

大功率高效率星载固态功率放大器研究

杨飞,殷康*,赵恒飞,赵莹,刘江涛,杨淑丽

中国空间技术研究院西安分院,西安 710100

摘要:针对卫星系统对于微波大功率放大器的需求,研制了 L 频段 200 W 高效率固态功率放大器,对其设计方法和关键技术进行了详细论述。应用低温共烧多层陶瓷技术,实现了射频电路的高集成和小型化;基于第三代半导体器件,应用波形赋形及线性补偿技术,提升了射频电路的功率和效率;采用移相全桥拓扑,研制了高效率、大功率二次电源。在 1.45~1.55 GHz 的频带范围内,固放整机输出功率大于 200 W,效率高于 60%,3 阶交调优于 18 dBc,同时具备 30 dB 增益可调,360°内步进 5.6°的相位可调能力。试验结果表明,该固放为目前国内星载领域连续波功率和效率最高的单机。

关键词:L 频段;固态功率放大器;氮化镓;大功率;高效率;波形赋形;移相全桥

中图分类号:TN83

文献标识码:A

High power high efficiency solid state power amplifier used in space

YANG Fei, YIN Kang*, ZHAO Hengfei, ZHAO Ying, LIU Jiangtao, YANG Shuli

China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710100, China

Abstract: In response to the demands for microwave high power amplifier in satellite systems, an L-band 200 W high-efficiency solid-state amplifier(SSPA) was developed and its design methods and key technologies were discussed, a highly integrated and miniaturized radio frequency unit(RFU) was realized with SSPA by using LTCC(low temperature co-fired ceramic) substrate. Based on the third-generation semiconductor devices, the power and efficiency of the RFU were improved by applying waveform shaping and linear compensation techniques. A high efficiency and high power secondary power supply was developed by using phase-shift-full-bridge(PSFB) topology. From 1.45 GHz to 1.55 GHz, the SSPA delivers more than 200 W of output power with an associated 3rd order intermodulation product(IM3) and power added efficiency(PAE) better than 18 dBc and 60% respectively. The gain can be adjusted within 30 dB, whereas the phase can be adjusted within 360° range with a minimal step of 5.6°. The experimental results show that the SSPA is the most advanced with the highest power and efficiency in China.

Keywords: L band; solid-state power amplifier; gallium nitride; high power; high efficiency; waveform shaping; phase-shift-full bridge

1 引言

微波功率放大器广泛应用于通信、导航、遥

感等卫星系统中,是系统的关键载荷,主要实现微波信号的放大以及幅度和相位的控制等功能^[1-2]。功率放大器决定系统的等效辐射功率,同时也是卫星平台主要的能耗设备,因此,其输

收稿日期:2021-12-09;修回日期:2022-05-28;录用日期:2022-07-01;网络出版时间:2022-07-25 14:23:03

基金项目:陕西省创新支撑计划(S2020-ZC-XXXM-0071)

* 通信作者. E-mail: yinkang504@163. com

引用格式:杨飞,殷康,赵恒飞,等. 大功率高效率星载固态功率放大器研究[J]. 中国空间科学技术, 2023, 43(2): 55-62. YANG F, YIN K, ZHAO H F, et al. High power high efficiency solid state power amplifier used in space[J]. Chinese Space Science and Technology, 2023, 43(2): 55-62 (in Chinese).

出功率和效率指标对于平台及系统的性能至关重要。长期以来,在星载高功率放大器领域,以行波管放大器(TWTA)为代表的电真空器件一直占据主要地位。基于半导体固态器件的放大器受限于较低的输出功率和效率,主要应用在中小功率的系统中。随着以氮化镓(GaN)为代表的第三代半导体材料的发展,国内外各研究机构在星用 GaN 功率器件以及大功率固态功率放大器(SSPA)研制方面取得了长足的发展^[3-6]。在 L 频段,已有输出功率达到 200 W,效率 74% 的 GaN 功率器件^[3,7],在 S 频段,已有输出功率 200 W,效率大于 45% 的 SSPA 单机^[4],C 频段 SSPA 单机功率大于 100 W,效率大于 50%^[5,8]。在设计层面,为了提高效率,功放设计除基波匹配外,还需进行高次谐波匹配^[9-11],为了提高功率,需对多个功率器件进行合成^[12-14]。目前,在 C 频段以下,SSPA 功率和效率已和 TWTA 相当,但却拥有更小的尺寸、更轻的重量,更高的集成度以及适合批量化制造等优点,已具备替代 TWTA 的能力。值得一提的是,美国的 GPS III、欧洲的伽利略二代以及中国的北斗导航卫星都采用了基于 GaN 器件的 SSPA 的方案^[13-16]。文献[13]报道了伽利略二代卫星中 L 频段 SSPA 的研制情况,末级 GaN 器件功率 90 W,采用谐波阻抗匹配提高效率,4 路合成提高功率,整机功率 300 W,效率大于 45%。文献[14]报道了 GPS III 卫星中 L 频段 SSPA 射频部分的研制情况,输出功率 400 W,效率大于 60%,同样采用 4 路 120 W 氮化镓功率器件合成的方案,并在前级加入线性化器补偿线性特性。

