

文章编号: 2095-4980(2020)06-1147-04

## S 波段射频前端小型化的设计与实现

张 毅, 马兴胜

(南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039)

**摘 要:** 随着相控阵雷达技术的发展, 射频前端作为 T/R 组件的核心器件, 向高性能、高可靠、多功能、小型化及低成本趋势不断发展。本文使用 GaN 功率器件和微组装技术, 结合几种关键器件小型化的方法, 设计了 S 波段小型化射频前端。在 6~8 dBm 输入的条件下, 发射通道输出功率达到 200 W, 效率达到 50% 以上; 接收通道可实现 30 dB 的增益和 1.5 dB 噪声系数的设计指标。该技术已广泛用在射频相关产品中。

**关键词:** 微组装; GaN 功率管; 射频前端小型化; 限幅低噪放

**中图分类号:** TN803.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2019242

## Miniaturization design and implementation of the S band front-end module

ZHANG Yi, MA Xingsheng

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing Jiangsu 210039, China)

**Abstract:** With the development of phased array radar technology, as the key device of T/R module, front-end module is evolving towards the directions of high performance, high reliability, multi-function, miniaturization and low cost. The module is implemented by microwave hybrid integrated process and micro-assembly technology. In the case of input power of 6 to 8 dBm, the output power of 200 W is achieved, with efficiency as high as 50%. The gain of the receiving channel is larger than 30 dB and the Noise Figure(NF) is less than 1.5 dB in defined bandwidth. Test results show that the module performance is up to the specifications and sufficient to meet the requirements of practical application.

**Keywords:** micro-assemble; GaN amplifier; front-end module miniaturization; limiting and LNA

在现代战争中, 雷达面临复杂多变的战场环境, 威胁日益加剧, 作为新体制的相控阵雷达得到越来越广泛的应用, 其规模也在不断扩大<sup>[1]</sup>。T/R 组件作为相控阵雷达的核心元件<sup>[2-4]</sup>, 通常配备了几千到几万个组成阵列的射频收发前端。有源相控阵雷达除要求前端具备大功率、宽频带、高效率、低噪声、高增益的电性能指标外, 还要求体积小, 质量轻, 价格低。

第三代半导体材料中的 GaN 材料具有禁带宽度大、击穿强度高、峰值电子漂移速度高、热传导率高等特点, 以 GaN 材料制成的微波功率器件具有高功率密度、高增益、大带宽、高功率等特点, 且 GaN 芯片阻抗较高, 降低了电路匹配和合成的复杂性, 可直接采用功率芯片合成实现高功率放大器, 显著提高功率放大器的各项性能, 并对雷达发射机及电子整机系统带来深远的影响<sup>[1]</sup>。

微波组件微组装技术是实现雷达和通信等电子整机小型化、轻量化、高性能和高可靠的关键工艺技术, 尤其是微波多芯片组件技术、三维立体组装技术和系统级微组装技术近年来发展迅速, 应用广泛, 在新一代信息化电子装备的研制生产中发挥了巨大作用。

### 1 组成与原理

射频前端组成和原理如图 1 所示, 主要由射频开关、高增益功率模块、大功率模块、限幅低噪放、调制和保护电路、滤波器组成。在发射周期内, 激励信号经过单刀双掷开关切换到发射链路, 由高增益驱动模块和大功率末级模块、两级功率放大器完成射频信号的放大。链路可实现大于 45 dB 的增益, 将数字板的毫瓦级信号放大到

收稿日期: 2019-07-08; 修回日期: 2019-08-24

作者简介: 张 毅(1974-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事微波固态发射技术与 T/R 组件的设计与研究工作。email: zhangyi\_xm@sina.com

200 W，通过环形器、滤波器送至天线单元。在接收周期内，回波信号经过环形器、滤波器，再进行限幅控制，通过限幅低噪放大后，由开关输出，实现 30 dB 的增益和 1.5 dB 的噪声系数。为了实现小型化，通过微组装技术对二者进行合并。低频电路主要实现发射接收的分时控制、功率管的栅压产生和保护、漏压的调制、限放的供电与调制等功能。

