

文章编号: 2095-4980(2023)03-0353-07

## Ku 波段高增益 8 通道 T/R 组件设计与实现

谢尹政, 张利彬, 李旷代, 姜利

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 利用低温共烧陶瓷(LTCC)高集成化设计优势, 设计并实现了一款 Ku 波段高增益 8 通道 T/R 组件。该组件通过双向放大器的合理运用, 有效提高了组件的收发增益, 同时利用液态金属材料的特性, 将硅铝壳体与铝合金散热齿进行有机结合, 大大提高了组件在连续波发射工作模式下的热量传导能力, 保证了组件小体积下工作的可靠性。最终设计实现的 Ku 波段高增益 8 通道 T/R 组件, 体积仅 84 mm × 48 mm × 6 mm, 质量约 60 g, 发射功率增益大于 45 dB, 发射输出功率大于 1 W, 接收增益大于 29 dB, 接收噪声系数小于 3.5 dB。该组件 8 个通道收发性能一致性好, 性能稳定, 具有良好的工程实用价值。

**关键词:** T/R 组件; 高增益; Ku 波段; 八通道; 液态金属

中图分类号: TN958

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022089

## Design and implementation of a Ku-band high gain eight-channel T/R module

XIE Yinzheng, ZHANG Libin, LI Kuangdai, JIANG Li

(Beijing Institute of Space System Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** A Ku-band high gain eight-channel Transmitter and Receiver(T/R) module is discussed and fabricated with the advantages of highly integrated design of Low Temperature Co-fire Ceramic (LTCC) technologies. The module improves the transmit and receive gains of the component effectively by using bidirectional amplifier. By combining the silicon aluminum shell and the aluminum alloy heat dissipation teeth, the heat conduction ability of the module under continuous wave emission conditions is improved greatly. A transmitting power level of 1 W, an emission gain greater than 45 dB, and a receiving gain greater than 29 dB, a receiving circuit noise less than 3.5 dB of the eight-channel T/R module are realized, with a size of 84 mm × 48 mm × 6 mm, and a low weight of 60 grams. The eight channels of the module have good consistency and stable performance. The module has a good engineering applicability value.

**Keywords:** T/R module; high gain; Ku-band; eight-channel; liquid metal

目前全球对各种形式的无线通信和遥感需求迅速增长, 其应用领域涉及雷达、声纳、移动无线通信、软件无线电、移动互联网、无线局域网、各种形式的遥感、移动自组织网以及卫星通信等。有源相控阵天线作为无线通信/遥感系统的关键部件, 直接决定了整个系统工作性能的优劣, 有源相控阵天线为了实现波束扫描, 在天线阵面中使用了大量的接收/发射组件(T/R)<sup>[1-3]</sup>。为有效提高天线工作性能, 降低天线的质量与功耗, 必须提高 T/R 组件集成度, 实现高性能、高集成与轻量化的组件设计<sup>[4-6]</sup>。

LTCC<sup>[7-8]</sup>技术经过数十年的发展和应用, 已成为实现 T/R 组件高集成与轻量化的关键基板技术。LTCC 利用其多层基板制造工艺, 具备微带线、带状线和共面波导等多种传输线实现能力。同时其灵活的布线能力和成熟的腔体实现能力, 可以将无线传输线、供电电源线、控制信号线等在同一个 LTCC 三维立体结构进行集成实现, 利用表层或挖腔设计为各类芯片、电容电阻等分立器件提供焊接或粘接放置位置, 通过适宜的屏蔽地层设计可有效改善各类信号间的相互串扰, 使高集成与轻量化的 T/R 组件成为可能。

利用 LTCC 基板技术的多层布线能力, 设计实现高增益、可连续工作的 Ku 波段 8 通道 T/R 组件, 选用高度集成化设计的硅基互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)和砷化镓(GaAs)工艺

收稿日期: 2022-04-19; 修回日期: 2022-05-26

的单片微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC), 采用微波多芯片组件技术<sup>[9-11]</sup>, 在 LTCC 基板上进行多腔体结构设计, 对众多高增益与多功能芯片进行科学布局, 同时利用 LTCC 灵活的信号屏蔽地孔设计实现了芯片间、通道间有效隔离, 提高组件工作的稳定性。最终设计实现的 Ku 波段 8 通道 T/R 组件发射功率增益大于 45 dB, 输出功率 1 W, 接收增益大于 29 dB, 噪声系数小于 3.2 dB, 组件体积 84 mm×48 mm×6 mm, 质量约 60 g。组件引入了高增益双向放大器, 使其同时具有高接收增益与高发射增益, 发射工作模式下的信号放大的高增益, 能减少对组件前级模块输出信号幅度的要求, 降低前级模块的设计复杂性, 有利于天线系统的集成设计。同时, 考虑组件 8 个通道同时工作时, 在狭小空间内将产生大量的热量, 组件壳体采用与芯片热阻匹配的硅铝材料, 在热量集中的局部区域辅以液态金属和散热齿片设计, 以提高组件对外散热能力, 避免了在连续波发射工作状态下, 功率放大器等芯片热烧毁的可能性。