本文基于 GaN 功率器件,应用低温共烧多层陶瓷技术、高效波形赋形技术^[2,11]及移相全桥等技术,研制了 L 频段高效率固态功率放大器。在 100 MHz 带宽范围内,输出功率大于 200 W,效率优于 60%。与文献[13]相比,本文末级功放采用连续模 F 类设计,电源采用基于同步整流的移相全桥设计,整机效率更高。与文献[14]相比,本文通过优化驱动级和末级晶体管的栅极

电压,对级联线性特性补偿,无需专门的线性化器。通过以上创新技术的应用,本文研制的功放的主要性能达到了国际先进水平,可广泛应用于通信、导航等卫星系统中。

2 总体方案及设计

SSPA 的三维模型如图 1 所示,从功能上分为射频单元(RFU)和电源单元(DC-DC)两部分。RFU 的主要功能是将输入射频信号进行多级放大,使其达到额定输出功率,同时实现增益相位、幅度控制,增益温度补偿、增益自动控制(ALC)等功能。DC-DC 的主要功能是将卫星平台提供的大动态范围一次电压转化为射频单元所需的稳定工作电压,并实现固放的遥控和遥测接口。

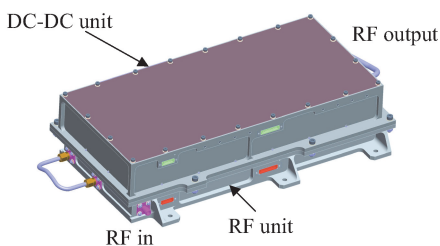


图 1 固态功率放大器三维模型
Fig. 1 3D model of the SSPA

本文主要围绕射频单元的设计展开论述,并简单介绍电源单元的设计及测试结果。

射频单元的组成原理及三维模型如图 2 所示,由 3 部分组成,分别为前级通道放大器(CAMP)、10 W 氮化镓驱动放大器(MPA)和 2 路 100 W 氮化镓末级功率放大器(HPA)。为了实现小型化、轻量化,CAMP 采用多层低温共烧陶瓷一体化封装技术。为了提高效率,MPA 和 HPA 均采用基于谐波匹配的波形赋形技术^[2,9]进行设计。链路预算如图 2(c)所示,总增益为 50 dB,噪声系数为 17 dB,输出功率为 53 dBm。链路增益 Gain 为 50 dB,噪声系数 NF 为 17 dB,输出功率 P_{out} 为 53 dB,三阶交调 IMD3 为 11 dBc。

