

**导读:**为了应对未来移动通信、新体制雷达、物联网、航空航天信息技术等的飞速发展,作为其中关键技术的射频微波技术,也应从设计理论、仿真方法、工程应用和测试系统等方面不断地取得新进展、新突破、新发明。

为了加强国内同行在射频微波领域的学术交流,促进微波技术应用水平的提高,《电子技术应用》杂志2020年第7期和第8期推出“射频与微波”主题专栏,论文内容涵盖多种形式多个频段的功率放大器、微波系统、天线和无源元件设计,及电磁仿真、测试技术等。本专栏作者大多为工程一线的科研人员,论文都具有鲜明的工程应用背景,期待与读者互相切磋借鉴,共同提高我国的微波应用水平。本期将刊出下半部分。



**特约主编:**谢拥军,北京航空航天大学电子信息工程学院教授,博士生导师。主要研究方向为天线与微波技术、计算电磁学及其应用、电磁兼容等。目前主持多项国家纵向和企业横向科研项目。发表学术论文200余篇(其中SCI论文70余篇),主编(或参编)《HFSS原理与工程应用》、《简明微波》等专著8本。

## 20 MHz~520 MHz 宽带功率放大器的研制

李 贺,梁 坤,刘 敏,何 颖,张 晖

(中国电子科技集团公司第五十八研究所,江苏 无锡 214072)

**摘 要:**新一代半导体材料 GaN 相比于 Si、GaAs 等材料,具有禁带宽、击穿场强高、热稳定性优异等特性,在宽带功放的设计中被广泛使用。基于 CREE 公司的两款 GaN 功率芯片进行级联,匹配电路为集中元件和分布元件混合,采用负反馈技术提高带宽,RC 并联网络提高稳定性,设计了一款 20 MHz~520 MHz 的宽带功放。利用 ADS 软件对芯片模型和匹配电路进行优化仿真和实际调试,在 20 MHz~520 MHz 频段内,功放模块饱和输出功率大于 9 W,增益大于 29.5 dB,漏极效率高于 40%,带内平坦度为 $\pm 0.7$  dB。

**关键词:** GaN; 宽带功放; 负反馈; 饱和输出功率; 增益; 漏极效率

中图分类号: TN722.75

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200264

中文引用格式: 李贺,梁坤,刘敏,等. 20 MHz~520 MHz 宽带功率放大器的研制[J]. 电子技术应用, 2020, 46(8): 1-4, 8.

英文引用格式: Li He, Liang Kun, Liu Min, et al. Design of 20 MHz~520 MHz broad-band power amplifier[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(8): 1-4, 8.

### Design of 20 MHz~520 MHz broad-band power amplifier

Li He, Liang Kun, Liu Min, He Ying, Zhang Hui

(China Electronics Technology Group Corporation No.58 Research Institute, Wuxi 214072, China)

**Abstract:** GaN, as the new generation semiconductor material, has much wider forbidden bandwidth, higher breakdown voltage, more excellent thermal stability than Si and GaAs, and thus is widely used in the broadband power amplifier design. Based on two GaN RF dies of CREE company are cascaded and the matching circuit is a mixture of centralized and distributed components, a broadband power amplifier is designed in the 20 MHz~520 MHz frequency by using feedback technology to improve band width, RC parallel network to improve stability and micro-strip hybrid matching circuit. The die model and matching circuit are optimized and debugged by the ADS software. In the 20 MHz~520 MHz frequency band, the saturation output power of this power amplifier is more than 9 W, the gain is more than 29.5 dB, the drain efficiency is higher than 40% and the gain flatness is  $\pm 0.7$  dB.

