

Ku 波段 30W 脉冲微波功率放大器模块

陈高鹏[†] 陈晓娟 刘新宇 李 滨

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 报道了 Ku 波段 30W 脉冲微波功率放大器模块的研制. 模块的微波放大链路由 5 级固态功率器件级联构成, 采用新颖的双层腔体结构, 消除了低频电路与高频电路的互扰. 针对 Ku 波段内匹配 MESFET 设计了双段式偏置电路, 有效抑制了低频振荡. 在脉冲重复频率 3kHz, 占空比 10% 下, 模块在 13.5~14.0GHz 工作频段内的功率增益 $G_p \geq 44\text{dB}$, 输出脉冲峰值功率 $P_{pk} \geq 30\text{W}$, 总效率 $\eta \geq 13\%$ (A 类放大状态).

关键词: Ku 波段; 微波功率放大器; 模块; 脉冲模式
EEACC: 1350F

中图分类号: TN722.1⁺6 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2008)11-2281-05

1 引言

Ku 波段脉冲微波功率放大器模块是 Ku 波段雷达、电子战以及卫星通信导航系统中的核心部件. 随着应用系统的不断演进, 研制小型化、大功率、高效率和高可靠性的微波功率放大器模块, 对于国防及民用需求具有重要意义^[1].

国外研究机构利用 MMIC 及高密度封装等先进技术, 在 Ku 波段固态功率放大器模块的研究领域, 已经取得了大量优秀的研究成果^[2,3]. 受限于微波固态功率器件及封装技术的发展, 国内在 Ku 波段固态功率放大器模块的研究上处于较为落后的状态, 输出功率、效率以及体积等指标都有待进一步提高^[4,5].

采用真空电子器件的微波功率放大模块具有比固态器件更高的输出功率和效率, 但是其较大的重量及体积, 限制了其在现代电子系统中的应用. 小功率 Ku 波段微波功率放大器模块的研制, 可以采用微波单片集成电路或混合集成电路^[2]; 采用波导和空间功率合成等技术的大功率模块, 体积和重量仍然受到限制. 微波功率放大器模块对工作效率的要求非常严格, 尤其是在星载和机载应用中; 同时高频电路与低频电路间的互扰、低频振荡以及可靠性设计^[6]也是微波功率放大器模块设计中的难点和重点.

本文报道的 Ku 波段脉冲微波功率放大器模块采用结构简单并且可靠性高的平面微带线完成微波链路, 有效减小了重量和体积. 在机械结构上采用新颖的双层腔体设计, 将微波电路和脉冲控制电路、偏置电路等进行隔离, 消除了高频和低频电路的相互影响并且提高了模块的可靠性. 针对内匹配微波功率器件, 设计了可以提高稳定性、宽带性能、低频振荡抑制能力及谐波抑制能力的偏置电路. 依据实际工程应用指标, 放大器模块在功率和体积、效率与线性度等方面实现了灵活的折中

设计. 经过常温及高、低温可靠性测试, 模块在 13.5~14.0GHz 工作频段内性能优良.

2 脉冲微波功率放大器模块设计

2.1 系统设计

为满足实际应用需求, Ku 波段 30W 脉冲微波功率放大器模块要求实现如表 1 所示的设计指标.

Ku 波段 30W 脉冲微波功率放大器模块的系统设计如图 1 所示. 微波放大链路由三级组成: 驱动级为 30dB 增益的 GaAs 单片集成电路; 中间级为 3 个内匹配 GaAs MESFET 功率管, 总增益为 10dB; 输出级为输出功率 30W 的内匹配 GaAs MESFET 功率管, 其增益为 6dB. 所采用功率器件均为高可靠性、技术成熟的商用产品.