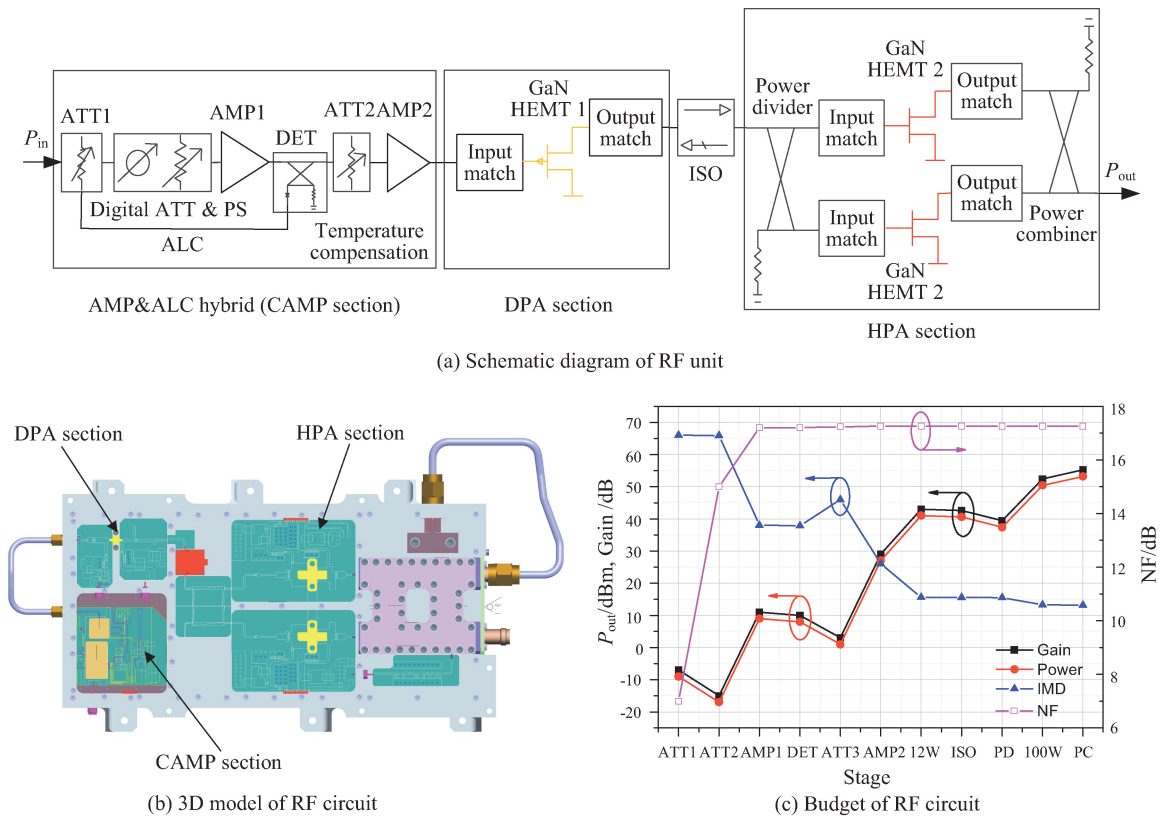


图 2 射频单元原理、模型及预算结果
Fig. 2 Prototype, model and budget of RF unit

为了提高转换效率,电源单元采用基于同步整流的移相全桥电路拓补,其具体原理如图 3(a)所示,当遥控指令电路接收到开机信号时,辅助电源首先工作,产生脉宽调制器(PWM)工作所需的+12 V和-5 V电压,接着,PWM产生宽度调制脉冲,移相全桥(PSFB)和半桥(HB)开始工作,输出稳定的+28 V、+5 V、和-5 V电压。图 3(b)给出了电源上电次序的仿真结果,可以看出,先产生-5 V,约 10 ms 延时后,再产生+28 V和+5 V电压。电源的转换效率测试结果图 3(c)所示,在大于 11 A 的电流输出条件下,转换效率接近 94%。

3 关键电路模块设计及实现

3.1 通道放大器模块

通道放大器主要完成固定增益模式(FGM)和自动电平控制模式(ALC)的选择,实现信号

增益控制,温度补偿等功能。其组成原理如图 2(a)所示,主要由线性放大器(AMP1 和 AMP2)和可变/固定衰减器(ATT1、ATT3 和数字 ATT2)级联组成。电性能仿真结果如图 4 所示,在工作频带范围内,增益大于 31 dB,噪声系数小于 18 dB,输出 1 dB 压缩功率大于 30 dBm。根据前一节链路预算结果,该模块在链路中的功率电平为 27 dBm,工作在线性区,不会造成后级高功率部分非线性的恶化。

为了实现小型化、轻量化,通道放大器采用多层低温共烧陶瓷一体化封装技术,将所有元器件和电路集成在 13 层的一体化陶瓷封装结构中。该结构直接焊接在硅铝外壳中并采用可伐材料盖板密封,其中,陶瓷材料使用 Ferro-A6S 基板。1~4 层用来形成隔墙,进行气密性封装;第 5 层主要进行低频走线、表贴电阻、电容等器件的组装;6~13 层实现 RF 走线,芯片、器件组装以及射频低频隔离等功能。通道放大器的具体实现结构和实物如图 4(a)(b)所示。