**Key words:** GaN; broadband power amplifiers; feedback; saturation output power; gain; drain efficiency

## 0 引言

随着无线通信和军事领域新技术和新标准的不断发展,要求微波通信系统向宽带化、低噪声、小型化、集成化以及更高的工作频率发展<sup>[1]</sup>。而放大器组件是通信系统中的关键组成部分,因此系统整体对放大器组件的工作带宽、性能指标、体积、重量、可靠性等都提出了更高的要求<sup>[2]</sup>。

现代系统对宽带功放的要求达到多个倍频程的带宽,目前使用宽带放大器设计的主要结构包括电抗/电阻匹配网络、并联电阻性反馈、平衡结构和分布式结构<sup>[3]</sup>。其中负反馈技术是实现宽带功放的常用技术,当负反馈电路设计合理时,可以使所设计的功放在工作频带内保持增益平坦和阻抗匹配,同时改善直流和射频稳定性,并改善温度变化对功放性能的影响<sup>[4]</sup>。近年来,随着第三代宽禁带半导体 GaN 的日益成熟,由于具有禁带宽度宽、击穿电压高、热导率大、抗辐射能力强、化学性质稳定和功率密度高等特点<sup>[5]</sup>,因此以此为基础设计的单器件宽带功放结构简单,稳定性好。

本文使用 CREE 公司型号 CGH60008D(8W)级联 CGH60015D(15W)的 GaN 管芯设计了一个多倍频的宽带功放,基于负载牵引技术<sup>[6]</sup>,仿真阻抗,设计匹配网络,在 20 MHz~520 MHz 频率范围内实现增益 30 dB、效率 40% 和输出功率 10 W。

## 1 设计原理

反馈技术是指电路输出的一部分或者全部信号通过一定的路径被返回到输入端,与输入信号叠加后再次进入电路。若反馈信号与输入信号叠加后使输入信号减弱,就叫作负反馈<sup>[7]</sup>。对于放大器来说,增益-带宽积是一定值。负反馈技术正是通过降低增益来展宽频带,这种方法可以得到平坦的增益并可在宽频带内降低输入和输出驻波比,但在一定程度上恶化了噪声系数<sup>[8]</sup>。

常见的负反馈放大器的电路如图 1 所示,包含一个 LRC 反馈网络。反馈环上的元件控制增益和带宽。反馈电阻  $R_{fb}$  控制增益,反馈电感  $L_f$  用于减少高频段的反馈效应以抑制高频时的增益的降低<sup>[9]</sup>。电感  $L_1 \sim L_4$  决定放大器的宽带性能。 $C_f$  的主要作用是提供栅极电压和漏极电压的直流隔离<sup>[10]</sup>。

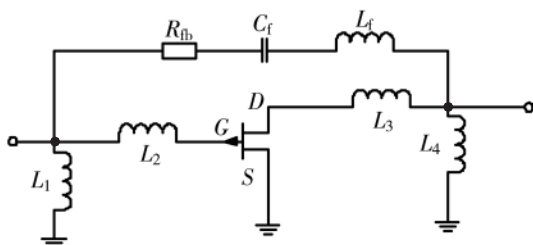


图 1 反馈放大器结构

## 2 功放电路的设计仿真

## 2.1 静态工作点的选择

功率管的静态工作点决定了它的工作状态,进而影

响功率放大器的输出功率、增益、效率等指标,因此选择合适的静态工作点对功率放大器的设计起着至关重要的影响<sup>[11]</sup>。为兼顾功率放大器的输出功率、效率和线性度,选取工作状态为 AB 类。参考两个管芯 Datasheet 推荐的静态工作电流为 100 mA 和 200 mA,仿真 IV 曲线得出对应的栅极电压  $V_{gs1}=V_{gs2}=-2.9$  V,漏极电压  $V_{ds}=28$  V。

## 2.2 宽带偏置网络的设计

GaN 功率管的栅极负压和漏极正压需要偏置网络提供,而偏置网络设计的好坏直接影响功率放大器的性能。偏置网络要求所采用的射频扼流圈具有足够高的自谐振频率,同时又能够在低频提供足够大的电感量对低频成分进行抑制<sup>[12]</sup>。一般通过设计四分之一波长线微带线来实现,在较窄带宽有比较好的效果,且随着频率越低,尺寸越大,不适用宽带和低频波段。本文宽带偏置网络采用高 Q 值的绕线电感作为扼流圈,一端连接功率管,一端通过隔直电容到地。所以在选择扼流电感时,一是考虑宽带特性和 Q 值,二是考虑可通过的最大电流。本文选用 Coilcraft 的电感,输入端选用 0603HL-102XJR,输出端选用 0805AF-102XJR,可通过电流 650 mA,100 MHz 对应阻抗为 670  $\Omega$ 。在多倍频程宽带放大器中偏置网络对电路性能影响较大,在设计匹配电路时应作为一部分进行整体仿真。