## 1 T/R 组件设计

### 1.1 T/R 组件工作原理

Ku 波段高增益 8 通道 T/R 组件采用 24 通道结构设计, 每个通道主要由多功能专用芯片、限幅器、环形器、功率放大器、低噪声放大器和电源管理控制电路等组成。4 个通道通过 1:4 功分器实现发射信号功率等分和接收信号合成, 简化了与外部馈网的联接。电源管理控制电路实现 T/R 组件发射移相衰减、接收移相衰减、收发和负载状态切换。

组件工作原理如图 1 所示, 其中双向放大器芯片采用砷化镓赳配高电子迁移率晶体管(Pseudo morphic High Electron Mobility Transistor, PHEMT)工艺制造而成, 集接收、发射、转换开关和电源调制电路于一体。4 个收发通道通过单个双向放大器芯片的使用, 可分时实现组件发射信号和接收信号的功率放大, 提高了组件的收发增益。多功能芯片亦采用砷化镓工艺, 具备负电保护、逻辑控制、发射和接收的增益调整功能, 集成了驱动放大器、低噪声放大器(LNA)、开关、6 位衰减器、6 位移相器、逻辑转换电路以及电源管理等多种电路, 极大地提高了收发组件的集成度。

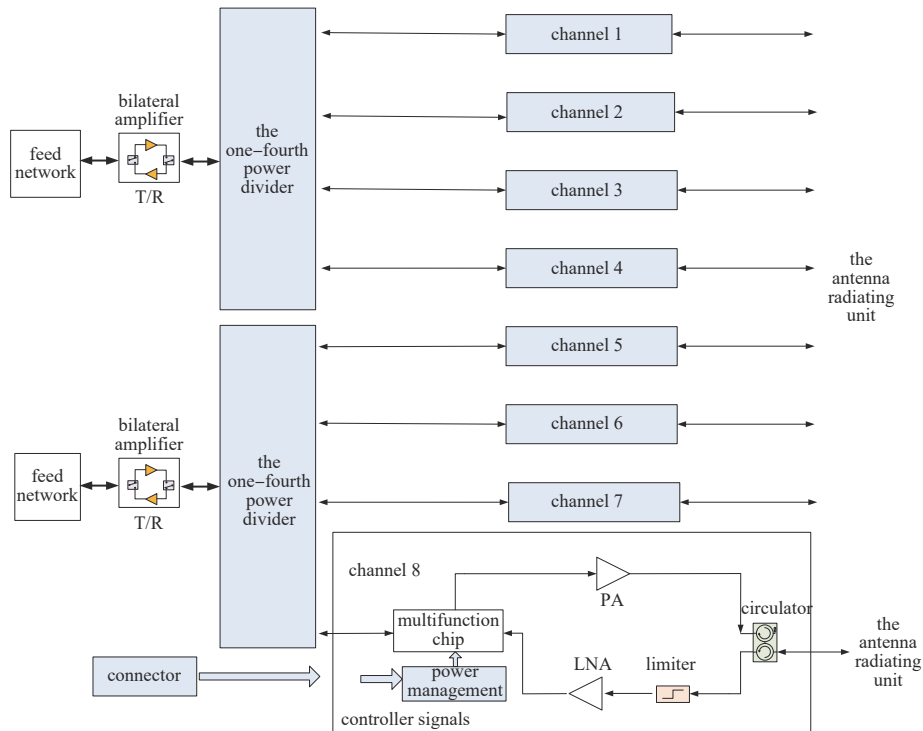


Fig.1 Functional block diagram of Ku-band 8-channel T/R Module

图 1 Ku 波段 8 通道 T/R 组件原理框图

组件处于接收工作状态时, 电源管理控制电路根据外部信号指令关断发射通道电源, 打开接收通道电源, 多功能芯片中收发开关处于接收态。从天线端进入的信号通过射频连接器和环形器进入接收通道, 通过限幅器、低噪声放大器放大后进入多功能芯片, 实现信号放大以及信号幅度和相位控制, 完成幅度与相位调制的接收信号经双向放大器的进一步放大后输出。