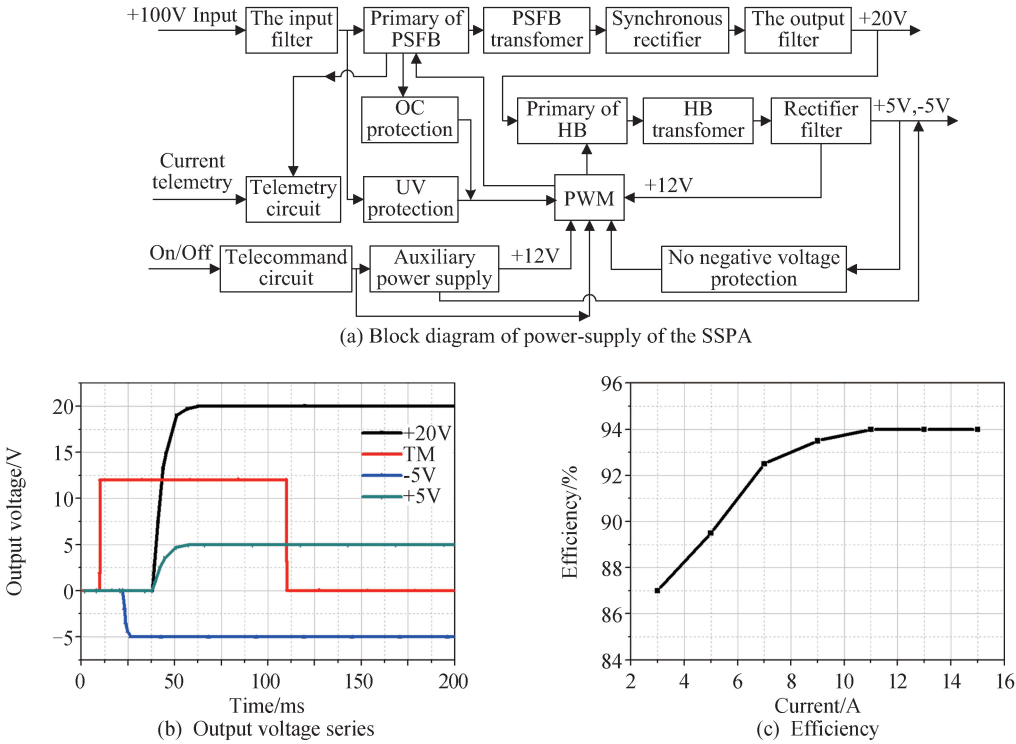


图 3 电源电路原理及测试结果
Fig. 3 Prototype and measured result of DC-DC circuit

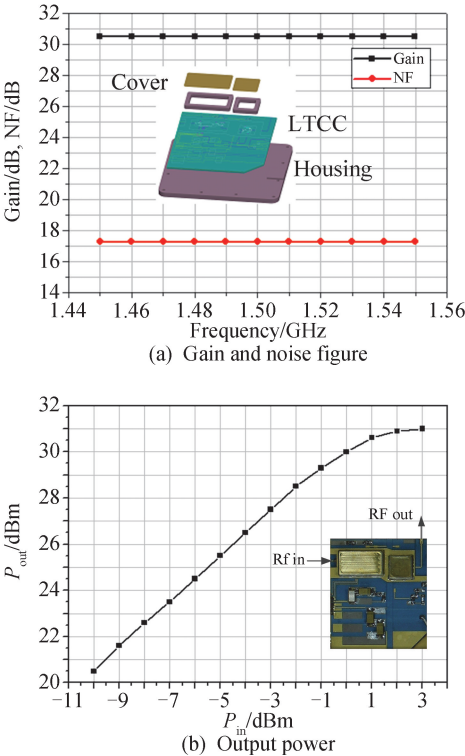


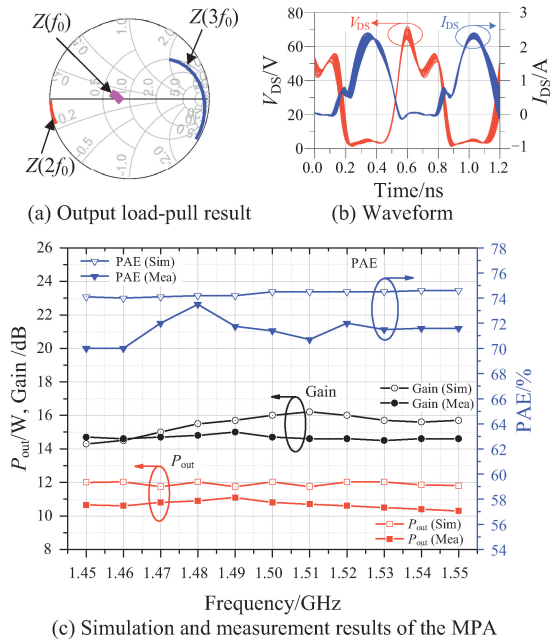
图 4 通道放大器模块设计仿真结果
Fig. 4 Simulation result of channel amplifiers

3.2 驱动功率放大器

驱动功率放大器基于 GaN 功率晶体管,采用 F 类设计^[9,11],晶体管的栅极和漏极偏置电压分别为-3.2 V 和 28 V。采用基于谐波匹配的波形赋形技术^[2],对晶体管的基波阻抗、二次和三次谐波阻抗同时匹配以实现高效率。首先,对晶体管进行负载牵引,得出其最佳的基波以及高次谐波阻抗,如图 5(a)所示。其次,根据阻抗值,采用微带形式进行匹配电路设计,图 5(b)给出了在该阻抗值下晶体管对应的漏极电压(V_{DS})和电流(I_{DS})波形。仿真中,晶体管的寄生参数已去嵌入,因此,阻抗和电压电流波形是从本征电流源平面(I_{gen} 平面)得到的。从波形可以看出, V_{DS} 近似方波, I_{DS} 接近半波整流正弦,近似满足 F 类功放的工作模式。