机械结构设计上采用新颖的上下两层腔体结构, 将安装在上层腔体的高频电路(包括微波放大链路及偏置电路等)与安装在下层腔体的低频电路在物理空间上进行分隔. 两者之间通过安装在腔体壁上的穿心电容进行电气连接, 这种结构可以有效降低低频电路对敏感高频电路的干扰, 并且方便测试及调试排错. 在上层腔体

表 1 Ku 波段脉冲微波功率放大器模块设计指标

Table 1 Design specification of Ku band pulsed microwave power amplifier module

| Parameter | Limit |
|----------------------------|--------------------|
| Frequency range | 13.5~14.0GHz |
| Peak output power | $\geq 30\text{W}$ |
| Pulse repetition frequency | 3kHz |
| Duty cycle | 10% |
| Gain | $\geq 44\text{dB}$ |
| Power supply | $\pm 12\text{V}$ |
| Total efficiency | $\geq 12\%$ |

[†] 通信作者. Email: chen.gaopeng@gmail.com

2008-04-23 收到, 2008-07-22 定稿

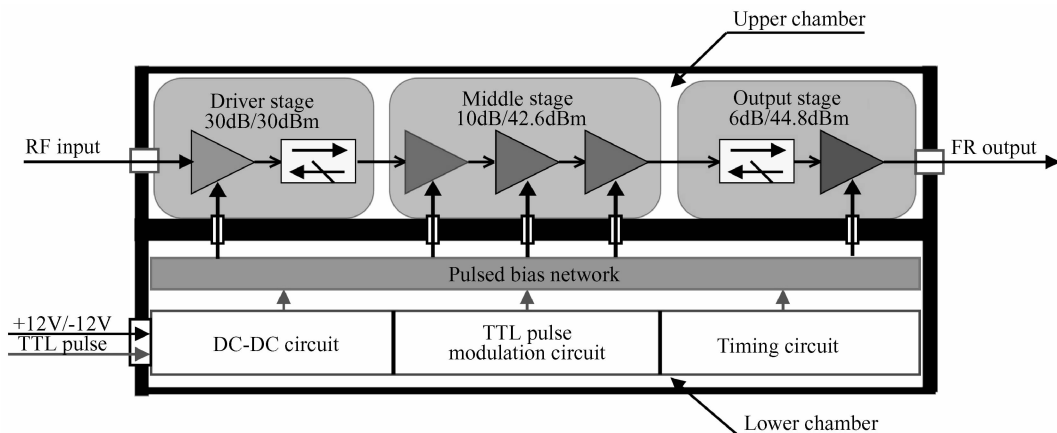


图 1 Ku 波段 30W 脉冲微波功率放大器模块系统设计

Fig.1 System design of Ku band 30W pulsed microwave power amplifier module

设计中,安装高频电路板的腔体宽度 D 须满足: $D < \frac{\lambda_U}{2}$, 其中 λ_U 为工作频段高端频率点所对应的波长. 否则,微带线不连续处产生的微波辐射,将在腔体内产生波导型传播,使增益平坦度变差,在某些频点上造成尖峰甚至导致自激振荡^[4].

微波电路板采用介电常数 $\epsilon_r = 2.2$, 厚度 $H = 0.508\text{mm}$ 的玻璃纤聚四氟乙烯材料. 根据公式 $Z_0 =$

$$\frac{Z_f}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}} \left[1.393 + \frac{W}{H} + \frac{2}{3} \ln \left(\frac{W}{H} + 1.444 \right) \right]}} \quad [7]$$

计算得到特征

阻抗为 Z_0 的微带线宽度 W , 其中 ϵ_{eff} 为基板有效介电

常数, H 为基板厚度, $Z_f = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_{90}}} = 376.8\Omega$ 为自由空间波阻抗. 基于上述计算结果,并且考虑色散效应对微带线特征阻抗的影响、微带线不连续性对电路幅频特性的影响^[5]以及基板的介质损耗等非理想因素,利用 ADS 软件中的 Momentum 仿真器进行了优化仿真和修正补偿,如表 2 所示. 微波电路的布局要尽量靠近输出口,可尽量减小基板介质损耗对模块功率和效率的影响. 为避免接地不良形成的寄生参数导致正反馈从而产生自激振荡,微波电路板通过导电银浆粘结在上层腔体上,并且通过足够的螺钉固定,同时也获得了良好的散热通路.

