

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519592

# 室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器研制

刘立浩 魏伟 薛腾

(中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

**摘要:** 针对进口行波管放大器故障率高和维修困难的问题,研制了一款室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器。基于新型波导魔 T、波导 E-T 结、共面魔 T 和半高波导-微带探针过渡结构,提出了一种新型 16 路功率分配/合成网络,采用 16 片氮化镓 35 W 功放芯片合成,研制出一种 Ku 频段 450 W 功率合成模块。基于该模块,成功研制了室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器。测试结果表明在 13.75~14.5 GHz 频率范围内,该功率放大器增益大于 73 dB,输出功率大于 400 W。经计算,额定功率输出时,整机效率为 23.65%,与国际知名公司水平相当。该功率放大器指标优良,可完全替代进口行波管放大器产品。

**关键词:** Ku 频段;行波管放大器;氮化镓;功率放大器;波导魔 T;共面魔 T

**中图分类号:** TN722 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

## Development of indoor Ku-band 350 W solid-state power amplifier

Liu Lihao Wei Wei Xue Teng

(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** Considering the problem of high failure rate and difficult maintenance of imported traveling wave tube amplifier, an indoor Ku-band 350 W solid-state power amplifier was developed. A novel 16-way power dividing/combining network was proposed, which was based on novel waveguide magic T, waveguide E-plane T-junction, coplanar magic T and half-height waveguide-to-microstrip probe transition. A Ku-band 450 W power amplifier module was achieved based on 16 pieces of 35 W gallium nitride power amplifier chips and the 16-way power dividing/combining network. Then, an indoor Ku-band 350 W solid-state power amplifier was successfully developed. The measured results show that the gain is greater than 73 dB, the output power is greater than 400 W between 13.75 GHz and 14.5 GHz. After calculation, the overall efficiency is 23.65% at rated power output, which is on par with international well-known companies. This power amplifier has excellent specifications and can replace imported TWTA products completely.

**Keywords:** Ku-band; traveling wave tube amplifier; gallium nitride; power amplifier; waveguide magic T; coplanar magic T

## 0 引言

功率放大器是卫星通信系统上行链路的重要设备,其输出功率的大小直接决定着整个系统的作用距离、抗干扰能力和通信质量<sup>[1-3]</sup>。国内中大型卫星地面站曾采用进口某型 Ku 频段行波管放大器(traveling wave tube amplifier, TWTA),行波管正常工作需要数千伏甚至上万伏的高电压,而且其内部电子枪、螺旋线等部件会逐渐老化<sup>[4]</sup>,经地面站长期使用,发现该型 TWTA 故障率较高,多数 TWTA 使用 4、5 年后故障开始显现,出现的故障主要有:行波管损坏、高压模块故障、电源处理板故障、按钮开关损坏等。更换一个全新行波管的维修费用约为 18 万元人民币,行波管

的进口受到美国政府的严格管控,导致维修周期漫长且不可控,严重影响卫星地面站的正常运行,因此亟需研制国产化功率放大器产品进行原位替代。

2020 年刘立浩等<sup>[5]</sup>研制了一款室内型 Ku 频段 150 W 功率放大器,采用 32 片砷化镓(gallium arsenide, GaAs) 7 W 功放芯片合成,设备外形为 19 英寸 3U 标准机箱,可在 -10℃~+50℃ 环境温度下可靠工作;2022 年黄薛龙等<sup>[6]</sup>研制了一款 Ku 波段 120 W 小型化功放模块,采用 6 片氮化镓(gallium nitride, GaN) 30 W 功放芯片合成,该模块非独立设备,必须配备散热翅片和风机等散热装置才能可靠工作;2024 年党章等<sup>[7]</sup>研制了一款 Ku 频段 300 W 固态功放组件,在 126 mm×116 mm×36 mm 的体积内实

收稿日期:2025-08-13

现了 8 片 GaN 芯片的功率合成,该模块也未配备散热装置;2024 年胡顺勇等<sup>[8]</sup>研制了一款室内型 Ku 波段 800 W GaN 高线性固态功放,使用 32 片 GaN 芯片进行功率合成,设备外形为 19 英寸 6U 标准机箱,其正常工作环境温度最高为 40℃。

