抗匹配网络

同轴巴伦匹配网络因其超宽带的工作带宽,且其具有相位翻转等特性,也常应用于阻抗匹配设计中。同轴巴伦是由套上铁氧体磁芯的一段同轴线或者同轴电缆绕在磁芯上构成。

在同轴线低频端,由于内导体产生的电流与屏蔽层内侧产生的电流所产生的电场局限于两者之间的空间内,相当于一个圆柱形线圈在绝缘圆筒内,另一个线圈在圆筒外,经过  $\lambda/4$  波长传输,该两电流幅度相等且相位相反。其工作原理如图 4 所示,振子的左臂与属短路环和同轴电缆外导体(屏蔽层)连接。从下图可以看出,从 A 点到 B 点的距离为两个  $\lambda/4$  波长,即  $\lambda/4 + \lambda/4 = \lambda/2$ 。所以,同轴电缆芯线的信号从 B 点传到 A 点,正好走了  $1/2$  波程,相位正好相差 180°。就把同轴电缆的不对称变成对称了。

在同轴线低频端,同轴线的电抗分路损耗造成变换比例下降,使得同轴巴伦的低频响应特性较差,电流增大,输出将减小,但通过磁芯补偿低频响应,仍可以保持较好的信号输出,所以磁芯可以扩展同轴线的频率低端,减少或消除带内的谐振尖峰。

通过将同轴线绕在高磁导率的磁芯上,使得采用较小尺寸的磁芯和绕较少匝数就能获得较大的励磁电感,从而

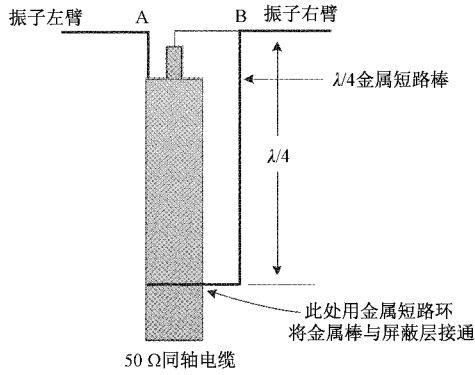


图 4 同轴巴伦结构示意图

能够获得足够好的频率响应。在高功率应用中,由于传输功率高,因损耗引起的温升会给器件特性带来显著影响。因此,要保证器件稳定工作就需要选择高磁导率、低损耗的磁芯。

### 2.2 输入阻抗匹配电路设计

本文第一级晶体管为增益级晶体管  $G_1$ , 在频率 500 MHz 的源阻抗为:  $4.0-j27.0 \Omega$ , 其源阻抗呈容性。本文采用多级 L 型匹配网络级联的方式实现输入阻抗匹配网络, 其中选用微带线代替电感。如图 5 所示, 其中  $TL_1$ 、 $TL_2$  是微带线。

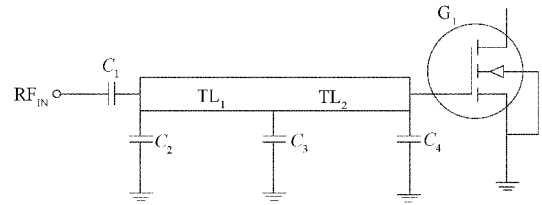


图 5 输入阻抗匹配电路

输入的射频信号经过电容  $C_1$  的隔离直流后, 通过两级 L 型匹配网络将阻抗值匹配到晶体管源阻抗的实数阻抗, 再通过并联电容抵消掉晶体管阻抗值的虚数部分。可以通过调节电容的容值来改善增益平坦度。

### 2.3 级间阻抗匹配电路设计

级间匹配电路除了与输入匹配电路一起实现增益平坦特性外, 还应具备级间隔直流功能。

增益级晶体管与驱动级晶体管的级间匹配电路如图 6 所示, 其采用最常用的级间匹配网络, 即将每一级功率管输入、输出都匹配到  $50 \Omega$  再级联。这样的优势是每一级自成一體, 方便调试, 也方便维修。但是其插损较大, 匹配网络体积较庞大<sup>[8]</sup>。出于两个晶体管各自结构的差异, 以及功率放大器前端的匹配插损对功率放大器整体的影响较小<sup>[9]</sup>, 该级间匹配电路采用这一方案实现级联。