当组件处于发射工作状态时，电源管理控制电路根据外部信号指令关断接收通道电源，打开发射通道电源，多功能芯片收发开关处于发射态。发射输入信号经双向放大器进行增益放大后，进入功分网络，之后通过多功能芯片实现驱动放大和相位控制后，由功率放大器对信号进行功率放大，最后通过环形器输出至辐射单元。

1.2 T/R 组件设计

1.2.1 LTCC 基板设计

LTCC 多层基板是 15 层 Ferro A6M-E 材料的陶瓷基板。滤波储能电容、电源、逻辑控制芯片位于 LTCC 基板的表层，方便粘接与互连，其中 L1~L4 为电源与控制信号走线层，层与层之间信号传输采用盲孔。L5~L15 为射频信号走线层，射频信号采用带状线在 L10 层，L10 层同时集成了一分四功分器。L5 层为带状线上层地，L15 层为带状线下层地，地与地之间采用接地过孔连接。为方便射频信号传输，减少插入损耗，需要采用开空腔的方式在 LTCC 基板上进行挖深腔操作，将多功能芯片置于 L10 层。挖腔深度为 9 层基板厚度。L5 层和 L15 层为大面积接地层，通过接地孔接地，同时将微波信号与电源控制信号进行物理隔离，其中第 5 层采用实体金属化层和栅格金属化层相结合的方式，L15 作为基板背面接地层，采用大面积金属化块状结构方式。单块基板实现 4 个收发通道的集成设计，并完成微波信号和电源控制信号的一体化设计。

本组件设计所选用的 LTCC 基板为美国 Ferro 公司生产的 Ferro A6M-E(单层 LTCC 基板烧结后约 96 μm，相对介电常数为 5.9，损耗角正切为 0.002)。图 2 为 LTCC 基板的基本构造及重要芯片分布示意图。

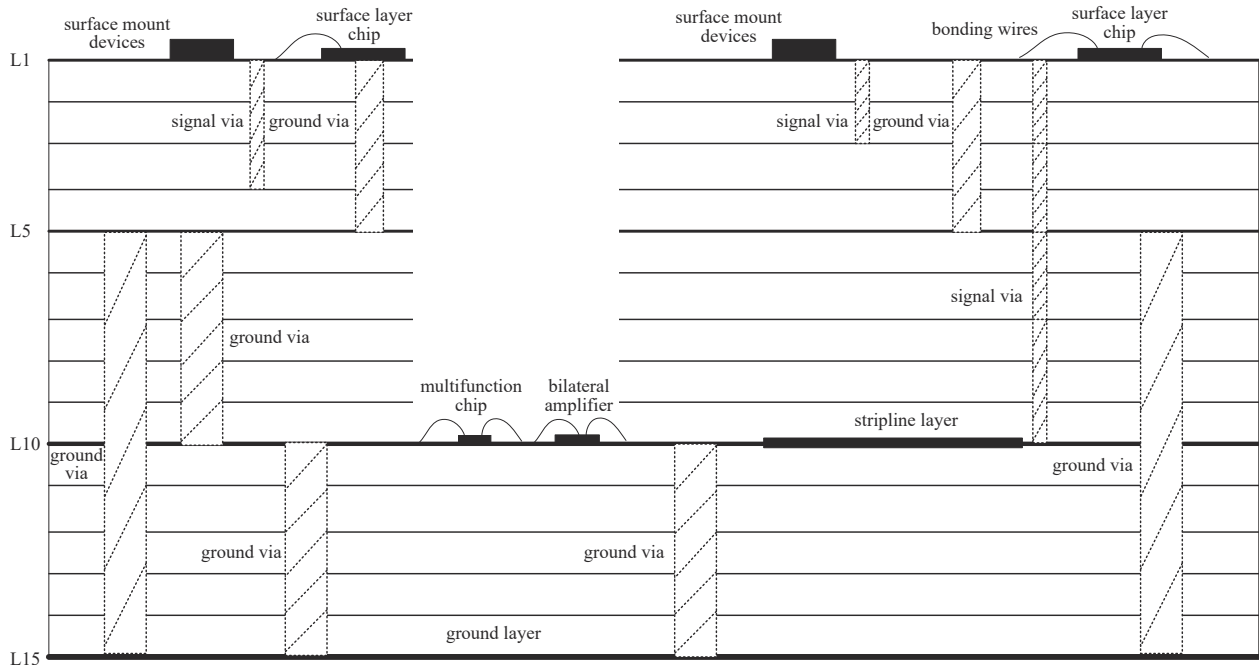


Fig.2 Fundamental structure of LTCC  
图2 LTCC 基板的基本结构

1.2.2 组件无源器件设计

从图 2 可以看出，LTCC 微波传输线结构可以主要通过带状线进行传输。带状线的结构如图 3 所示，它由上、下 2 块接地板和中间的导体带组成，导体带位于上、下接地板的对称面上，导体带与接地板之间可以是空气或填充其他介质，上、下接地板间距为  $b$ ，中间导体带宽  $W$ ，厚度  $t$ ，位于  $b$  的正中间，传输 TEM 模。