本研究基于新型波导魔 T、波导 E-T 结、共面魔 T 和半高波导-微带探针过渡结构,构建了一种新型 16 路功率分配/合成网络,采用 16 片中国电科 13 所生产的 Ku 频段 GaN 35 W 功放芯片,研制出一种 Ku 频段 450 W 功率合成模块。基于该模块,成功研制了一款室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器,指标优良,在环境温度为 -10℃ ~ +50℃ 条件下能够可靠工作,可完全替代进口 TWTA 产品。

## 1 组成和原理

室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器主要由衰减器模块、驱动放大模块、功率合成模块、监控单元、隔离器、耦合器、正/反向检波器、电源模块、电源滤波器、液晶屏、按键和风机等组成,其原理框图如图 1 所示。

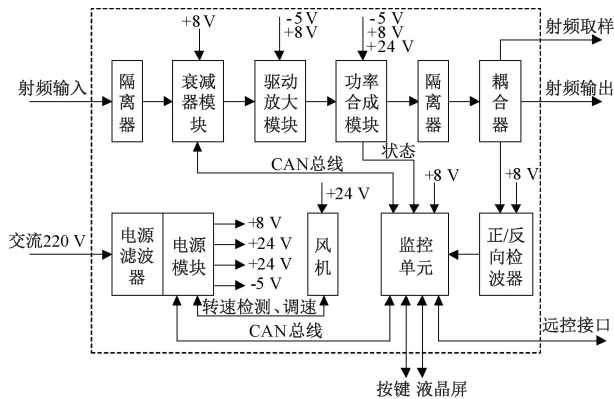


图 1 室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器组成框图

Fig. 1 Block diagram of indoor Ku-band 350 W solid-state power amplifier

上变频器输出的 Ku 频段(13.75~14.5 GHz)射频信号由机箱后面板的“射频输入”端口进入室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器。首先经过一个同轴隔离器,以保证输入端口具有良好的驻波比;然后进入衰减器模块,衰减器模块可提供约 20 dB 的增益,模块内置数字衰减器和模拟衰减器,与监控单元进行控制器局域网(controller area network,CAN)通信,实现对设备增益的步进式调节和温度补偿。

衰减器模块输出的 Ku 频段信号进入驱动放大模块,该模块由两级放大器组成,可提供 40 dB 增益,输出功率大于 40 dBm;驱动放大模块还具有线性化器的功能,可有效改善功放整机的三阶互调指标;驱动放大模块的输出信号进入功率合成模块,该模块由 4 个 120 W 功放模块合成得到,其组成框图如图 2 所示;功率合成模块可提供约 20 dB

增益,输出功率大于 450 W。

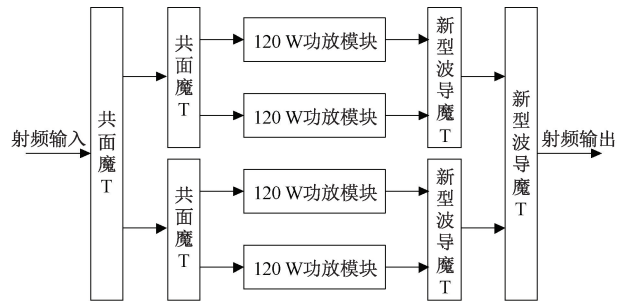


图 2 功率合成模块组成框图

Fig. 2 Block diagram of power combiner

功率合成模块输出的射频信号经过一个大功率波导隔离器,以确保输出端口具有良好的驻波比;然后经过一个波导耦合器,该耦合器可耦合出两路正向信号和一路反向信号,正向信号用于检测功放输出功率,反向信号用于检测输出端口的反射功率,其中一路正向信号接“射频取样”端口,另一路正向信号接正向检波器,反向信号接反向检波器,检波器通过 CAN 总线将整机输出功率值和反射功率值上报给监控单元;之后,Ku 频段大功率信号经过 WR62-WR75 波导过渡段和波导密封窗,最终由“射频输出”端口输出至天线。

监控模块通过机箱后面板的“远控接口”与站控计算机进行通信,将采集的各模块参数和状态信息实时上报,并可根据站控要求对各项参数进行设置。监控模块采集的主要信息有:整机输出功率值和反射功率值、功率合成模块的温度值及其内部各功放芯片的电流值、衰减器模块的衰减值、风机的转速等;监控单元可设置衰减器模块的衰减值,控制功率合成模块的电源通断,并可根据采集的温度值调节风机转速等。