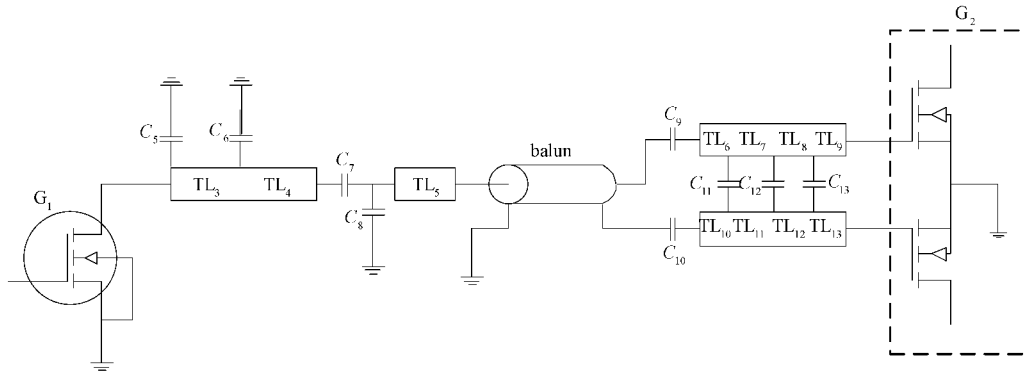


图 6 增益级晶体管与驱动级晶体管级间阻抗匹配电路

而驱动级晶体管与输出级晶体管的级间匹配电路如图 7 所示, 其采用多级 L 型匹配网络直接分别将驱动级晶体管的输出阻抗与输出级晶体管的输入阻抗匹配到一个

实数阻抗, 然后中间串接电容级联, 电容既可以隔离直流, 又可以防止串扰信号<sup>[10]</sup>。这样的优势是节省空间, 损耗较小。

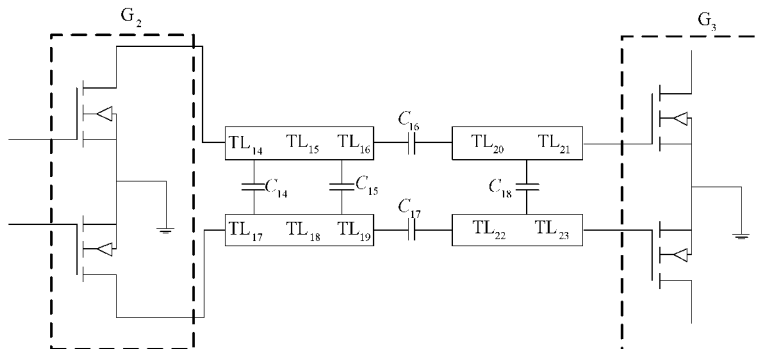


图 7 驱动级晶体管与输出级晶体管级间阻抗匹配电路

两者采用不同的级联方式,主要是根据选用晶体管的结构特性来选择合适的级间匹配方式。

### 2.4 输出阻抗匹配电路设计

本文末级晶体管为输出级晶体管  $G_3$ , 在频率 500 MHz 的负载阻抗为:  $2.5-j2.6 \Omega$ , 其负载阻抗呈容性。本文采用实现输出阻抗匹配网络, 其中选用微带线代替电感<sup>[11]</sup>。输出阻抗匹配网络  $P_4$  采用多级 L 型匹配网络和同轴巴伦网络实现输出阻抗匹配网络  $P_4$ , 如图 8 所示, 其中微带线  $TL_{24}$  和  $TL_{27}$ 、 $TL_{24}$  和  $TL_{27}$ 、 $TL_{24}$  和  $TL_{27}$  分别相同。