### 1.1 高增益模块

与硅相比，GaN 材料具有高击穿能力、高电子密度及速度、高功率密度、高工作温度的优势，以 GaN MMIC 功率放大芯片为基础的宽频带、大功率高效率功率器件也逐步向着高质量、低成本、易使用、轻量化、小型化方向发展。根据指标，本模块通过两级级联实现 S 波段 32 dB 的增益，40 dBm 的饱和功率输出，原理如图 2 所示，两级之间添加 1.5 dB 的衰减器，一定程度上增加模块的稳定性，降低模块整体增益，防止自激的产生。器件采用混合集成工艺，金属外壳气密封装引线材料为可伐，器件表面镀 NiAu，Ni 层厚度为 1.3~8.9 μm，Au 层厚度为 1.3~5.7 μm，如图 3 所示。

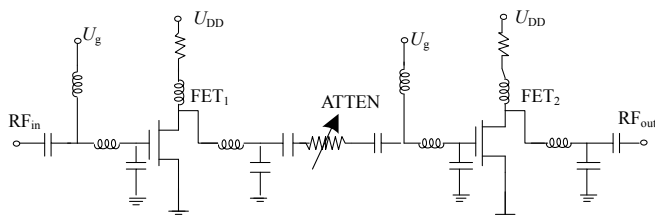


Fig.2 Schematic diagram of the high gain module  
图 2 高增益模块原理图

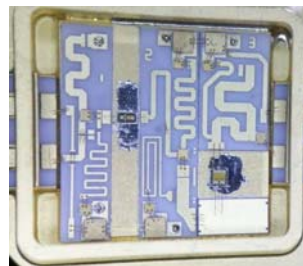


Fig.3 Picture of the high gain module  
图 3 高增益模块芯片电路外形图

### 1.2 大功率功率管

末级功率管的设计是发射通道的重点，它的指标与可靠性关系到系统的成败。该模块的输出功率为 240 W 左右。运用传输线理论，用微波仿真软件，对 4 只 GaN 功率管芯进行阻抗匹配，同时进行功率合成，在大脉冲、大工作比的条件下，实现了在 S 波段输出功率大于 220 W，功率附加效率大于 50% 的 GaN 功率放大器。功率管匹配原理图如图 4 所示。通过负载牵引技术，测出单个功率管芯在最大效率下的输入输出阻抗 ( $Z_{in}/Z_{out}$ )<sup>[5]</sup>；输入端口通过匹配网络，将管芯输入阻抗匹配为实阻抗，便于功率管芯的输入功率分配；输出端口采用同样技术将阻抗匹配到实阻抗；威尔金森功分器将功率进行合成，同时将阻抗匹配到 50 Ω。每个管芯已单独封装成 60 多瓦的单管，已经通过了工程验证，稳定可靠。电路的拓扑结构如图 4 所示<sup>[6]</sup>。

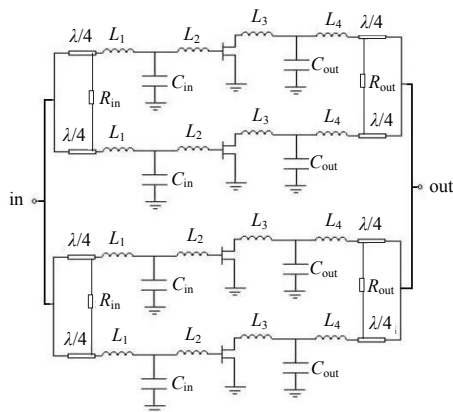


Fig.4 Topological graph of the high-gain module circuit  
图 4 大功率模块电路拓扑图

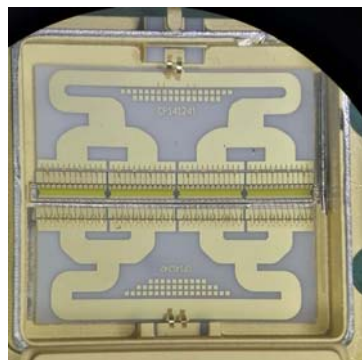


Fig.5 Picture of the GaN power chip  
图 5 GaN 功率芯片电路外形图

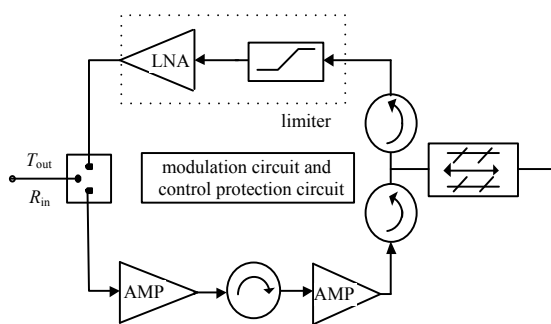


Fig.1 Architecture of front-end module  
图 1 射频前端原理图

器件主要由 GaN 功率管芯、内匹配电路和外壳组成。采用金锡焊料工艺烧结管芯；电路间连接通过金丝键合实现。对于微组装芯片功率放大器，完成设计后，其工艺实现也是十分重要的一环。