在下层腔体中放置采用 FR4 基板的低频电路板,对直流供电电压 $\pm 12\text{V}$ 进行 DC-DC 变换;对输入的 TTL 脉冲控制信号进行处理,完成脉冲调制和微波功率管上电时序保护及输入微波信号的时序嵌套. 从而,

表 2 微带线宽度修正补偿

Table 2 Correction and compensation of microstrip lines width

| Characteristic impedance / Ω | Width before C&C /mm | Width after C&C /mm |
|--|-------------------------|------------------------|
| 50 | 1.55 | 1.57 |
| 70 | 0.89 | 0.93 |
| 90 | 0.55 | 0.52 |

驱动级供电电压和中间级、输出级微波功率管的栅极偏置电压受到 TTL 脉冲控制信号的调制,与输入的脉冲微波信号嵌套同步,使微波功率放大器工作在脉冲模式. 在窄脉冲模式下,模块的输出功率通常比连续波模式高 0.5 到 1dB^[2].

2.2 内匹配微波功率管的偏置电路设计

偏置电路对微波功率管提供稳定的直流偏置,同时还应确保偏置电路与微波链路互不影响:微波链路中传输的微波能量通过偏置网络的对外泄露要尽可能小;偏置网络的插入不会使微波功率管进入不稳定工作区域.

驱动级的微波单片集成电路有单独的偏置管脚,只需在偏置管脚上直接加入相应的直流电压即可. 中间级和输出级为内匹配 GaAs MESFET 器件,偏置管脚与微波输入、输出管脚共用,偏置电路设计较为复杂.

图 2 为设计的 Ku 波段内匹配 GaAs MESFET 的偏置电路. 图中所示 Z_0 为 50Ω 微带线,是微波放大链路的主线. Z_1 , Z_2 和 Z_3 为高特征阻抗(大于 50Ω)的四分之一波长短路线(SCSS),与扇形开路线(OCSS) C_x 一起构成微带线阻抗变换网络,使偏置电路对于微波信号及其奇次谐波为开路,而对于偶次谐波为短路. 有效阻止了工作频段内微波信号通过偏置网络的泄露,同时将偶次谐波滤除并保留所有奇次谐波,有利于提高微波功率放大器模块的线性度及输出功率^[8]. 漏极偏置使用了两段 SCSS 和 OCSS,相比使用单段 SCSS 和 OCSS,可以拓展电路的工作带宽. 图 3 所示为 ADS 软件仿真两段式偏置电路与单段式偏置电路的插入损耗对比. 电路中采用的 SCSS 和 OCSS 的几何尺寸,通过 ADS 软件仿真优化得到.

栅极串联电阻 R_1 和漏极并联电阻 R_2 一般取为 50Ω ,用来消除微波功率管输入输出端口的实数负阻抗,使电路稳定^[9]. 电容 $C_1 \sim C_3$ 为射频旁路电容,与 C_x 一起起到阻抗变换和滤除射频干扰的作用; $C_4 \sim C_6$ 作为视频旁路电容滤除偏置电源纹波,使偏置电压平稳. 由于采用栅极脉冲调制方式,栅极旁路电容的取值要尽可能小,否则将使模块的发射脉冲上升沿和下降沿