## 2 设计与实现

### 2.1 120 W 功放模块设计与实现

#### 1) 共面魔 T

传统波导魔 T 的 4 个波导臂在不同平面,不利于加工制造,也不利于级联和装配。此外,用于实现端口匹配的锥体、销钉、金属膜片等元件,加工和装配难度较大<sup>[9]</sup>。

为了改善传统波导魔 T 的不足,便于加工和装配,采用了一种共面魔 T 结构<sup>[10]</sup>。共面魔 T 由波导 E-T 结和微带探针组成,通过引入微带探针的方式将波导魔 T 垂直的和端口移动到水平方向,其结构示意图如图 3 所示,其中端口 1 为标准波导口,端口 2 和端口 3 为半高波导口,端口 4 为 50 Ω 微带集总端口。端口 1 是共面魔 T 的差端口,端口 4 是共面魔 T 的和端口。

当信号从端口 1 输入时,从端口 2 和端口 3 输出两个幅度相等、相位相反的信号;在微带探针处激励的场相互抵消,信号不会从微带耦合过去。当信号从端口 4 输入时,会

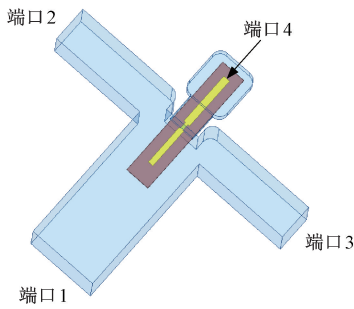


图 3 共面魔 T 结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of coplanar magic T

从端口 2 和端口 3 输出两个幅度相等、相位相同的信号；沿着端口 1 传输的场相互抵消。因此，端口 1 和端口 4 是相互隔离的，可以得到：

$$S_{14} = S_{41} = 0 \quad (1)$$

由功率分配特性可以得到：

$$S_{21} = -S_{31}; S_{34} = S_{24} \quad (2)$$

由端口 2 和端口 3 的对称性可以得到：

$$S_{22} = S_{33} \quad (3)$$

根据互易性可以得到：

$$S_{23} = S_{32}; S_{21} = S_{12}; S_{31} = S_{13}; S_{24} = S_{42}; S_{34} = S_{43} \quad (4)$$

这里假设端口 1 和端口 4 都已匹配，则：

$$S_{11} = S_{44} = 0 \quad (5)$$

因此，共面魔 T 的 S 参数为：

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & -S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ -S_{12} & S_{23} & S_{22} & S_{24} \\ 0 & S_{24} & S_{24} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据矩阵的么正性， $SS^* = E$ ，可以得到：

$$\begin{cases} |S_{12}|^2 + |S_{12}|^2 = 1 \\ |S_{24}|^2 + |S_{24}|^2 = 1 \\ |S_{12}|^2 + |S_{22}|^2 + |S_{23}|^2 + |S_{24}|^2 = 1 \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)计算得到：

$$\begin{cases} |S_{12}| = |S_{24}| = \frac{\sqrt{2}}{2} \\ |S_{22}| = |S_{23}| = 0 \end{cases} \quad (8)$$

因此，共面魔 T 的 S 参数为：

$$[S] = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

图 3 所示的共面魔 T 在 Ansys 公司 HFSS 软件中仿真优化得到，在 13.75~14.5 GHz 范围内，端口 1 的回波损耗优于 25 dB，端口 1 到端口 2(或端口 3)的插入损耗小于 3.1 dB，端口 2 和端口 3 之间的隔离度优于 20 dB。微带探

针采用 RT/duroid 5880 微波介质板制作，介电常数 2.2，介质厚度为 0.254 mm，覆铜层厚度为 0.018 mm，铜层表面镀金 2 μm。微带探针板的底面使用导电胶粘接在模块下腔上，微带探针的 50 Ω 微带线末端通过键合金带的方式连接射频功率电阻，该电阻在 Ku 频段驻波比好，散热良好的情况下可耐受 50 W 连续波功率。

### 2) 半高波导-微带探针过渡

波导-微带探针过渡是目前应用最为广泛的波导与微带转换方式，波导-微带探针过渡有两种常用的形式：一种是微带探针面的法向方向与波导内电磁波传播的方向平行，称之为 H 面探针过渡；另一种是微带探针面的法向方向与波导内电磁波传播的方向垂直，称之为 E 面探针过渡。这两种方法都是将微带探针通过波导宽边中心的孔插入波导腔中，通过一段起耦合作用的微带探针将波导中的电场耦合到微带中去。微带探针距离波导短路面 1/4 波长，处于电场最强位置，以达到尽量高的耦合效率。探针过渡具有容性电抗，一段具有感性电抗的高阻抗线被串联在探针过渡器后面，以消除容性电抗，然后经过 1/4 波长阻抗变换器实现与 50 Ω 微带线的阻抗匹配<sup>[11-12]</sup>。