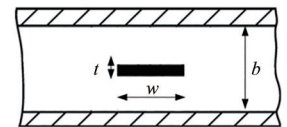


Fig.3 Structure of stripline  
图3 带状线结构

带状线特性阻抗  $Z_0$  可以通过式(1)、式(2)计算得到<sup>[12-13]</sup>，其中  $\epsilon_r$  为基板相对介电常数。

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{b}{W_e + 0.441b} \tag{1}$$

式中  $W_e$  为中间导体的有效宽度。

$$\frac{W_c}{b} = \frac{W}{b} - \begin{cases} 0, & \frac{W}{b} > 0.35 \\ (0.35 - W/b)^2, & \frac{W}{b} < 0.35 \end{cases} \quad (2)$$

功分网络采用带状线形式的 Wilkinson 功分器进行设计。1 : 4 功分网络以 1 : 2 功分器为基础进行设计。功分器为带状线形式的 Wilkinson 功分器，隔离电阻采用 LTCC 工艺的内埋印刷电阻进行设计，设计阻值为 100 Ω。如图 4 所示，选用 8 层 LTCC 基本实现带状线设计，通过常用 Wilkinson 功分器设计<sup>[13-14]</sup>，完成功分器建模。

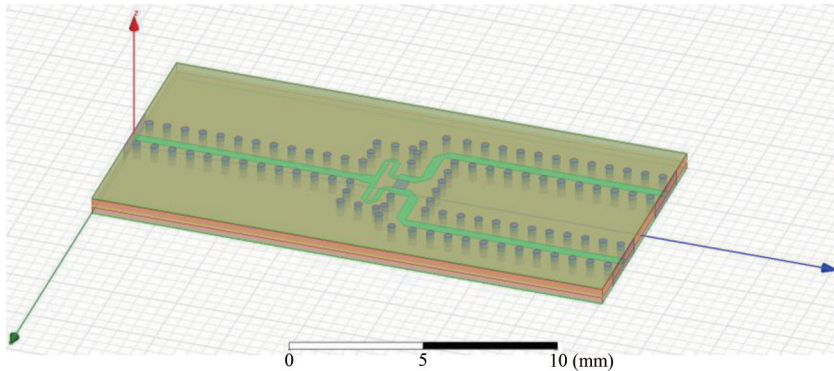


Fig.4 Simulation model of two equal Wilkinson stripline power divider  
图4 二等分带状线 Wilkinson 功分器仿真模型

利用 HFSS 电磁仿真软件进行仿真，参数优化后结果如图 5 和图 6 所示，功分器在 2 G 工作带宽内，各端口驻波小于 1.4，输出端口衰耗小于 3.2 dB，端口间幅度一致性小于 0.1 dB，各端口回波损耗小于 -22 dB，满足使用要求。利用设计完成的 3 个二等分带状线 Wilkinson 功分器可实现一分四功分网络的设计。