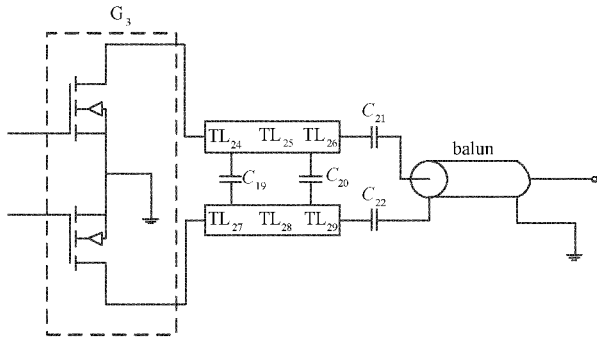


图 8 输出阻抗匹配电路

由于同轴电缆的特征阻抗是实数, 因此需要将晶体管的输入阻抗与输出阻抗实数化, 实现对源阻抗或负载阻抗的共轭匹配, 从而实现功率的最大传输<sup>[12-14]</sup>。复数阻抗可以用电阻与电抗串联表示, 也可以用电阻与电抗并联表示。一般采用集中参数元件实现阻抗匹配的方法是, 电阻并联电抗减小其实部, 再串联电抗抵消其虚部, 达到两个纯电阻的匹配<sup>[15]</sup>; 当匹配的不是纯电阻时, 可以采用集中参数的电容或电感来抵消和吸纳复数阻抗虚部的方法来实现复数阻抗的实数化。

输出阻抗匹配电路采用 L 型匹配网络将输出级晶体管的负载阻抗的实数部分匹配至  $25 \Omega$ , 然后通过串联微带线将虚数阻抗抵消。再通过 1:1 同轴巴伦将阻抗值匹配到  $50 \Omega$ 。

其中 1:1 同轴巴伦如图 9 所示, 由于 ADS 软件无法对磁性材料仿真, 故这里只对理想状态的同轴电缆进行仿真。1:1 同轴巴伦的仿真曲线如图 10 所示, 仿真结果显示 1:1 同轴巴伦能够将  $50 \Omega$  阻抗值变换到  $25 \Omega$ , 且将实现平衡与不平衡状态的转换。

图 11 是同轴巴伦平衡端的焊接方法, 同轴电缆的平衡端的内外导体分别接到推挽式晶体管的两端口。

由于功率放大器覆盖频段 500 kHz~1 GHz, 输出功率达到 20 W 以上, 本文选用德国 VAC 公司的超微晶磁芯, 超微晶材料的初始磁导率在 500 kHz 时高达 100 000, 在  $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim +120 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度范围变化时, 超微晶材料的插入损耗曲线几乎无变化, 有着相当好的温度特性。

### 3 性能测试

为验证设计结果, 加工制作了功率放大器模块, 如

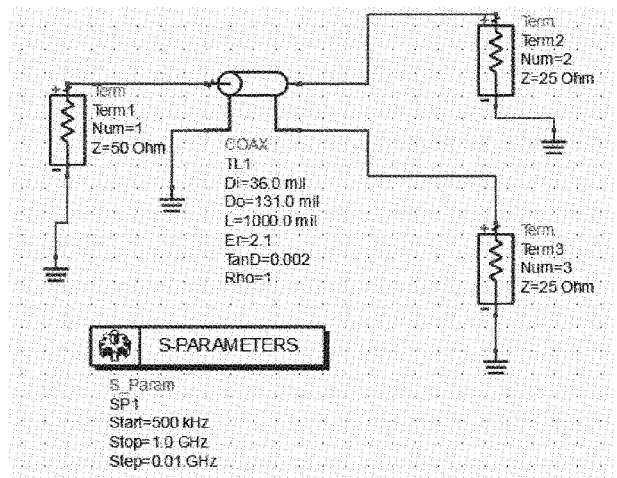
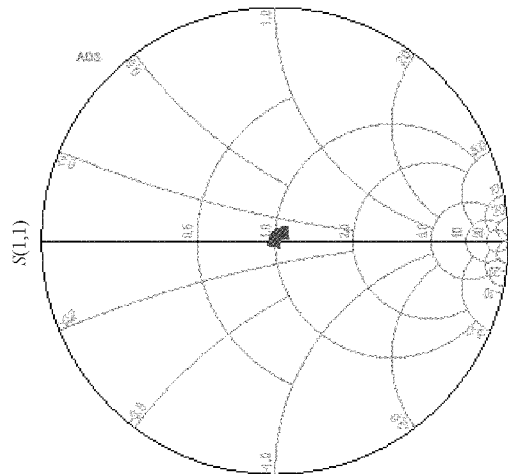