WR75 波导尺寸较大，为了减小体积，功放模块内部均采用了 WR62 波导，波导口尺寸为 15.799 mm×7.899 mm，但其半高波导-波导的阻抗变换长度依然较长，不利于模块小型化。因此，提出了一种半高波导-微带探针过渡，在 HFSS 软件中进行了三维建模和仿真优化，其结构模型如图 4 所示。仿真结果表明，该结构在 13.75~14.5 GHz 频率范围内插入损耗小于 0.1 dB，回波损耗优于 30 dB，性能指标优良。

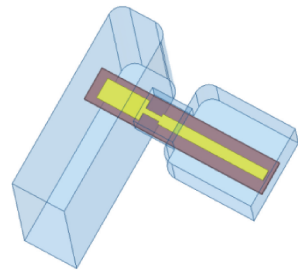


图 4 半高波导-微带探针过渡结构模型

Fig. 4 Structure model of half-height waveguide-to-microstrip probe transition

### 3) 四路功率分配/合成网络

将波导 E-T 结、共面魔 T 和半高波导-微带探针过渡相结合，组成了一种紧凑型四路功率分配/合成网络，结构模型如图 5 所示。经软件仿真优化，该四路功率分配/合成网络在 13.75~14.5 GHz 频率范围内，插入损耗小于 0.15 dB，回波损耗优于 25 dB，仿真结果如图 6 所示。

### 4) 120 W 功放模块的实现

本研究采用的功放芯片为中国电科 13 所生产的 NC116165C-1315P30 型 GaN 大功率高线性功放芯片，该芯

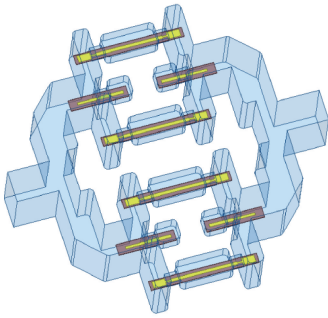


图 5 四路功率分配/合成网络结构模型

Fig. 5 Structure model of four-way power dividing/combining network

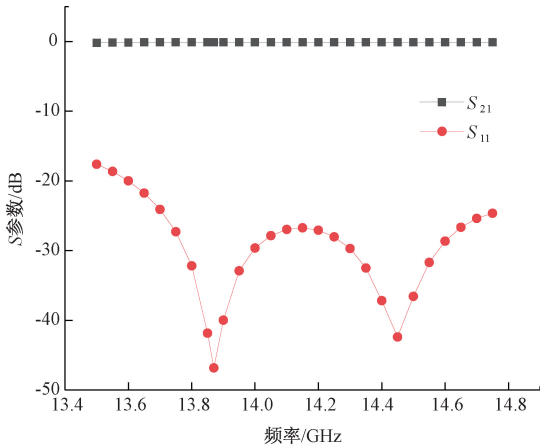


图 6 四路功率分配/合成网络仿真结果

Fig. 6 Simulated results of four-way power dividing/combining network

片在 13.75 ~ 14.5 GHz 范围内的饱和输出功率大于 45.5 dBm(即 35.48 W),功率附加效率大于 30%。采用金锡焊料烧结工艺将功放芯片安装在金刚石/铜复合材料<sup>[13]</sup>载片上,材料选用长沙升华 DCu-A 型金刚石/铜,其热导率大于 700 W/(m·K),可将芯片产生的热量快速导出;功放芯片烧结工艺需在真空环境中进行,将芯片与载片之间的空洞率降至最低<sup>[14]</sup>。

使用第 3) 节介绍的四路功率分配/合成网络对 4 片功放芯片进行功率合成,成功研制了 120 W 功放模块,实物照片如图 7 所示。

120 W 功放模块(包含印制板)尺寸为 78 mm×78 mm×40 mm;印制板内置电流监测电路,可实时监测各功放芯片的漏极电流;印制板上配备一个温度检测芯片,可实时监测模块温度。120 W 功放模块通过 CAN 总线与监控单元通信,可实时监测各功放芯片的电流和模块温度,便于故障快速定位。