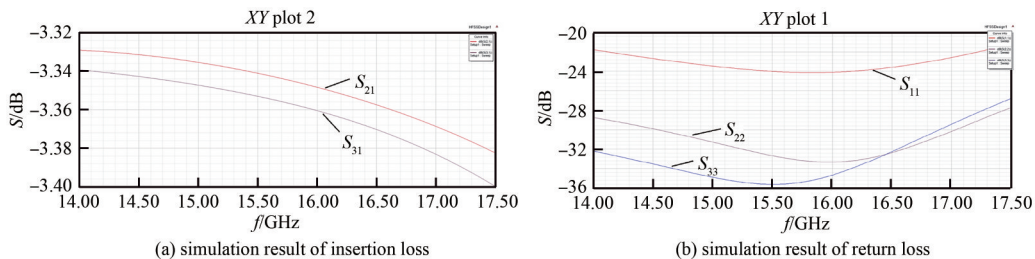


Fig.5 Simulation result of Wilkinson power divider  
图5 二等分带状线 Wilkinson 功分器仿真结果

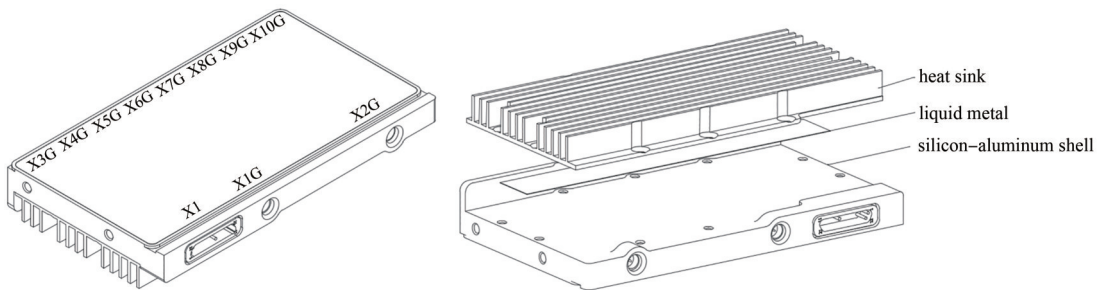


Fig.6 Structure and heat dissipation design of T/R module  
图6 组件壳体及散热设计

1.2.3 组件壳体设计

组件产生的热量除少量通过辐射途径传向空间外，绝大部分是通过组件的壳体底板传给导热板的。为便于热量导出，应重点考虑发热量大的发射通道下方的热量传导。由于组件发射模式工作于连续高功率状态，功放芯片热流密度大，而且其发热区域主要在功放芯片区域，为了确保 T/R 组件的高可靠性，需要着重考虑功放区域的热量。

组件壳体采用硅铝材料，轻量高效，散热能力强，但材料本身比较脆，不易加工异形和细长条的结构。散热装置的设计充分考虑各类结构材料的强度、加工容易程度以及散热能力，采用铝合金材料的散热齿设计，通

过液态金属<sup>[15-16]</sup>的使用，将散热齿与壳体紧密连接。组件壳体及散热设计结构如图6所示。

经分析，组件热量主要来自连续波工作的各通道功率放大器，如图7(a)所示，若仅通过硅铝壳体进行热量传导与散耗，放大器产生的热耗通过壳体向外进行辐射散热。热平衡后第4、5通道功率放大器区域热量较为聚集，局部最高温度约为106℃，接近芯片结温，功率放大器存在一定热损毁风险。针对该热损毁风险，进行针对性热设计。由于液态金属自身具有大的热容，在高温时呈现液体形态，具有良好的流淌特性，能将功率放大器产生的热量均匀传导至壳体背部各区域。同时，通过液态金属将硅铝壳体同铝合金散热齿紧密相连，补充组件壳体背部散热空白。通过这样的散热装置，能使组件在连续波发射工作模式下，将组件功放器件产生的热量及时向外界散放，可防止功率放大器区域由于温度过高，出现损坏的情况，提高组件的使用可靠性。如图7(b)所示，添加了液态金属及散热齿的组件热平衡后，局部问题最高约为80℃，环境满足功率放大器芯片使用要求，无热损毁风险。