首先是材料的选择，功率芯片材料为 GaN，需要考虑与热沉材料的热匹配；同时电路基板材料、厚度等要满足电性能、结构、热匹配等要求。经过综合分析，热沉材料选择 0.5 mm 厚度的铝铜合金，电路基板材料选用厚度 0.25 mm 的氧化铝陶瓷片。其次是微组装工艺的保证，芯片、单层电容、陶瓷板、铝铜基板焊接装配、金丝键合工艺及其精确度需满足要求。最终研制成功的芯片功放电路实物如图 5，该部分外形尺寸为 16 mm×16 mm。

### 1.3 限幅低噪放

根据射频前端接收通道的指标要求，利用混合集成工艺功率容量大的特点和 GaN 单片工艺集成电路体积小、一致性好的优点，设计制造了一款 S 波段大功率小型化平衡式限幅低噪声放大器<sup>[7]</sup>。

限幅器需承受峰值功率 350 W，脉宽 5 ms，占空比 30% 的大功率脉冲信号。为了降低器件的指标压力，本限幅器采用平衡式电路拓扑结构，所以每一路需要承受 175 W 脉冲信号。限幅电路采用两级限幅结构，第一级采用耦合检波结构的有源限幅，使用了两颗 Au 层 7 μm、具有大功率容量的 PIN 二极管管芯。同时在限幅器输入端级联一个耦合检波结构，将一部分信号耦合进检波器，检波得到的直流电流会使 PIN 二极管管芯导通更快。经过第一级限幅，大功率脉冲被消弱到 10 W 量级。第二级通过具有限幅特性的肖特基二极管来降低减小尖峰泄露功率，使限幅电平小于 13 dBm。同时反向的肖特基二极管还会产生强烈的非线性，其中含有的直流分量会进一步加快第一级 PIN 二极管的导通。

限幅低噪放采用一体化设计，如原理图 6 所示。低噪放采用两级高增益场效应管，通过合理的增益分配，在保证增益的条件下，调整匹配电路实现最小的噪声系数。两级都是通过自偏压提供管子的栅压，调制的漏压实现模块的分时控制。

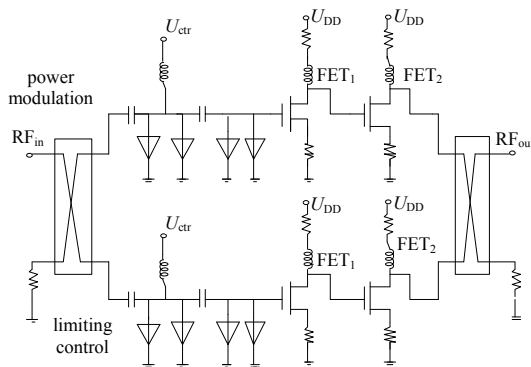


Fig.6 Schematic diagram of Limiting and LNA  
图 6 限幅低噪放原理图



Fig.7 Picture of the Limiting and LNA  
图 7 限幅低噪放外形图

模块中的元件采用氧化铝陶瓷基片、裸芯片、微波集成电路(MMIC)、单层电容、微波端子，通过低温共烧陶瓷(LTCC)工艺烧结、金丝键合后，经测试指标合格之后，如图 7 所示。激光封盖，最后形成正式器件。

## 2 测试结果

本文关键器件取得突破的基础之上，对模块的散热和电磁兼容问题进行了合理布局，设计出了 S 波段大功率小型化射频前端如图 8 所示。模块尺寸为 150 mm×32 mm×12 mm，模块在占空比 30%，脉宽 5 ms 的条件下对发射的发射功率、效率、接收的增益和噪声等主要指标进行测试；测试数据如图 9、10 所示。从测试可以看出，该模块实现了在 800 MHz 的频带范围内，在 30% 占空比、5 ms 脉宽的条件下，发射功率增益 45 dB，输出功率大于 200 W，效率为 50%；接收通道增益 30 dB，噪声系数小于 1.5 dB。