## 2.2 新型波导魔 T 设计

共面魔 T 中使用的射频功率电阻只能耐受 50 W 连续波功率,因此在更大功率合成的场景依然需要使用波导魔

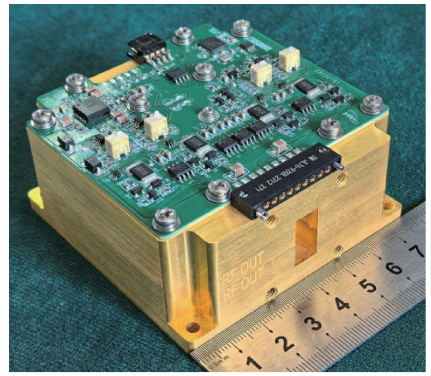


图 7 120 W 功放模块实物照片

Fig. 7 Photograph of 120 W power amplifier module

T,其隔离端口可连接外置波导大功率负载。传统波导魔 T 内的匹配元件(锥体、销钉和膜片等)加工和装配的难度较大,因此本研究提出了一种新型波导魔 T,采用凸台和三级阶梯渐变结构降低了加工和装配难度,其结构示意图如图 8 所示。端口 1 作为信号输入端口时,端口 2 和端口 3 为输出端口;端口 4 为隔离端口,连接波导功率负载。

如图 8 所示,三级阶梯的宽度取值为 1 mm,将各级阶梯的长度、高度以及凸台的长度、宽度、高度值设置为变量,经软件优化仿真,新型波导魔 T 在 13.75~14.5 GHz 频率范围内,端口 1 的回波损耗优于 25 dB,端口 1 到端口 2(或端口 3)的插入损耗小于 3.1 dB,端口 2 和端口 3 之间的隔离度优于 25 dB,是一款指标优良的波导魔 T。

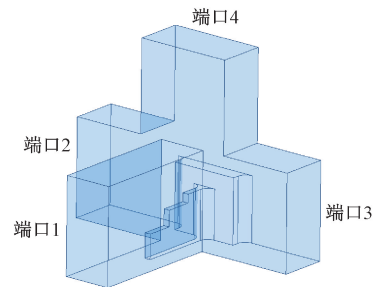


图 8 新型波导魔 T 结构示意图

Fig. 8 Structure diagram of novel waveguide magic T

## 2.3 16 路功率分配/合成网络设计

将四路功率分配/合成网络、共面魔 T 和新型波导魔 T 相结合,构建了一种新型 16 路功率分配/合成网络。输入信号功率较小,因此四路功分器采用了共面魔 T,功率电阻负载可耐受 50 W 的连续波功率;输出合路信号功率较大,因此四路合成器采用了新型波导魔 T,配备波导大功率负载,可进行几百瓦的大功率合成<sup>[15]</sup>。16 路功率分配/合成网络的结构模型如图 9 所示,仿真结果如图 10 所示。

由图 10 可知,16 路功率分配/合成网络在 13.75 ~ 14.5 GHz 频率范围内,插入损耗小于 0.25 dB,回波损耗优于 18 dB,是一款性能优良的功率分配/合成网络。基于 16 路功率分配/合成网络,采用 16 片 35 W 功放芯片,通过微

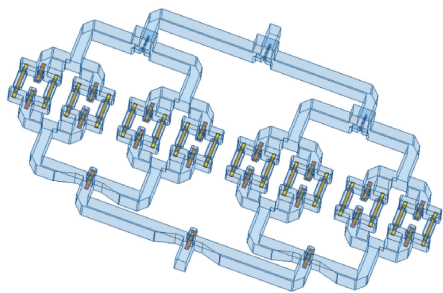


图 9 16 路功率分配/合成网络结构模型

Fig. 9 Structure model of 16-way power dividing/combining network

组装工艺,成功研制了 450 W 功率合成模块。从实际模块结构上划分,450 W 功率合成模块由 1 个四路功分器、1 个四路合成器和 4 个 120 W 功放模块组成,其中,四路功分器由 3 个共面魔 T 组成,四路合成器由 3 个新型波导魔 T 组成。