## 2.3 输入输出匹配电路及负反馈电路的设计

利用两个管芯的 ADS 模型进行负载牵引仿真得到不同频率下最优的输入输出阻抗,最优输入阻抗下得到最大增益,最优输出阻抗得到最大输出功率和效率。表 1 为 8 W 管芯在不同频率下负载牵引的最优输入输出阻抗,表 2 为 15 W 管芯在不同频率下负载牵引的最优输入输出阻抗。

表 1 8 W 管芯在不同频率下负载牵引的最优输入输出阻抗

频率 $f_0$ /MHz	增益 $G_p$ /dB	输入阻抗 $Z_{in}/\Omega$	输出功率 $P_{out}$ /dBm	输出阻抗 $Z_{out}/\Omega$
20	17.4	38.1+j132.1	41.3	34.2+j27.2
50	17.9	182.4+j565.8	41.9	53.8+j6.6
100	17.8	131.7-j37.2	41.5	54.2-j2.2
300	16.7	41.1-j68.3	41.2	46.7-j17.8
520	16.7	25.4-j46.7	41.1	41.4-j28.1

表 2 15 W 管芯在不同频率下负载牵引的最优输入输出阻抗

频率 $f_0$ /MHz	增益 $G_p$ /dB	输入阻抗 $Z_{in}/\Omega$	输出功率 $P_{out}$ /dBm	输出阻抗 $Z_{out}/\Omega$
20	15.1	53.4+j41.5	44.1	33.8+j9.1
50	15.0	78.5-j3.7	44.1	34.5-j3.9
100	15.2	75.8-j18.0	44.0	32.1-j1.2
300	16.0	30.0-j36.0	43.4	27.6-j14.8
520	16.2	12.8-j28.7	43.3	25.1-j16.1

由表 1 和表 2 数据可知,在低频处的阻抗较大,且随着频率升高,阻抗元件寄生效应明显,所以宽带匹配主要是对高频点进行阻抗匹配,既保证高频输出功率高,又能适当降低低频增益,改善带内平坦度。选取匹配频点 520 MHz,8 W 管芯输入阻抗匹配至 50  $\Omega$ ,15 W 输出阻抗匹配至 50  $\Omega$ ,8 W 输出与 15 W 输入采用级间直接匹配。其匹配电路如图 2 所示。

图 2 中在每一级电路的输入和输出端均引入负反馈电路,用来展宽带宽,改善平坦度<sup>[4]</sup>。该反馈网络通过 ADS 优化得到一个电阻串联电容连接晶体管的输入输出端。考虑整个频带频率较低,增益过高,稳定性较差,为改善稳定性,在每一级的输入端加入一个有耗匹配网络,该匹配网络采用一个电阻与一个电容并联的方式。该结构可以有效降低低频部分增益,同时对高频增益产生较小的影响,从而对整个带内的增益进行补偿。根据实际仿真优化的电阻值和电容值,选取实际与其接近的模型进行链路仿真,其仿真结果如图 3、图 4 所示。电容选用 TDK 模型,电阻选用 Murata (电阻无模型)。

由图 3 和图 4 仿真结果可知,整个带内的链路增益大于 34 dB, $S_{11}$  小于 -10 dB, $S_{22}$  较差的原因是将高频增益拉高,为改善实际加工高频增益,改善带内平坦度。从稳定性的仿真结果可以看出,整个带内的稳定因子  $\text{StabFact1} > 1$ ,说明匹配电路能在工作频率内稳定工作。