基于设计仿真,加工了驱动放大器样品并对其进行了性能测试,结果如图 5(c)所示。在 1.45~1.55 GHz 工作带宽内,该驱放输出功率大于 10 W,功率增益(Gain)大于 14 dB,功率附加效率(PAE)高于 70%,测试与仿真结果吻合

良好,验证了设计仿真的正确性。



好,验证了设计的正确性。

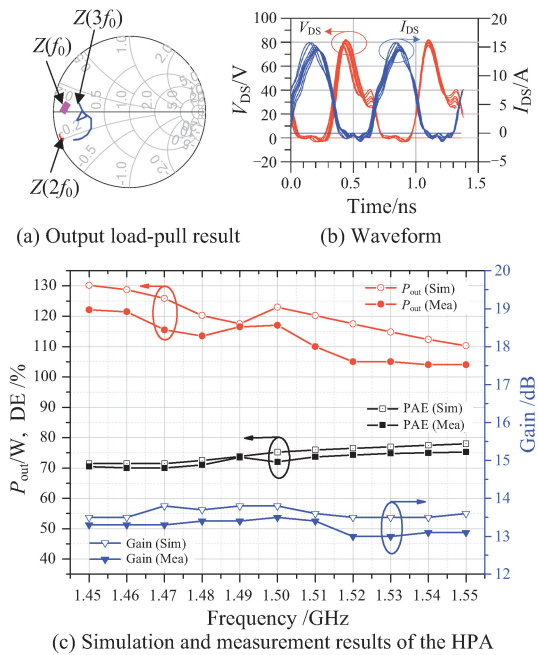


图 5 驱动放大器设计仿真及测试结果
Fig. 5 Simulation and measured result of MPA

图 6 末级放大器设计仿真及测试结果
Fig. 6 Simulation and measurement results of HPA

3.3 末级功率放大器

末级功率放大器同样基于 GaN 功率晶体管,不同于驱动级,末级晶体管输出功率高,栅极宽度大,因此基波阻抗低,漏源级的寄生电容 C_{ds} 大,难以实现高次谐波的高阻抗匹配要求,因此,末级晶体管的输出匹配设计基于连续模 B-J 类^[1],栅极和漏极偏置电压分别为 -3 V 和 28 V ,采用微带电路进行匹配设计,将 C_{ds} 也计入匹配电路中。在设计时,对晶体管的寄生参数去嵌入,到了本征电流源平面(I_{gen} 平面)上的输出阻抗及电压和电流波形,如图 6(a)(b)所示。可以看出,其输出基波和三次谐波阻抗较低,近似为纯电阻特性,二次谐波阻抗为纯电抗特性。 V_{DS} 和 I_{DS} 均近似半波整流正弦波形,相位近似相差 180° 。匹配设计时,在实现高效率的同时,兼顾线性性能,优化末级功放特定工作点的线性特性,以提高整机线性度。

基于设计仿真,加工了末级功放样品并对其进行了性能测试,结果如图 6(c)所示,在 $1.45\sim 1.55\text{ GHz}$ 频率范围内, P_{out} 大于 105 W ,最大功率 122 W ,附加效率 (PAE) 高于 70% ,最高 75% ,Gain 大于 13 dB ,测试与仿真结果吻合良

为了验证该固态功放的线性特性,将驱动放大器和末级放大器级联,分别测试其幅度-幅度变化 (AM/AM)、幅度-相位变化 (AM/PM),和三阶交调性能,结果如图 7 所示。通过优化驱动级和末级晶体管的栅极电压,可以在特定输入功率范围内,实现驱动级功放的增益扩张特性,并以此来补偿末级功放的增益压缩特性,从而在级联后获得较高的线性特性,从测试结果可见,驱动栅极电压为 -3.2 V ,末级栅极电压为 -3 V 的偏置条件下,在输入功率 $15\sim 23\text{ dBm}$ 范围内,级联后的 AM-AM 小于 2 dB ,AM-PM 小于 16° ,IM3 在回退 6 dB 范围内优于 18 dBc 。

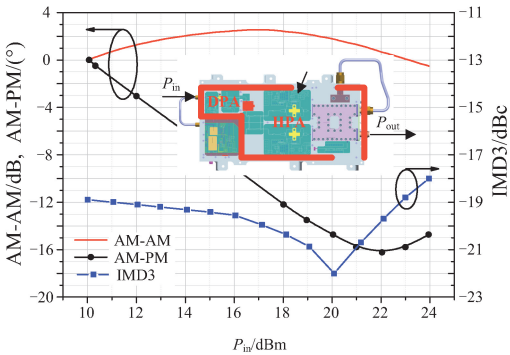


图 7 功率部分(驱动级+末级)非线性特性
Fig. 7 Linearity performance of power section(MPA+HPA)