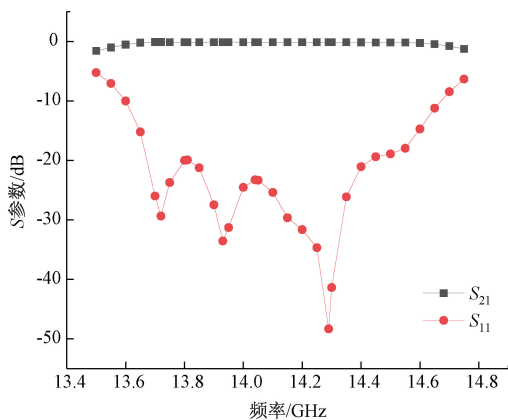


图 10 16 路功率分配/合成网络仿真结果

Fig. 10 Simulated results of 16-way power dividing/combining network

## 2.4 整机实现

室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器采用了模块化设计思路,各模块分别经过调试和测试合格后再装入机箱,通过波导及电缆组件相互连接,具有安装方便,便于维护和维修的特点。研制该型功率放大器的目的是替代进口某型 TWTA,外形结构需要能够原位替换进口产品,因此采用了 19 英寸标准 3U 机箱,具体尺寸为 483 mm × 133 mm × 610 mm,机箱后面板的输出波导口位置也与进口产品完全保持一致。

结合实际应用场景,室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器采用空气强迫对流冷却方式进行散热,前面板固定五个风机向机箱内吹风,后面板固定两个风机向机箱外抽风,让空气在较长的风道中顺利通过。风机选用深圳聚强的直流轴流风机,尺寸为 60 mm × 60 mm × 25 mm,额定转速为 11 000 r/min,最大风量为 54.42 CFM,额定工作电压为 24 V;风机对外接口为四线,1 号线为电压负端,2 号线为电压正端,3 号线为转速检测,4 号线为转速控制。

对机箱结构主要从以下 3 个方面进行优化:

1) 散热翅片的厚度与间隔:在散热翅片长度和高度固定的情况下,通过软件优化翅片的厚度与间距,最终选择翅片厚度为 1.2 mm,间距为 4.8 mm,此时散热效果最佳;

2) 预埋热管:在散热底板与功率合成模块的接触面预埋热管,使功率合成模块产生的热量快速均匀地传导至整个散热底板,通过仿真优化热管的数量与间距,使整机达到最佳的散热效果;

3) 导热材料:功率合成模块与散热底板之间为硬接触,会形成空气间隙,造成很大的热阻。以往采用涂抹导热硅脂的方式,经常发生硅油沿缝隙渗入模块内部,从而污染芯片的问题。为了避免上述问题,选用了 0.15 mm 厚的人工合成石墨导热膜。

另外,采用的 NC116165C-1315P30 型功放芯片漏极工作电压为 28 V,动态漏极电流为 4 A,饱和输出功率大于 45.5 dBm(即 35.48 W),计算得到该芯片饱和输出时的热耗为 76.52 W。

上述参数固定后,使用 Icepak 软件对整机进行热分析,将整机所处环境温度设置为 50℃,风机转速为 11 000 r/min,分析结果如图 11 所示,可知功放芯片的金刚石/铜载片温度最高为 105.29℃。根据厂家提供的资料,功放芯片热阻为 1℃/W,已知芯片饱和输出时的热耗为 76.52 W,因此得到芯片沟道温度为 181.81℃,低于该芯片最高沟道温度 225℃,可保证设备稳定可靠工作<sup>[6]</sup>。

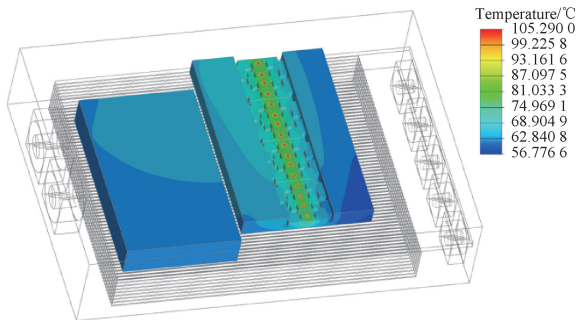


图 11 室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器热分析结果

Fig. 11 Thermal analysis results of indoor Ku-band 350 W solid-state power amplifier

最终研制的室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器实物照片如图 12 所示。

该型放大器“射频输入”为 N-F 接口,“射频输出”为 WR75 波导口,位于机箱后面板,便于连接线缆和波导;“射频取样”为 N-F 接口,位于机箱前面板,方便日常测试;电源开关采用密封锁定型钮子开关,可避免误触事件发生;风机可从机箱外部转动前面板的八个旋钮拆卸,便于维护和维修。该型放大器采用中文界面,操作方便,既可通过前面板的指示灯、液晶屏和按键查询和设置参数,也可由站控计算机通过“远控接口”查询和设置参数;整机可实时监控功率合成模块、各功放芯片、衰减器模块、风机等的工作状态,