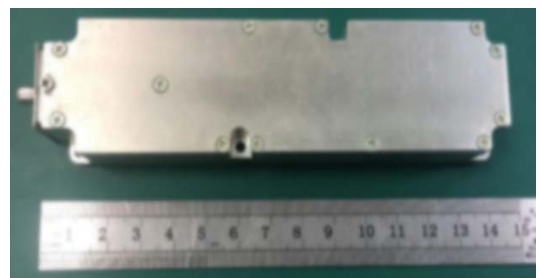


Fig.8 Picture of the front-end module  
图 8 射频前端实物图

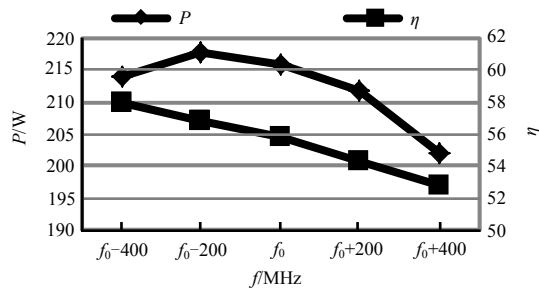


Fig.9 Test data of the transmitting chain  
图 9 发射链路功率和效率测试数据

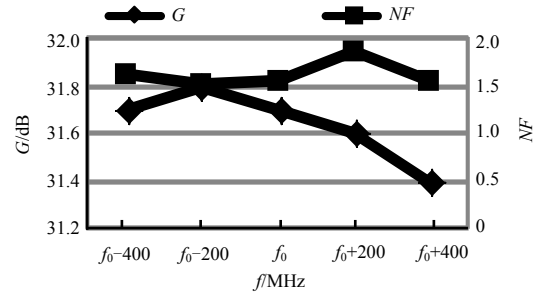


Fig.10 Test data of the receiving chain  
图 10 接收链路增益和噪声测试数据

### 3 结论

本文介绍了 S 波段的射频前端,并重点介绍了几种关键器件的小型化设计方法,符合了模块小型化、轻量化、低成本、高可靠性的发展趋势,满足雷达阵面系统对该型 T/R 组件的设计要求,具有很高的工程应用前景。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 张光义,赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2006. (ZHANG Guangyi,ZHAO Yujie. Research on phased array radar technology[M]. Beijing:Publish House of Electronic Industry, 2006.)
- [ 2 ] 姚小江,谢武涛,施鹤年,等. S 波段 T/R 组件用 GaN 功率放大器链的设计[J]. 现代雷达, 2011,33(8):56-57. (YAO Xiaojiang,XIE Wutao,SHI Henian,et al. GaN high power amplifier chain for S-band T/R modules[J]. Modern Radar, 2011, 33(8):56-57.)
- [ 3 ] 苏力争,钟剑锋,张建增,等. S 波段八通道数字 T/R 组件研究与设计[J]. 现代雷达, 2013,35(9):66-68. ((SU Lizheng,ZHONG Jianfeng,ZHANG Jianzeng,et al. Study and design of eight-channel digital T/R module at S-band[J]. Modern Radar, 2013,35(9):66-68.)
- [ 4 ] 付德龙,刘登宝,张岳华,等. S 波段四通道小型化数字 T/R 组件设计与实现[J]. 微波学报, 2014(S1):169-172. (FU Delong,LIU Dengbao,ZHANG Yuehua,et al. Design and implementation of a 4 channel compact digital T/R module at S band[J]. Journal of Microwaves, 2014(S1):169-172.)
- [ 5 ] 徐兴福. ADS 2008 射频电路设计与仿真实例[J]. 北京:电子工业出版社, 2009. (XU Xingfu. Study on design and simulation of RF circuit based on ADS2008 software[J]. Beijing:Publish House of Electronic Industry, 2009.)
- [ 6 ] 余振坤,刘登宝. S 波段宽带 GaN 芯片高功率放大器的应用研究[J]. 微波学报, 2011,27(2):68-71. (YU Zhenkun,LIU Dengbao. Application research on broadband amplifier with GaN power chips in S-band[J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(2):68-71.)
- [ 7 ] 邓刚,要志宏,陈书宾,等. S 波段平衡式限幅放大器设计[J]. 半导体技术, 2014,39(2):98-102. (DENG Gang,YAO Zhihong, CHEN Shubin,et al. Design of an S-band balanced limiter amplifier[J]. Semiconductor Technology, 2014,39(2):98-102.)