3.4 功率分配及合成电路

功率分配器(PD)和合成器(PC)均使用四端口正交电桥形式,相对于三端口功分器/合成器而言,正交电桥的驻波更好,隔离度更高,对两路功放的不平衡适应性更强。其中,分配器承受功率较小,采用平面微带形式,兼顾体积和损耗;合成器承受功率高,采用介质填充方同轴形式,满足功率容量和合成效率的要求。分配及合成器的结构模型和参数性能(S parameter)仿真结果分别如图8(a)(b)所示,可以看出,在 1.45~1.55 GHz 频带范围内,分配器插损小于 0.2 dB,平衡度优于 0.1 dB,端口驻波小于-18 dB,隔离度大于 18 dB。合成器插入损耗小于 0.1 dB,平衡度优于 0.1 dB,端口驻波小于-22 dB,隔离度大于 22 dB。

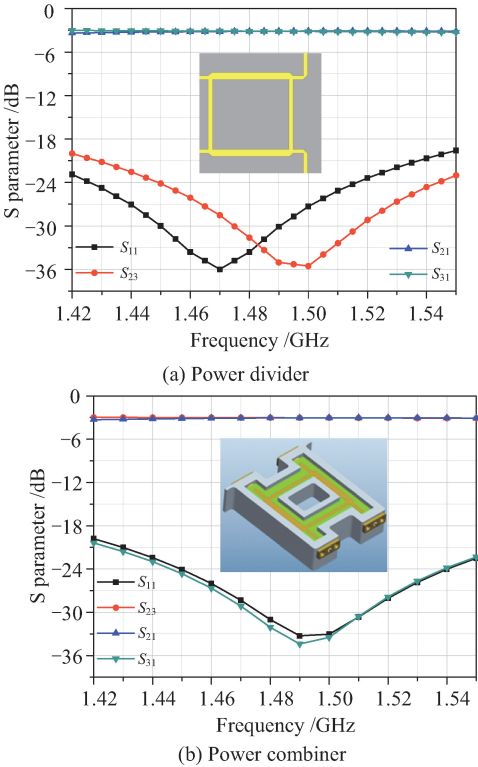


图 8 功率分配及合成器电磁模型及仿真结果
Fig. 8 Model and simulation result of PD and PC

4 整机研制及试验结果讨论

4.1 整机研制及测试结果

完成关键模块性能验证后,对整机进行了集成设计,射频和电源采用独立机壳,避免两者之

间的电磁干扰。各模块之间通过金带或半钢电缆连接,驱动和末级功放之间加入隔离器保证链路稳定性。集成后的整机如图 9 所示。

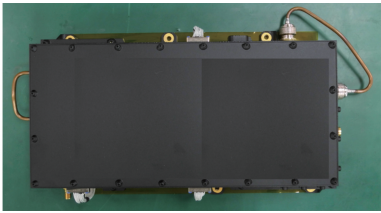


图 9 整机实物照片
Fig. 9 Photo of the implemented SSPA

整机增益、功率及附加效率测试结果如图 10 所示。图 10(a)给出了 1.48 GHz 处输出功率、增益和效率随输入功率变化的测试结果,功率大于 53 dBm,增益高于 57 dB,整机效率超过 60%,峰值效率 64%。图 10(b)给出了三温条件下,工作频带内功率及效率的测试结果,在-25℃~+60℃范围内,100 MHz 工作频带内,固放输出功率大于 200 W,效率高 于 60%。

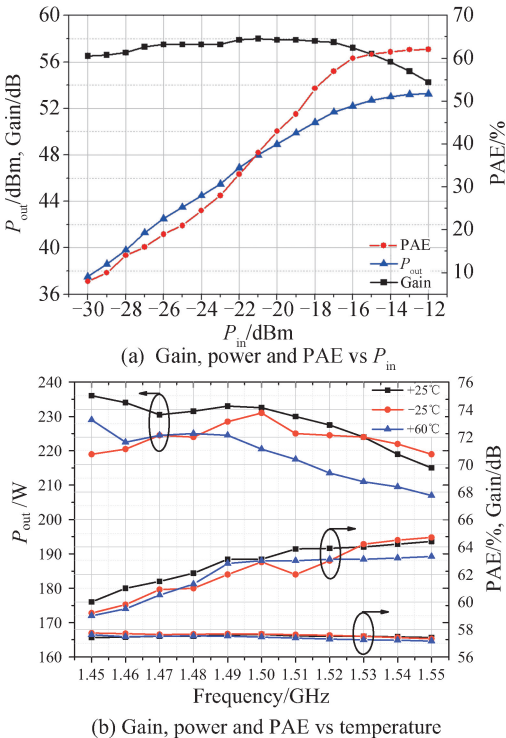


图 10 整机增益、功率及效率测试结果
Fig. 10 Gain, power and PAE measured results of SSPA

整机的其他性能指标如表 1 所示,通过级联优化,整机在输出回退 3 dB 范围内交调优于 18 dBc,饱和点 AM/PM 小于 1.2°/dB,相移优于 17°,杂波优于 70 dBc。