图 12 室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器实物照片

Fig. 12 Photograph of indoor Ku-band 350 W solid-state power amplifier

便于故障快速定位。

使用两台室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器 and 一台倒换控制器,并配备同轴开关、波导开关和大功率负载等即可组成 1:1 热备份设备,适用于任务可靠性要求更高的系统中。

### 3 结果与分析

对室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器的性能指标进行了全面测试,与进口某型 TWTA 的指标对比如表 1 所示。由表 1 可知,研制的室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器输出功率、增益平坦度、输出杂散、三阶互调等指标均优于进口 TWTA 产品。

表 1 Ku 频段功率放大器指标对比表

Table 1 Comparison of specifications of Ku-band power amplifier

测试项目	进口某型 TWTA	本文
工作频段/GHz	13.75~14.5	13.75~14.5
输出功率/W	≥350	>400
增益/dB	≥73(350 W 输出)	>73(350 W 输出)
增益平坦度/dB	≤2.5(全频带)	≤2(全频带)
输出杂散/dBc	≤-50	≤-60
三阶互调/dBc	≤-24(双载波总功率回退 7 dB)	≤-25(双载波总功率回退 3 dB)
工作温度/℃	-10~+50	-10~+50
最大功耗/W	1500	2300
重量/kg	27.3	31.5

室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器比进口 TWTA 重 4.2 kg,对于室内机柜使用,其影响可以忽略。经测试,室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器输出功率为 350 W 时,整机功耗为 1480 W,计算得到整机效率为 23.65%,与美国 Teledyne Paradise Datacom 公司同类 GaN 功放产品水平相当;整机最大输出功率略大于 400 W,最大功耗小于 2 300 W,此时,功放电流比 TWTA 大 3.7 A 左右,因此,设备替代安装前,需确认配电柜交流 220 V 的额定电流应有足够的余量。

可靠性方面,进口行波管的寿命标称为 2 万 h,GaN 功

放芯片沟道温度 200℃ 时的寿命在 1 千万 h 以上,因此,GaN 固态功放的寿命远大于 TWTA。另外,室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器的功率合成模块为 16 片 GaN 芯片合成得到,一片或者少数芯片发生故障,功放输出功率会减小,但不会导致功放彻底失效,功放可以继续工作;TWTA 如果行波管发生故障,会彻底失效,没有任何输出功率。这一点也在卫星地面站的长期使用中得到了验证。

### 4 结 论

将波导 E-T 结、共面魔 T 和半高波导-微带探针过渡相结合,组成了一种紧凑型四路功率分配/合成网络,使用国产化 Ku 频段 35 W 功放芯片,研制出 120 W 功放模块;将四路功率分配/合成网络、共面魔 T 和新型波导魔 T 相结合,构建了一种新型 16 路功率分配/合成网络,使用 35 W 功放芯片,研制出 450 W 功率合成模块。基于该模块,成功研制出室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器,该产品针对用户需求和应用场景进行了产品化设计,具有人机界面友好、结构美观、可靠性高以及适合批产等优点;经测试,其主要指标均优于进口某型 TWTA,装机要素符合原位替代要求。室内型 Ku 频段 350 W 功率放大器已进行了多批次生产,经过电磁兼容、高低温、振动、冲击及湿热等试验考核,并经过卫星地面站长期使用,指标优良,工作稳定可靠。本研究对于卫星通信领域各频段固态大功率放大器的研制,具有较高的参考价值。

### 参考文献

- [1] 马凯学,张蕾. 射频与毫米波功率放大器新进展[J]. 微波学报, 2023, 39(5): 92-98.  
MA K X, ZHANG L. New advances in RF and millimeter wave power amplifiers [J]. Journal of Microwaves, 2023, 39(5): 92-98.
- [2] 朱磊,年夫顺,宁曰民,等. 超宽带功率放大器设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(15): 35-40.  
ZHU L, NIAN F SH, NING Y M, et al. Design of ultra-wideband power amplifier[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(15): 35-40.
- [3] 南星伊,李新春,丛密芳,等. 集成滤波特性的宽带滤波-功率放大器[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9): 51-59.  
NAN X Y, LI X CH, CONG M F, et al. Wideband filter-power amplifier with integrated filtering characteristics[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9): 51-59.
- [4] 谢红星,路宏敏,刘亮,等. 氮化镓固态功率放大器发展概述[J]. 电子科技, 2023, 36(8): 65-87.  
XIE H X, LU H M, LIU L, et al. Overview of gallium nitride solid state power amplifier development [J]. Electronic Science and Technology, 2023, 36(8):