#### 2.4 大信号功率仿真

对全频带进行扫频仿真,其仿真结果如图 5 所示。固定输入功率  $P_{in}=10$  dBm,链路增益  $G_p=30$  dB,输出功率  $P_{out}=40$  dBm,漏极效率  $\text{Eff}_d=50\%$ ,带内平坦度  $\Delta G=1$  dB。整个链路仿真结果与设计基本一致,在优化电路中,优先考虑高频点指标,这样可以部分降低实际制作加工 PCB 时高频带来的寄生效应对匹配电路的影响,从而保证整个带内的指标基本一致。

#### 3 实物制作与测试

根据仿真设计的匹配电路制作成 PCB,PCB 基板选

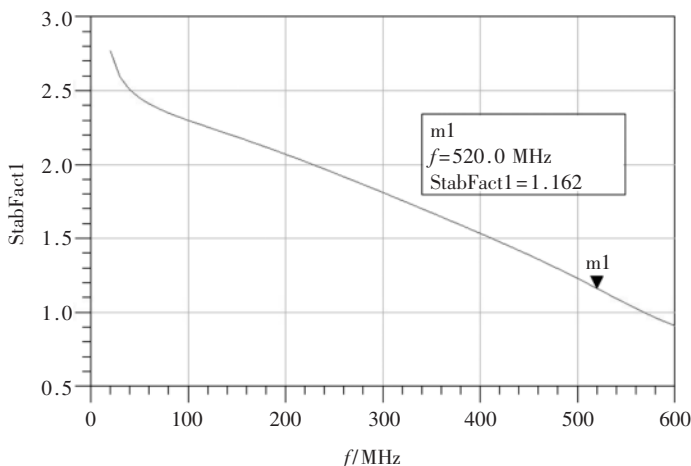


图 3 链路稳定性仿真

用 Rogers 4350B 板材,介电常数为 3.66,厚度为 0.508 mm,工艺采用表面镀金,芯片与基板采用金锡共晶工艺,减小热阻,提高散热能力。芯片焊盘与 PCB 电连接采用 25  $\mu\text{m}$  金丝楔形键合。金丝键合时将金丝两端跨度、弧度调至最低工艺要求,尽量减小电感对匹配电路的影响。实际制作的链路功放模块如图 6 所示。

对链路功放模块进行测试, $V_{ds1}=V_{ds2}=28$  V,分别对 8 W 和 15 W 功放调试静态工作点为 50 mA 和 200 mA。固定输入功率  $P_{in}=10$  dBm,工作模式为连续波,其测试结果如表 3 所示。

实测结果表明,链路在频带 20 MHz~420 MHz 内输出功率大于 40 dBm(10 W),在频带 420 MHz~520 MHz 内输出功率大于 39.5 dBm(8.9 W)。高频点输出功率与设计相差 1 W,主要还是高频点寄生效应对匹配电路的影响较大造成的。整个链路效率在 40% 以上,满足设计指标要求。

#### 4 结论

本文利用 ADS 对 CREE 两款芯片模型进行负载牵引和匹配电路仿真设计,再引入负反馈电路(RC 串联)