表 1 其他指标测试结果

Table 1 Other characteristic measurement results

Item	Results	Item	Results
AM/PM	<1.2(°)/dB	VSWR	<1.25
Phase shift	<17(°)/dB	Harmonic	>23 dBc
Phase step	360/5.6 °	Spur	>70 dBc
Gain step	30/1 dB	IM3	>18 dBc

4.2 整机热设计及测试结果

固放是载荷主要发热设备,为保证寿命,要求工作在一级降额温度以下,为满足以上要求,对整机进行了详细热设计。末级功率放大器采用陶瓷基板制作匹配电路并将末级晶体管及陶瓷基板焊接在金刚石铜热沉上,再将热沉焊接至机壳上实现良好散热。金刚石铜热导率接近 550 W/(C·K),可以有效降低从晶体管到机壳的热阻。仿真结果如图 11(a)所示。在 55℃ 环境温度下,末级晶体管的壳体温度最高为 88.6℃,通过热阻计算其结温为 137.3℃。采用热成像仪对高温工作时的末级晶体管壳温进行测试,结果如图 11(b)所示,实测管壳温度为 91.3℃左右,对应其结温为 140℃。热成像测试结果与仿真结果吻合较好,验证了热设计的有效性,确保固放能够满足宇航长寿命高、可靠的使用要求。

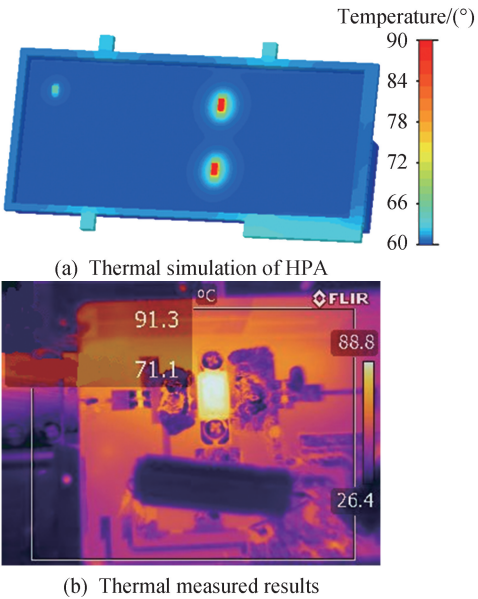


图 11 热分析及测试结果

Fig. 11 Thermal simulation and measurement results

4.3 测试结果对比

表 2 为本文研制的固放与国内外文献公开报道的同类型星载固放的性能对比,相对于文献[15-17],本文在输出功率和效率方面优势明显。相较于文献[7,13-14],本文的效率更优,其中文献[7]仅报道了末级功率管的技术指标,文献[13-14]]分别为伽利略二代和 GPS 三代卫星固放验证件的技术指标,代表目前国际最高水平。以上对比表明,本文报道的固放在国内属领先地位,在国际上处于先进水平。

表 2 本文与公开报道的同类星载固放的性能对比

Table 2 Performance comparisons with previous space-qualified SSPAs

Ref	Status	Frequency/ GHz	PAE/ %	P_{out} / dBm	Gain/ dB	IM3/ dBc
[7]	HPA	1.55~1.60	71.0	54.8	18.0	—
[13]	SSPA	1.55~1.60	44.0	55.0	65.0	—
[14]	RF Unit	1.10~1.60	60.0	56.0	53.0	—
[15]	SSPA	1.15~1.25	50.0	47.0	47.0	20
[16]	SSPA	L band	52.0	47.2	50.0	20
[17]	SSPA	L band	48.5	51.37	74.7	—
This paper	SSPA	1.45~1.55	60.0	53.0	57.0	18
	RF Unit	1.45~1.55	64.0	53.0	57.0	18
	HPA	1.45~1.55	71.0	50.7	13.0	—

5 结论

本文研制了星载 L 频段 200 W 高效固态功率放大器。首先,对关键模块及其设计方法进行了论述,采用 LTCC 一体化集成封装技术,实现了低频控制以及小信号部分的高集成和小型化。采用波形赋形技术,实现了大功率、高效率的末级功放。通过驱动级和末级级联调节,优化了线性指标。其次,完成了整机的集成设计及加工测试,在 1.45~1.55 GHz 频率范围内,整机增益高于 57 dB,输出功率大于 200 W,效率和三阶交调分别优于 60% 和 18 dBc,具备 30 dB 增益及 360°相位可调功能,同时,可进行工作模式选择(FGM 或 ALC)。通过和国内外公开报道的文献结果对比,该功率放大器性能优良,为目前国内星载固放领域,连续波功率和效率最高的单

机,达到了国际先进水平。

参考文献(References)

[1] CRIPPS S C. RF power amplifiers for wireless communications [M]. 2nd ed. Norword: Artech House Publishers,2006:45-47

[2] TASKER P. Practical waveform engineering [J]. IEEE Microwave Magazine,2009,10 (7):65-76.