图 9 1:1 同轴巴伦模型



频率(500.0 kHz~1.000 GHz)

图 10 1:1 同轴巴伦仿真结果

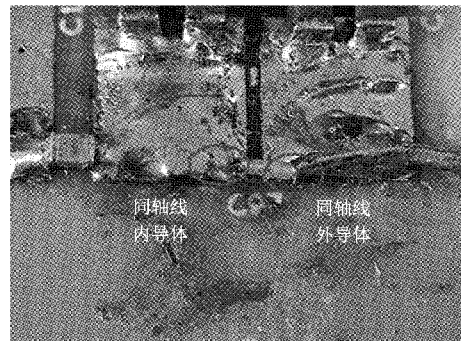


图 11 1:1 同轴内外导体的焊接方式

图 12 所示, 搭建功率放大器的测试平台。

测试结果显示, 本文设计的功率放大器完全符合设计指标要求。其中功率放大器的功率增益如图 13 所示, 在 500 kHz~1 GHz 范围内, 增益均大于 45 dB, 且增益平坦度较好, 增益平坦度小于  $\pm 3.0$ 。

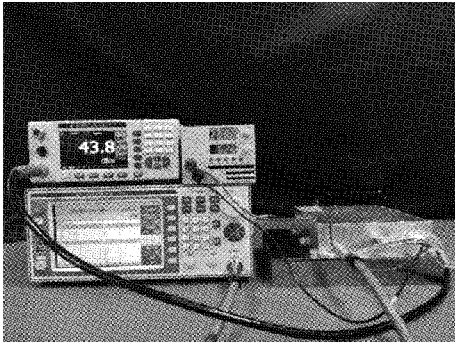


图12 测试平台

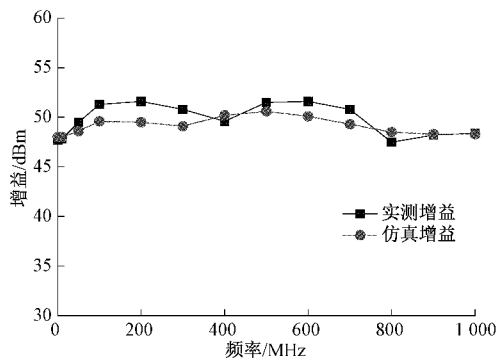


图13 增益测试数据

功率放大器的输出功率如图14所示,饱和输出功率大于44 dB(25 W),满足指标要求,而1 dB压缩点大于42 dB,3 dB压缩点大于44 dB。通过测试结果可知功率放大器的线性度良好。

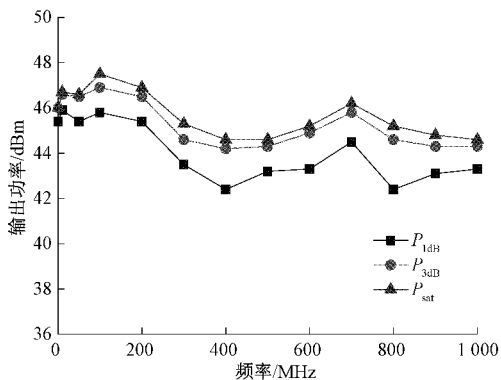


图14 输出功率测试数据

功率放大器在饱和状态下的工作效率如表1所示,在频段范围内的效率最大可达37.8%,最小16.0%,其效率较低,这是为实现超宽带高增益功率放大器,牺牲了其效率指标。

测试结果显示功率放大器实现了500 kHz~1 GHz频段的功率放大。相较于现有研究文献,本文功率放大器拓展了低端工作频率,实现kHz到GHz的全频段覆盖。该设计方案实现了高增益,超宽带功率放大器设计。

表1 功率放大器饱和状态下的工作效率

工作频率/ MHz	饱和功率/ dBm	工作电压/ V	工作电流/ A	效率/ %
0.5	46.0	28	4.921	28.9
10	46.7	28	4.755	35.1
50	46.6	28	4.363	37.4
100	47.5	28	5.313	37.8
200	46.9	28	6.211	28.2
300	45.3	28	5.823	20.8
400	44.6	28	6.102	16.9
500	44.6	28	6.462	16.0
600	45.2	28	6.408	18.5
700	46.2	28	6.228	23.9
800	45.2	28	5.996	19.7
900	44.8	28	5.791	18.6
1 000	44.6	28	5.631	18.3