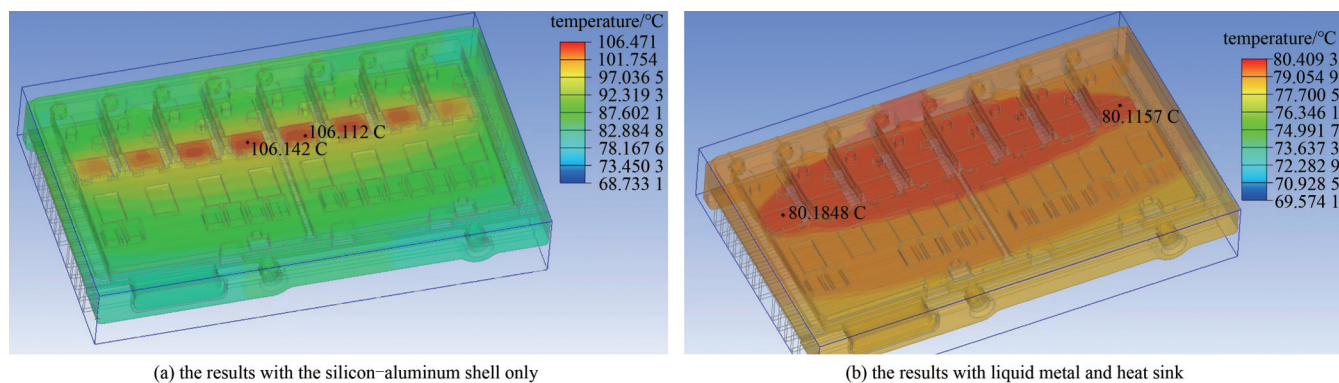


Fig.7 Thermal analysis results of T/R module

图7 组件热分析结果

## 2 T/R 组件的装配与测试

Ku波段8通道T/R组件装配中，首先将低频连接器、过渡电路板以及LTCC基板焊接到硅铝壳体中。然后，采用更低焊接温度完成LTCC表层电阻、电容器件、环形器与功放芯片进行焊接。由于壳体采用硅铝材料，与功放芯片热膨胀系数相当，直接将功放芯片与壳体焊接，有利于功放芯片热量的传导。其次，将电源与控制芯片以及限幅器、低噪声放大芯片采用导电银胶的粘接工艺直接粘接到LTCC基板上或硅铝壳体上，提高组件装配效率。最后，采用直径25 μm金丝完成组件中各芯片间的引线键合。

按照以上设计思路和装配方法，最终研制出的Ku波段8通道T/R组件的实物，如图8所示，组件T/R组件外形本体尺寸为84 mm×48 mm×6 mm，质量仅为60 g，符合轻量化和小型化要求。在图8中，硅铝壳体及隔墙的应用，有效地提高了组件的散热特性，同时改善了各通道间的隔离度。

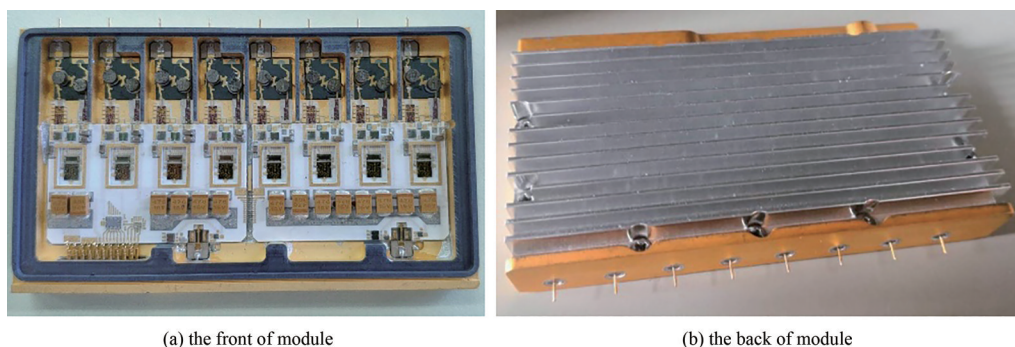


Fig.8 Photo of Ku-band T/R module

图8 Ku波段8通道T/R组件实物图

最终实现的Ku波段8通道T/R组件在其工作带宽内，利用信号源(Agilent 8257D)提供激励信号，激励信号功率为-15 dBm，功率计(Agilent N1911A)测量组件的发射功率，得到的组件发射链路主要指标如表1所示，连续波工作条件下，各通道发射链路输出功率大于1 W，功率增益大于45 dB。利用矢量网络分析仪(Agilent N5244A)对接收链路进行测试，得到的测试结果如图9所示，组件8个接收链路增益均大于29 dB，且在工作带宽内各通道

间增益平坦度均小于 2 dB, 具有 6 位移相和 6 位数控衰减功能, 利用噪声仪(Agilent N8975A)得到各通道的噪声系数均小于 3.5 dB。8 通道间发射功率幅度和接收增益一致性均小于 1 dB, 一致性好, 适宜批量生产。

表 1 发射链路输出功率、带内起伏及接收链路噪声系数  
Table 1 Output power, undulation and noise figure of T/R module

channel	output power/W	undulation/dB	noise figure/dB
1	1.17	0.71	3.42
2	1.10	0.72	3.34
3	1.06	0.65	3.45
4	1.11	0.52	3.43
5	1.18	0.68	3.38
6	1.12	0.78	3.40
7	1.16	0.57	3.36
8	1.15	0.75	3.44