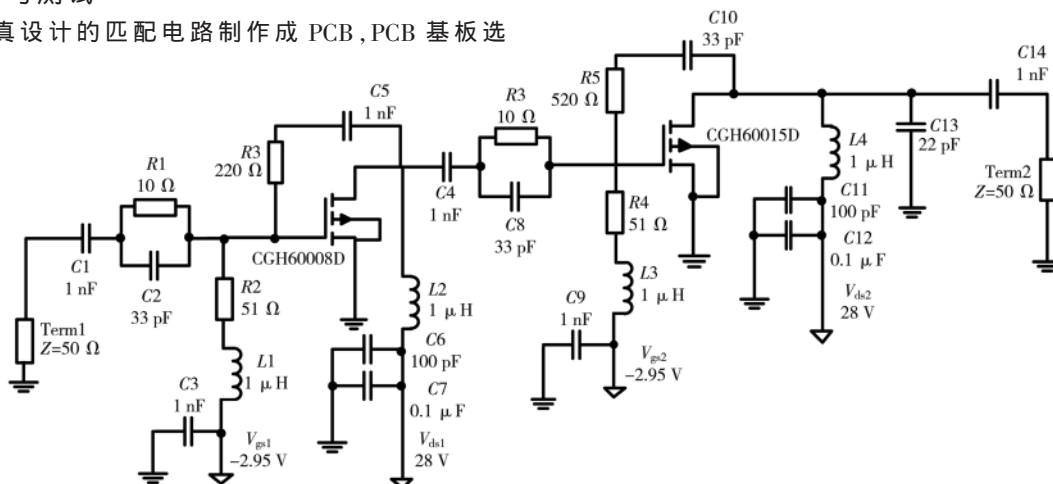
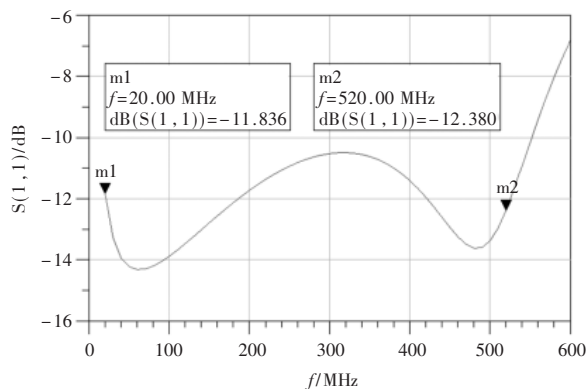
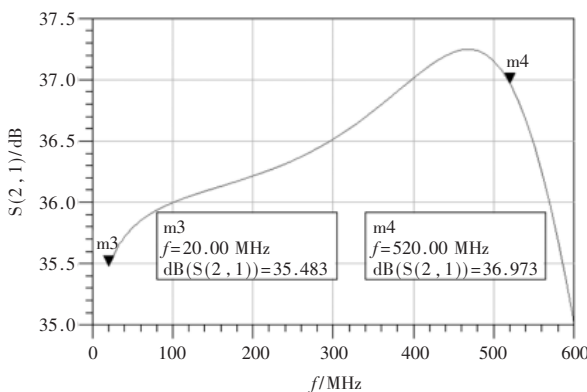