## 4 结 论

本文设计的500 kHz~1 GHz功率放大器采用三级晶体管级联,选用多级L型匹配网络实现输入阻抗匹配电路设计,采用1:1同轴巴伦结合多级L型匹配网络实现输出阻抗匹配电路设计,根据晶体管不同的结构,选用两种不同的级间匹配方式,实现功率放大器的三级级联。该匹配电路设计相较于微带线或集总参数元件阻抗匹配方式,体积缩减了1/2,同时拓宽工作频带,使该功率放大器在该频段增益大于45 dB,饱和输出功率大于20 W,输入端口驻波为1.48。为该频段大功率功率放大器的设计提供了有利条件。

## 参考文献

- [1] 轩雪飞,王杨,刘国华,等. 5G通信的宽带功率放大器设计[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版),2020,(3): 24-27.
- [2] 林建伟,黄继伟. 基于GaN的高效率功率放大器设计[J]. 电子元件与材料,2021,(1):47-53.
- [3] 吕航. 12 MHz~1 GHz微波宽带功率放大器设计[D]. 成都:电子科技大学,2013.
- [4] 侯钧,方建新,黄亮,等. 20~1 000 MHz 100 W GaN宽带功率放大器研制[J]. 电子设计工程,2018,26(3): 111-115.
- [5] 黎明林. 30~512 MHz两级宽带功率放大器极间匹配设计[J]. 无线互联科技,2021,(6):109-111.
- [6] KIM T, LEE H, LIM W, et al. A compact single-stage wide-band Balun[J]. IEEE Microwave Magazine, 2018,19(1):79-83.
- [7] 徐永刚,杨兴,钟世昌. 0.3~2.0 GHz 100 W GaN超宽带功率放大器[J]. 固体电子学研究与进展,2018(4): 139-243.
- [8] 蒋超,侯钧,闫磊. 基于GaN HEMT的100~1 000 MHz

- 100 W 宽带功率放大器设计[J]. 电子信息对抗技术, 2017, 32(5): 81-84.
- [9] 李海峰, 王平连. X 频段固态功率放大器的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2011, 30(2): 50-52.
- [10] RUBIO J J M, CAMARCHIA V, QUAGLIA R. A 0.6 ~ 3.8 GHz GaN amplifier designed through a simple strategy[J]. IEEE Microwave & Components Letters, 2016, 26(6): 446-448.
- [11] 郭洒. 超宽带传输线变压器系列器件的研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2019.
- [12] WANG J C, HE S B, YOU F, et al. Codesign of high-efficiency power amplifier and ring-resonator filter based on a series of continuous modes and even-odd-mode analysis [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018: 1-12.
- [13] ADNAN R, JEFF G. Design of a 70 W wideband GaN HEMT power amplifier with 60% Efficiency over 100~1 000 MHz bandwidth[C]. IEEE RF/Microwave Power Amplifier for Radio and Wireless Application, Anaheim, 2018: 72-74.
- [14] 杨凯. 低损耗微波铁氧体材料及其应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [15] 宋鹏, 张广场, 王赢波, 等. P 波段超宽带 GaN 功放模块研制[J]. 电子设计工程, 2021(5), DOI: 10.14022/j.issn1674-6236.2021.05.022.

### 作者简介

朱磊, 硕士研究生, 主要研究方向为微波电路设计、固态功率放大器设计。

E-mail: Leizhu1123@163.com

年夫顺(通信作者), 研究员, 主要研究方向为电子测试技术与仪器、微波毫米波测量技术及仪器、微波毫米波电路设计与制造。

宁曰民, 研究员, 主要研究方向为微波电路设计、微波毫米波电路设计与制造、固态功率放大器设计。

张文强, 高级工程师, 主要研究方向为微波电路设计、微波毫米波电路设计与制造、固态功率放大器设计。

朴智棋, 工程师, 主要研究方向为微波电路设计、微波毫米波电路设计与制造、固态功率放大器设计。