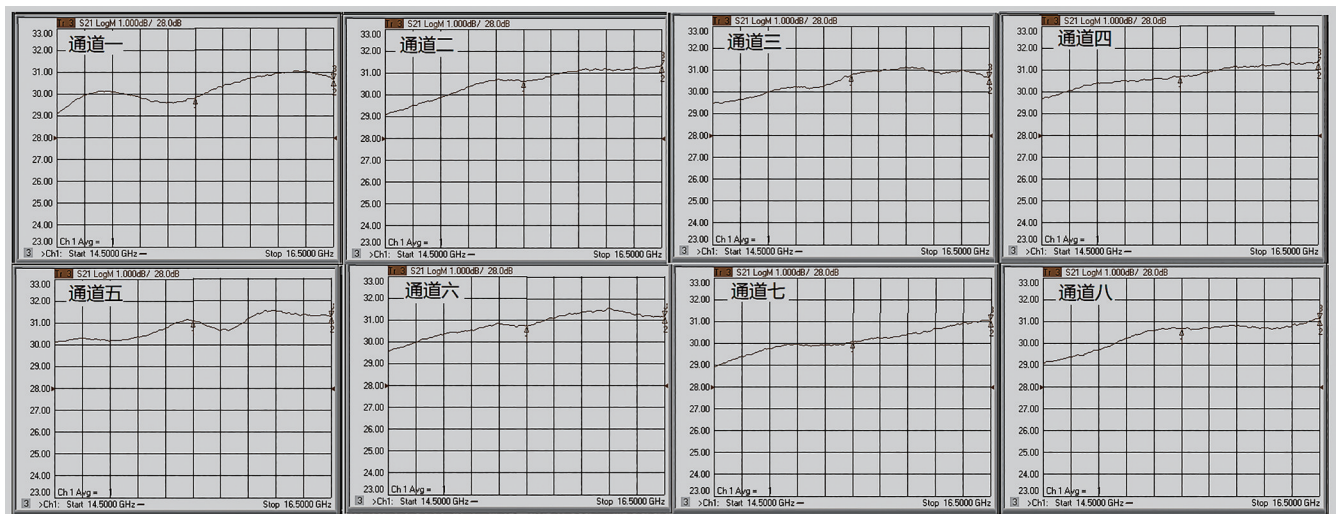


Fig.9 Receive gain measure results of Ku-band T/R module  
图 9 Ku波段 8 通道 T/R 组件接收链路增益测试结果

### 3 结论

高增益 Ku 波段 8 通道 T/R 组件通过高增益的双向放大器的使用, 显著提高了组件收发通道的信号的放大增益, 同时利用液态金属将硅铝壳体与铝合金散热齿有机结合, 实现了小体积、连续波工作下热量的快速传导。利用 LTCC 多层基板技术和腔体设计, 在实现高密度布线的时候, 通过隔离接地层和金属化过孔的设计, 将微波电路、逻辑控制电路和电源电路进行区域化设计, 在多芯片高集成化设计中, 实现各功能电路之间的有效隔离, 保证了组件工作的稳定性。设计完成的 Ku 波段 8 通道 T/R 组件在工作带宽内, 连续波情况下各通道发射输出功率大于 1 W, 带内起伏小于 0.8 dB, 接收增益大于 29 dB, 噪声系数小于 3.5 dB, 8 个通道间发射与接收性能一致性好。组件的高接收/发射增益降低了前级模块的设计复杂性, 有利于天线系统的集成设计, 同时组件可连续波发射的工作特点, 能满足移动、机载、车载、星载等各类无线通信和遥感系统平台使用要求, 具有良好的工程使用价值。

#### 参考文献:

- [1] 周志鹏. 毫米波有源相控阵天线技术[J]. 微波学报, 2018,34(1):1-5. (ZHOU Zhipeng. Millimeter wave active phased array antenna technology[J]. Journal of Microwaves, 2018,34(1):1-5. doi:10.14183/j.cnki.1005-6122.201801001.
- [2] 邵春生. 相控阵雷达研究现状与发展趋势[J]. 现代雷达, 2016,38(6):1-4,12. (SHAO Chunsheng. Study status and development trend of phased array radar[J]. Modern Radar, 2016,38(6):1-4,12. doi:10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.06.001.
- [3] 孙磊. 毫米波相控阵封装天线技术综述[J]. 现代雷达, 2020,42(9):1-7. (SUN Lei. A review of antenna-in-package technology for millimeter-wave phased array antennas[J]. Modern Radar, 2020,42(9):1-7. doi:10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.09.001.
- [4] 赖迪生,李觅,姚瑶,等. 一种小型化 C 波段线性调频 T/R 组件[J]. 微电子学, 2016,46(5):651-654. (LAI Disheng, LI Mi, YAO Yao, et al. A compact C-band linear frequency modulation microwave T/R module[J]. Microelectronics, 2016,46(5):651-654. doi:10.13911/j.cnki.1004-3365.2016.05.017.