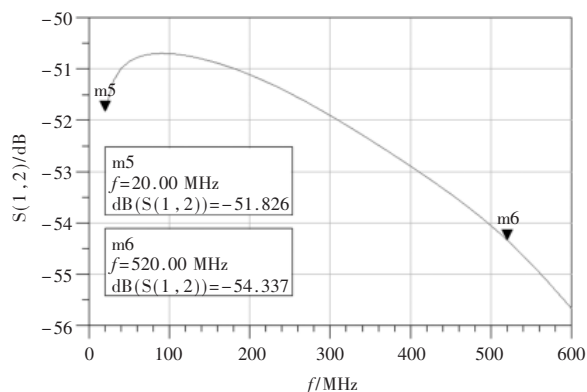
图 2 8 W 级联 15 W 匹配电路



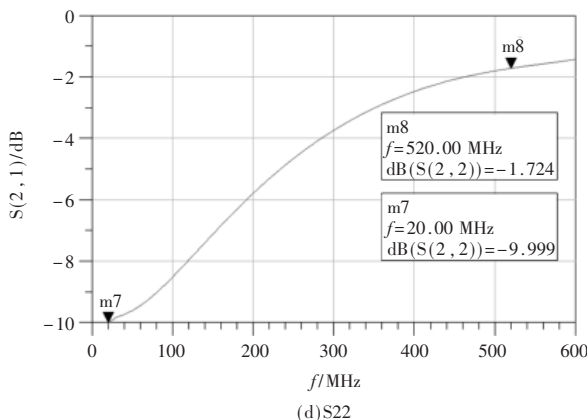
(a) S11



(b) S21



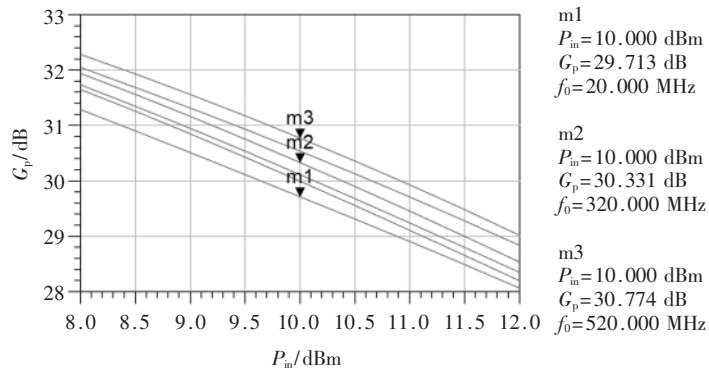
(c) S12



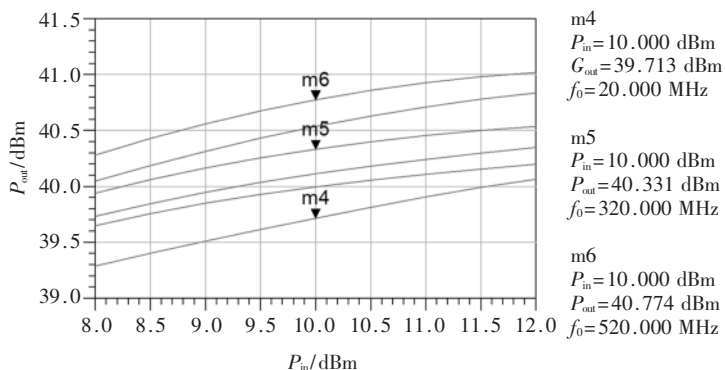
(d) S22

图4 链路S参数S11、S21、S12、S22仿真结果

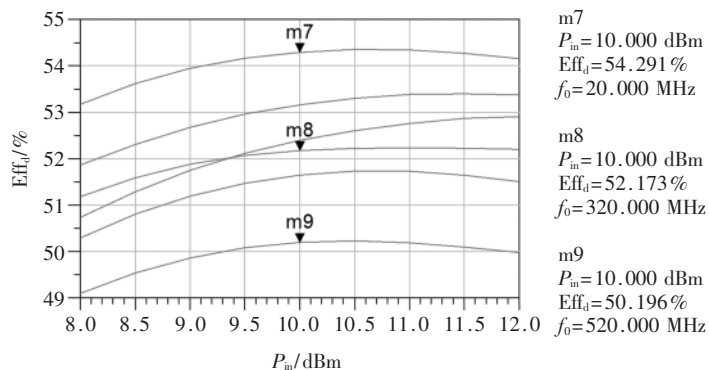
和稳定电路(RC 并联),设计了一款 20 MHz~520 MHz 两



(a) 全频带扫频增益仿真结果



(b) 全频带扫频输出功率仿真结果



(c) 全频带扫频漏极效率仿真结果

图5 全频带扫频仿真结果

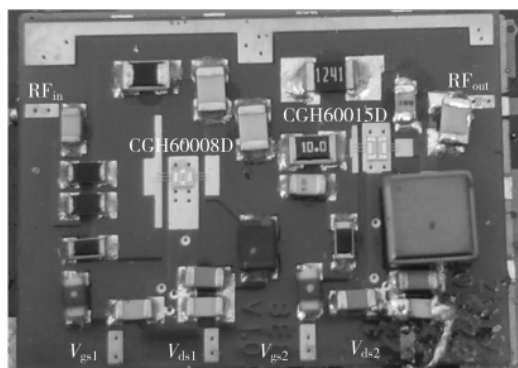


图6 8 W 级联 15 W 链路功放模块

级级联的功放模块。固定输入功率 10 dBm,链路实测输

(下转第 8 页)