- 65-87.
- [5] 刘立浩, 王雷, 薛腾. 室内型 Ku 频段 150 W 功率放大器设计[J]. 无线电工程, 2020, 50(3): 248-252.  
LIU L H, WANG L, XUE T. Design of indoor Ku-band 150 W solid-state power amplifier[J]. Radio Engineering, 2020, 50(3): 248-252.
- [6] 黄薛龙, 张俊, 周二风. Ku 波段 120 W 小型化功放模块的研制[J]. 长春师范大学学报, 2022, 41(10): 32-37.  
HUANG X L, ZHANG J, ZHOU ER F. Development of Ku-band 120 W miniaturized power amplifier module[J]. Journal of Changchun Normal University, 2022, 41(10): 32-37.
- [7] 党章, 李凯, 张能波, 等. Ku 波段 300 W 固态功放组件研制[C]. 2024 年全国微波毫米波会议, 2024: 229-231.  
DANG ZH, LI K, ZHANG N B, et al. Development of the Ku-band 300 W solid-state amplifier assembly[C]. 2024 National Conference on Microwave and Millimeter Wave(NCMMW), 2024: 229-231.
- [8] 胡顺勇, 李凯, 张能波, 等. Ku 波段 800 W 氮化镓高线性固态功放研制[J]. 电子技术应用, 2024, 50(6): 71-76.  
HU SH Y, LI K, ZHANG N B, et al. Ku-band 800 W GaN high linear solid-state power amplifier[J]. Application of Electronic Technique, 2024, 50(6): 71-76.
- [9] 江伟佳, 王志刚. W 波段宽带 E 面魔 T 设计[C]. 2022 年全国微波毫米波会议, 2022: 307-309.  
JIANG W J, WANG ZH G. Design of a W-band broadband E-plane magic T [C]. 2022 National Conference on Microwave and Millimeter Wave (NCMMW), 2022: 307-309.
- [10] GOUDA A, LÓPEZ C D, DESMARIS V, et al. Millimeter-wave wideband waveguide power divider with improved isolation between output ports [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2021, 11(4): 408-416.
- [11] 刘立浩, 秦帅丰, 宁丽鹏. V 频段 H 面膜片带通滤波器设计[J]. 电子技术应用, 2025, 51(7): 16-19.  
LIU L H, QIN SH F, NING L P. Design of an H-plane iris band-pass filter at V-band[J]. Application of Electronic Technology, 2025, 51(7): 16-19.
- [12] CAI B, XING CH H, MA S S. Research on THz waveguide-microstrip transition[C]. 5th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing(ICMSP), 2023: 173-176.
- [13] 徐薇, 吴益华, 闫永杰, 等. 电子封装用高导热金刚石/铜复合材料的研究进展[J]. 上海第二工业大学学报, 2023, 40(2): 98-103.  
XU W, WU Y H, YAN Y J, et al. Research progress of diamond/copper composites with high thermal conductivity for electronic packaging [J]. Journal of Shanghai Polytechnic University, 2023, 40 ( 2 ): 98-103.
- [14] 潘浩东, 卢桃, 陈晓东, 等. 粘接层空洞对功率芯片热阻的影响[J]. 电子工艺技术, 2023, 44(3): 13-20.  
PAN H D, LU T, CHEN X D, et al. Influence of bonded layer cavity on power chip [J]. Electronics Process Technology, 2023, 44(3): 13-20.
- [15] XIAO X, WANG J, LIU X, et al. Design of Ku band high power combining network based on waveguide magic-T [C]. 10th International Conference on Information Systems and Computing Technology (ISCTech), 2022: 264-272.
- [16] HAN Y, TANG G Y, LAU B L. Thermal characterization and management of GaN-on-SiC high power amplifier MMIC [C]. IEEE 73rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2023: 1989-1993.

### 作者简介

刘立浩(通信作者), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统。

E-mail: liulihao1978@126.com

魏伟, 硕士, 工程师, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统。

E-mail: weiw dw\_0312@163.com

薛腾, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电子设备结构及工艺设计。

E-mail: xueteng1000@126.com