- [5] 王璇,敦书波,谭承. Ka频段LTCC小型化多通道接收前端组件设计[J]. 无线电工程, 2018,48(8):695-698. (WANG Xuan, DUN Shubo, TAN Cheng. Design of Ka-band LTCC miniaturized multi-channel receiver front-end module[J]. Radio Engineering, 2018,48(8):695-698.) doi:10.3969/j.issn.1003-3106.2018.08.15.
- [6] 万涛,王耀召. 小型化层叠式三维T/R组件[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(5):758-762. (WAN Tao, WANG Yaoshao. Miniaturization and multilayer for 3-D T/R module[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(5):758-762.) doi:10.11805/TKYDA201605.0758.
- [7] 王锋,谢廉忠,胡永芳. 国产LTCC材料在X波段T/R中的应用研究[J]. 微波学报, 2020,36(S1):144-147. (WANG Feng, XIE Lianzhong, HU Yongfang. Application of domestic LTCC material in X-band T/R modules[J]. Journal of Microwaves, 2020,36(S1):144-147.)
- [8] 刘英杰,叶强,罗昌桅. 双波段高抑制的LTCC微型双工器设计[J]. 压电与声光, 2021,43(5):628-631. (LIU Yingjie, YE Qiang, LUO Changwei. Design of LTCC miniature duplexer with dual band and high suppression[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2021,43(5):628-631.) doi:10.11977/j.issn.1004-2474.2021.05.011.
- [9] 胡燕妮. MCM封装技术新进展[J]. 电子与封装, 2016,16(3):12-14. (HU Yanni. The research of MCM packaging technology[J]. Electronics & Packaging, 2016,16(3):12-14.) doi:10.16257/j.cnki.1681-1070.2016.0030.
- [10] 乔明昌,刘恩达,赵永志,等. 基于异构集成技术的相控阵T/R组件微系统[J]. 半导体技术, 2021,46(6):440-444. (QIAO Mingchang, LIU Enda, ZHAO Yongzhi, et al. A phased array T/R component microsystem based on heterogeneous integration technology[J]. Semiconductor Technology, 2021,46(6):440-444.) doi:10.13290/j.cnki.bdtjs.2021.06.004.
- [11] 王玉菡,程瑶. 基于MCM-C工艺的3D-MCM实用化技术研究[J]. 微电子学, 2014,44(6):818-821. (WANG Yuhuan, CHENG Yao. Study on 3D-MCM practical technique based on MCM-C process[J]. Microelectronics, 2014,44(6):818-821.) doi:10.13911/j.cnki.1004-3365.2014.06.026.
- [12] 赵元英,夏俊颖. 基于微波多层板的Ka频段带状线功分器仿真设计[J]. 无线电工程, 2019,49(12):1085-1088. (ZHAO Yuanying, XIA Junying. Simulation design of Ka-band stripline power divider based on microwave multilayer board[J]. Radio Engineering, 2019,49(12):1085-1088.) doi:10.3969/j.issn.1003-3106.2019.12.012.
- [13] 周巧仪,崔富义,张智靓. 8路超宽带Wilkinson功分器设计[J]. 固体电子学研究与进展, 2017,37(2):108-112. (ZHOU Qiaoyi, CUI Fuyi, ZHANG Zhiliang. Design of eight ways ultra-wide band Wilkinson power divider[J]. Research & Progress of SSE, 2017,37(2):108-112.) doi:10.19623/j.cnki.rpsse.2017.02.008.
- [14] 王杨洋,吴韵秋,赵晨曦,等. 一种改进的威尔金森功分器设计方法[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2021,13(4):420-424. (WANG Yangyang, WU Yunqiu, ZHAO Chenxi, et al. An improved design of Wilkinson power divider[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology(Natural Science Edition), 2021,13(4):420-424.) doi:10.13878/j.cnki.jnuist.2021.04.005.
- [15] 张旭东,杨昌鹏,于新刚,等. 面向航天应用的液态金属相变传热性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2021,51(6):17-23. (ZHANG Xudong, YANG Changpeng, YU Xingang, et al. Phase change heat transfer performance of liquid metal for space equipment thermal control[J]. Aerospace Materials & Technology, 2021,51(6):17-23.) doi:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.06.003.
- [16] 徐明宇,陈渭. 液态金属用作润滑剂的研究现状与展望[J]. 机械工程学报, 2020,56(9):137-146. (XU Mingyu, CHEN Wei. Research progress and prospect of liquid metals used as lubricants[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020,56(9):137-146.) doi:10.3901/JME.2020.09.137.

#### 作者简介:

谢尹政(1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事微波毫米波电路和无线通信方向的研究. email: xiecarl@163.com.

张利彬(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事运载火箭指挥信息系统和网络通信设计方向的研究.

李旷代(1982-), 男, 硕士, 研究员, 主要从事运载火箭指挥信息系统和网络通信设计方向的研究.

姜利(1982-), 男, 博士, 研究员, 主要从事航天运载器总体设计.