[3] ROCHETTE S,VENDIER O,LANGREZ D,et al. A high efficiency 140W power amplifier based on a single GaN HEMT device for space applications in L-band [C]// Proceedings of 7th European Microwave Integrated Circuit Conference. Amsterdam:IEEE,2012:127-130.

[4] GREEN C R,SEYMOUR C D. 80W GaN SSPAs for spaceflight application[C]//Proceedings of Seattle:IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. IEEE,2013:1-3.

[5] HIRANO T,SHIBUYA A,KAWABATA T, et al. A 70W C-band GaN solid state power amplifier for satellite use [C]//Proceedings of IEEE Asia-Pacific Microwave Conference. Sendai:IEEE,2014:783-785.

[6] KOSAKA N,KUWATA E,HANGAI M, et al. A high efficiency GaN HEMT high power amplifier at L-band[C] // Proceedings of IEEE Asia-Pacific Microwave Conference. Sendai:IEEE,2014:789-791.

[7] OSAWA K,YOSHIKOSHI H,NITTA A, et al. Over 74% efficiency, L-band 200W GaN-HEMT for space applications[C]//Proceedings of IEEE 46th European Microwave Conference. London:IEEE,2016:397-400.

[8] KIDO M,KAWASAKI S,SHIBUYA A, et al. 100W C-band GaN solid state power amplifier with 50% PAE for satellite use [C]//Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference. IEEE,2016:1-4.

[9] WU H,YUK K S,BRANNER G R. A compact 100W, 68% class F GaN power amplifier for L-band GPS [C]// Proceedings of IEEE 20th Wireless and Microwave Technology Conference. Cocoa Beach:IEEE,2019:1-4.

[10] GIOFRÉ R,COLANTONIO P,GONZÁLEZ L, et al. A GaN high power and efficient amplifier for L-Band Galileo system [C]//Proceedings of Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits Workshop. Taormina:IEEE,2015:1-3.

[11] WU H,YUK K S,BRANNER G R. High power class F

GaN HEMT power amplifier in L band for global positioning systems application [C] // Proceedings of Cocoa Beach: IEEE 19th Wireless and Microwave Technology Conference. IEEE,2018:1-4.

[12] GIOFRÉ R,COLANTONIO P,GONZÁLEZ L, et al. A 300 W complete GaN solid state power amplifier for positioning system satellite payloads [C]//Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium. San Francisco:IEEE,2016:1-3.

[13] GIOFRÉ R,COLANTONIO P,GONZÁLEZ L, et al. Design realization and tests of a space-borne GaN solid state power amplifier for second generation Galileo navigation system[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,2018,54(5):2383-2396.

[14] KATZ A,MACDONALD J,DORVAL R, et al. High-efficiency high-power linearized L-band SSPA for navigational satellites [C]//Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu: IEEE, 2017:1834-1837.

[15] 陈炽,胡涛,陈俊,等. 星载氮化镓功率放大器设计[J]. 固体电子学研究与进展,2014,34(5):440-444.

CHEN C,HU T,CHEN J, et al. Design of GaN power amplifier for space application[J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2014, 34 (5): 440-444 (in Chinese).

[16] 敬小东,钟世昌,邱钢,等. 基于国产 GaN HEMT 器件的星载高效功放设计[J]. 固体电子学研究与进展,2015,35 (6):438-443.

JING X D,ZHONG S C,QIU G, et al. The desing of high efficiency sspa for space application using domestic GaN HEMT device[J]. Research & Progress of Solid State Electronics,2015,35(6):438-443(in Chinese).

[17] 王晓会. 基于 GaN 器件的 L 波段固态功放研制[J]. 电子科技,2018,31(7):31-33.

WANG X H. The design of L-band SSPA based on GaN [J]. Electronic Science and Technology,2018,31(7):31-33(in Chinese).

作者简介:

杨飞(1985—),男,研究员,研究方向为星载微波射频系统、固态功率放大器等,yfxjtu@163.com。

殷康(1984—),男,高工,研究方向为星载微波射频系统、固态功率放大器等,yinkang504@163.com。

(编辑:高珍)