- Propulsion Conference, Washington D.C. AIAA, 2013: 1-5.
- [3] 张敏, 邱刚, 乔彩霞, 等. 霍尔推力器电磁辐射测量方案研究[J]. 火箭推进, 2015, 41(2): 108-113.
- [4] 周志成, 高军. 全电推进 GEO 卫星平台发展研究[J]. 航天器工程, 2015, 24(2): 1-6.
- [5] MULLER H, KUKIES R, BASSNER H. EMC test on the RITA ion propulsion assembly for the ARTEMIS satellite[R]. AIAA 92-3208.
- [6] HENRY M D, BRINZA D E. DS1 ion propulsion emission characterization[C]. 2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2001.
- [7] 杨福全, 顾左, 张华, 等. 20cm 离子推力器羽流对微波通信影响的实验研究[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(1): 79-82.
- [8] SHA Y X, ZHANG H L, GUO X Y, et al. Analyses of electromagnetic properties of a hypersonic object with plasma sheath[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2019, 67(4): 2407-2481.
- [9] WANG M, LI H, DONG Y, et al. Propagation matrix method study on THz waves propagation in a dusty plasma sheath[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(1): 286-290.
- [10] YUAN K, CHEN J, SHEN L, et al. Impact of reentry speed on the transmission of obliquely incident THz waves in realistic plasma sheaths[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(2): 373-378.
- [11] LING H, KIM H, HALLOCK G A, et al. Effect of arcjet plume on satellite reflector performance[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1991, 39(9): 1412-1420.
- [12] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法(第三版)[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013.
- (收稿日期: 2020-04-08)

## 作者简介:

杨鑫(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 计算电磁学。

李林茜(1985-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 计算电磁学。

魏兵(1970-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 计算电磁学以及复杂媒质中电波传播等。

(上接第 4 页)

表 3 链路功放模块测试结果

$f_0/\text{MHz}$	$P_{\text{sat}}/\text{dBm}$	$G_p/\text{dB}$	$I_{\text{drl}}/\text{mA}$	$I_{\text{drl2}}/\text{mA}$	$\eta_d/\%$
20	40.26	30.26	0.08	0.50	65.38
70	40.90	30.90	0.06	0.53	74.47
120	40.90	30.90	0.07	0.55	70.87
170	40.78	30.78	0.08	0.56	66.78
220	40.80	30.80	0.09	0.61	61.34
270	40.70	30.70	0.10	0.63	57.48
320	40.60	30.60	0.11	0.67	52.57
370	40.35	30.35	0.13	0.66	49.00
420	40.00	30.00	0.14	0.66	44.64
470	39.70	29.70	0.14	0.66	41.66
520	39.50	29.50	0.14	0.64	40.81

输出功率大于 9 W, 增益大于 39 dB, 效率高于 40%, 基本满足设计指标。该功放适合应用于广播电台及多种小型化电子对抗平台。

## 参考文献

- [1] 陈邦媛. 射频通信电路[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 胡砚. 微波宽带放大器组件设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [3] 谢晓峰, 肖仕伟, 沈川. 0.02~2 GHz GaN 分布式功率放大器的原理及设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(24): 141-

144.

- [4] 候照伟. 基于 GaN 的 0.5~2.5 GHz 宽带功率放大器的设计[J]. 电子质量, 2016(6): 39-44.
- [5] 吴治霖, 周伟中. 基于 GaN 的宽带功率放大器的仿真[J]. 通信技术, 2017(1): 171-175.
- [6] 夏永平, 李贺, 魏斌. C 波段 GaN 高功率放大器设计[J]. 电子与封装, 2018, 18(1): 34-38.
- [7] 王中航, 习友宝, 阚能华. 100mW 30~1200 MHz 宽带放大器[J]. 电子测量技术, 2008, 31(8): 28-31.
- [8] 徐永刚, 李飞, 钟世昌. S 波段宽带大功率内匹配器件设计[J]. 电子与封装, 2018, 18(7): 42-44.
- [9] BAHL I J. 射频与微波晶体管放大器基础[M]. 鲍景富, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [10] 李游. 微波混合集成宽频带放大器研制[D]. 成都: 电子科技大学, 2005.
- [11] 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.
- [12] GUILLERMO G. 微波晶体管放大器分析与设计[M]. 白晓东, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- (收稿日期: 2020-04-03)

## 作者简介:

李贺(1986-), 男, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向: 射频微波功率放大器、模块组件设计。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所