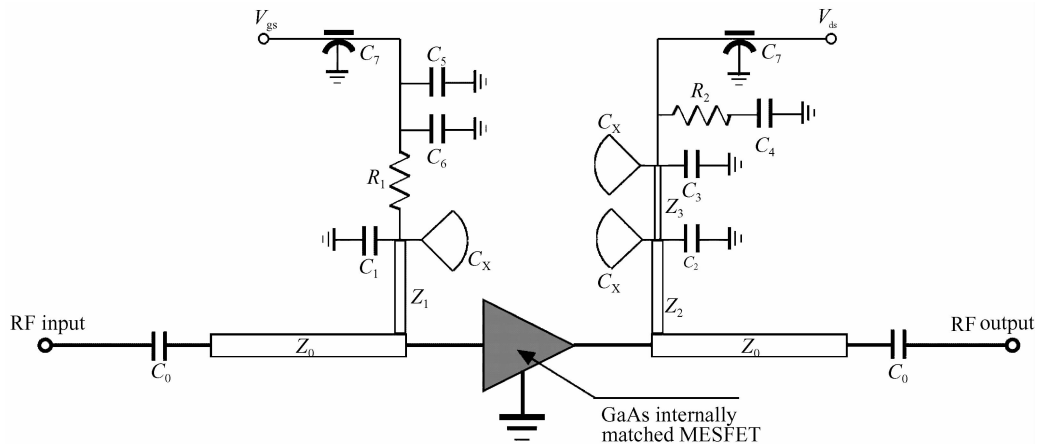


图 2 Ku 波段内匹配 GaAs MESFET 偏置电路

Fig.2 Bias circuit for Ku band internally matched GaAs MESFET

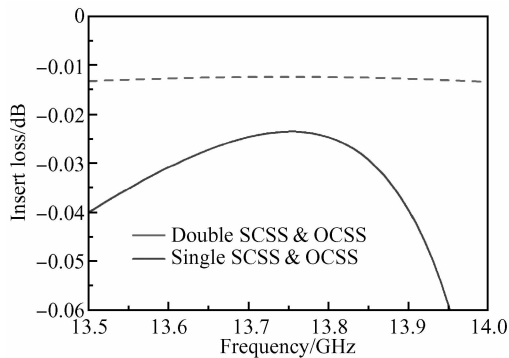


图 3 两段 SCSS 和 OCSS 偏置与单段 SCSS 和 OCSS 偏置插入损耗对比
Fig.3 Insert loss comparison of double SCSS & OCSS and single SCSS & OCSS bias

变差. 穿心电容 C_7 连接上层腔体的微波电路与下层腔体的低频电路, 同时也起到抑制低频振荡的作用. 电容 C_0 为微波链路主线上的隔直流电容, 应该选用自谐振频率高于工作频段的微波电容, 减小它引入的插入损耗.

3 测试结果与讨论

根据上述设计方案, 制作的 Ku 波段 30W 脉冲微波功率放大器模块如图 4 所示, 其有效体积为 $200\text{mm} \times 100\text{mm} \times 20\text{mm}$, 重量为 0.8kg, 完全满足应用需要.

3.1 小信号增益测试

在连续波工作模式下测试得到如图 5 所示的小信号增益特性.

可以看到, 连续波模式下模块在 13.5~14.0GHz 工作频段内的小信号增益 $G \geq 44\text{dB}$, 增益不平坦度为 $\Delta G < \pm 0.5\text{dB}$. 在连续波模式下, 微波功率管都处于连续工作状态, 功率放大器模块消耗的电流很大: 18.7A @ +12V. 在测试过程中要妥善设置模块的散热路径, 并尽可能缩短操作时间.

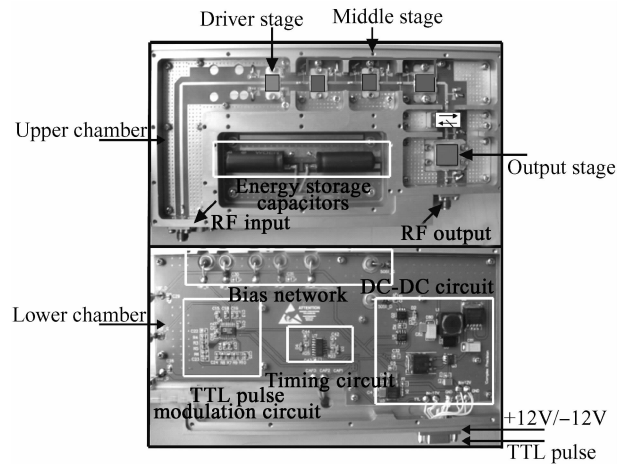


图 4 Ku 波段脉冲微波功率放大器模块照片

Fig.4 Photograph of Ku band pulsed microwave power amplifier module

3.2 脉冲功率及可靠性测试

脉冲功率测试的方法及结果如图 6 所示. 微波信号源与功率放大器模块都受到由脉冲发生器产生的 TTL 控制脉冲调制, 并且在时序上嵌套同步; 模块的输出信号经过射频耦合器分为两路分别输入脉冲功率计和频

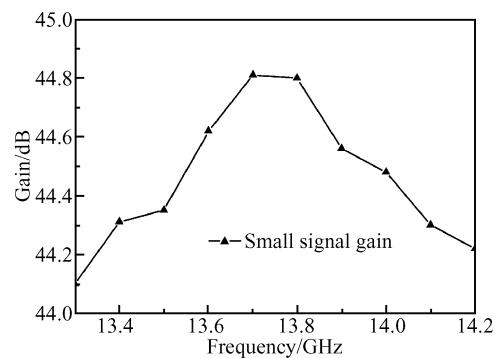


图 5 Ku 波段微波功率放大器模块的小信号增益

Fig.5 Small signal gain of Ku band microwave power amplifier module

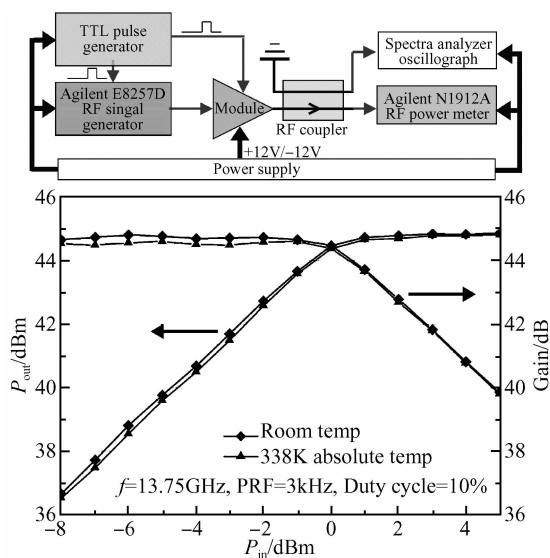


图 6 功率放大器模块脉冲功率测试方法和结果

Fig. 6 Pulse power test method and result of power amplifier module

谱分析仪及示波器,可以同时得到模块输出功率值、频谱图及发射脉冲上升沿与下降沿时间.图中菱形线条为在室温(+25℃)下的测试结果:线性功率增益 $G_p \geq 44\text{dB}$,输出脉冲峰值功率 $P_{pk} \geq 44.81\text{dBm} = 30.3\text{W}$ (工作频率13.75GHz,脉冲重复频率3kHz,占空比10%).模块的平均电流为 $1.85\text{A}@+12\text{V}$,可以计算得到模块的总工作效率为: $\eta = \frac{30.3\text{W} \times 10\%}{12\text{V} \times 1.85\text{A}} \times 100\% = 13.65\%$,完全满足实际应用要求^[10].

还进行了高、低温环境可靠性实验,在环境温度分别为+65和-40℃条件下,分别保温4h然后分别通电工作并测试;在环境温度为+75和-45℃条件下,分别保温贮存48h和24h,恢复常温后分别通电工作并测试.图5中三角形线条所示为高温工作环境下模块的脉冲功率测试结果.在高温和低温条件下,模块的线性增益都降低约0.2dB,但是饱和输出功率仍然可以达到44.81dBm.实验证明,研制的Ku波段30W脉冲微波功率放大器模块可以在恶劣环境温度中正常工作,可靠性较高.

在上述测试中,模块中各级功率管都工作在A类放大状态,保证了比较高的线性度.由于设计了非常灵活的偏置电路,可以方便地改变各级功率管的工作状态,以适应各种不同的应用需求.当工作在AB类或B

类放大状态时,模块消耗的平均电流将大幅降低,在牺牲一定线性度的情况下可以获得更高的工作效率.

4 结论

本文报道了Ku波段30W脉冲微波功率放大器模块的研制.设计了新颖的双层腔体结构和灵活的高性能偏置电路.经过完整的小信号增益、脉冲功率和高低温可靠性测试,模块在13.5~14.0GHz工作频段内功率增益 $G_p \geq 44\text{dB}$,输出脉冲峰值功率 $P_{pk} \geq 30\text{W}$,总效率 $\eta \geq 13\%$ (脉冲重复频率3kHz,占空比10%,A类放大状态),完全满足实际应用需要.

参考文献

- [1] Liao Fujiang, Li Dezhang. Microwave power module: The key electron device for next generation weapon systems. Vacuum Electronics, 1995, 3: 1 (in Chinese) [廖复疆, 李德章. 微波功率模块: 下一代武器系统的关键电子器件. 真空电子技术, 1995, 3: 1]
- [2] Gat M, Day D S. Eight watt Ku-band module. IEEE MTT-S Digest, 1991: 1299
- [3] Le Gallou N, Ludwiq M, Mavrocordatos C, et al. 50W L-band and 25W Ku-band SSPA for European space programs. IEEE Microwave Conference, 2005: 4
- [4] Liao Jia, Yu Xiaojun. Design of multistage power amplifier in Ku band. Electronic Engineer, 2003, 29(4): 62 (in Chinese) [廖佳, 于小军. Ku波段多级功率放大器的研制. 电子工程师, 2003, 29(4): 62]
- [5] Yang Hongmei. Research of Ku-band high sensitivity receiving module. Cryogenics and Superconductivity, 2004, 32(3): 65 (in Chinese) [杨红梅. Ku波段高灵敏度接收模块的研制. 低温与超导, 2004, 32(3): 65]
- [6] Lee S, Lee M, Choi D S. Thermal and moisture induced stressing effects of RF power amplifier modules. Int'l Symposium on Electronic Materials and Packaging, 2001: 296
- [7] Li Shuchong, Han Zhenyu, Wu Dexin. Design and implementation of a 2.5GHz RF power amplifier and low noise amplifier module. Microelectronics, 2005, 35(1): 18 (in Chinese) [李树翀, 韩振宇, 吴德馨. 2.5GHz RF功率放大器和低噪声放大器模块的设计与实现. 微电子学, 2005, 35(1): 18]
- [8] Cripps S C. RF power amplifiers for wireless communications. Boston: Artech House, 2006
- [9] Liu W. Handbook of III-V hetero-junction bipolar transistors. New York: Wiley, 1998
- [10] He Pengjun, Zhang Guanjie, Yan Zirang. Universal combined microwave power module for high power transmitter. Avionics Technology, 2005, 36(2): 42 (in Chinese) [何鹏军, 张冠杰, 闫自让. 大功率发射机的通用组合微波功率模块. 航空电子技术, 2005, 36(2): 42]

A Ku Band 30W Pulsed Microwave Power Amplifier Module

Chen Gaopeng[†], Chen Xiaojuan, Liu Xinyu, and Li Bin

(*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: This paper reports the design and performance of a pulsed microwave power amplifier module that uses microstrip lines and five-stage solid-state devices. A novel two-layer chamber structure is designed for the cancellation of crosstalk between low-frequency circuits and high-frequency circuits. A two-section bias circuit for the GaAs internally matched MESFETs is presented, with which the low-frequency oscillations can be suppressed effectively. When operating over 13.5~14.0GHz at a duty cycle of 10% with 3kHz pulse repetition frequency, the power amplifier module shows a power gain of $G_p \geq 44\text{dB}$, an output pulsed peak power of $P_{pk} \geq 30\text{W}$, and a total efficiency of $\eta \geq 13\%$ (class A power amplification).

Key words: Ku band; microwave power amplifier; module; pulse mode

EEACC: 1350F

Article ID: 0253-4177(2008)11-2281-05

[†] Corresponding author. Email: chen.gaopeng@gmail.com

Received 23 April 2008, revised manuscript received 22 July 2008