

文章编号: 2095-4980(2016)05-0758-05

小型化层叠式三维 T/R 组件

万 涛, 王耀召

(西安导航技术研究所, 陕西 西安 710068)

摘 要: 三维收发(T/R)组件具有小型化、重量轻和可扩充等特点, 成为 T/R 组件技术的重要发展方向之一。本文对一种基于低温共烧陶瓷(LTCC)的 Ku 波段小型化三维 T/R 组件进行了研究, 通过分析优化组件的垂直微波互连技术、电路布局优化及无源等效模型, 设计出具有优良电性能(输出功率 ≥ 24.5 dBm, 接收增益大于 ≥ 25 dB, 接收噪声系数 ≤ 3.5 dB)的小型化三维 T/R 组件。该组件利用 LTCC 高密度布线、球栅阵列(BGA)高密度连接优点, 把组件设计成三层层叠结构, 并且把部分芯片集成于“多功能芯片”, 进一步缩小了尺寸, 单个组件尺寸为 $9.5\text{ mm} \times 9.5\text{ mm} \times 3.8\text{ mm}$, 有效实现了 T/R 组件的小型化。

关键词: 三维; T/R 组件; 层叠式; 低温共烧陶瓷

中图分类号: TN454

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201605.0758

Miniaturization and multilayer for 3-D T/R module

WAN Tao, WANG Yaozhao

(Xi'an Research Institute of Navigation Technology, Xi'an Shaanxi 710068, China)

Abstract: The characters of the miniaturization, light weight and available extension make the three-dimensional Transmit Receive(T/R) module become one of the important development trends in the T/R module technology field. In this paper, a Ku band T/R module with 3-D structure is studied. First the vertical structure, the circuit layout and passive model are studied; then a miniaturized T/R module is designed, which has excellent electrical performance($P_{out} \geq 24.5$ dBm, $G_r \geq 25$ dB, $NF \leq 3.5$ dB). The module is miniaturized by adopting three methods, including designing a three-layer structure, the use of high density Low Temperature Co-fired Ceramic(LTCC)and Ball Grid Array(BGA), and making a multi-chip. The dimension of T/R module is $9.5\text{ mm} \times 9.5\text{ mm} \times 3.8\text{ mm}$.

Key words: 3-D; T/R module; multilayer; Low Temperature Co-fired Ceramic

有源相控阵雷达为了实现波束扫描, 在天线阵面中使用了大量的 T/R 组件。在大型有源相控阵中, T/R 组件占用了较大的体积和重量。随着雷达搭载平台逐渐有着共形、隐身、轻型化等需求, T/R 组件则需要朝着小型化、轻薄化等方向发展^[1]。传统的 T/R 组件采用单层结构(即二维 T/R 组件), 电路设计和微组装工艺实现容易, 但组件横向尺寸较大, 不利于小型化。三维 T/R 组件则可以充分利用横向和纵向尺寸, 采用层叠式结构, 可以提高 T/R 组件内组装密度, 实现小型化。低温共烧陶瓷(LTCC)微波多层互连电路是一种较理想的互连载体, 逐渐成为小型化组件和三维组件常用的工艺技术^[2-3]。国外针对三维 T/R 组件有一些研究, 而国内目前对三维 T/R 组件的研究较少, 多集中于三维组件理论研究或者组件中的垂直互连过渡结构^[4]。实现三维 T/R 组件的方法中, 使用较多的是 LTCC、BGA 球或者毛纽扣方案。采用 LTCC 基板实现三维组件, 电路布局在 LTCC 的 2 个表面, 接头位置占用空间较大, 双面布局多用于一体化阵列^[5]。采用毛纽扣弹性连接器实现层间连接, 毛纽扣具有弹性, 安装方便, 但需要额外毛纽扣固定结构, 增加组件厚度, 影响小型化^[4]。采用 BGA 球则可以使得组件小型化程度较毛纽扣方案高, 但当前采用 2 层布局, 芯片数量较多, 集成度仍需提高^[6]。三维层叠结构是 T/R 组件小型化、轻薄化的重要发展方向之一, 其将传统射频电路的简单纵向走线, 改为层间纵向、层内横向相结合的方式, 结合微组装工艺, 在有限面积上集成了多种芯片, 显著缩小了 T/R 组件的纵向尺寸^[7-8]。

本文提出了一种新型层叠式三维 T/R 组件结构, 结合了 3 种方式, 利用 LTCC、BGA 高密度连接及毛纽扣

弹性连接优点，并把部分芯片集成于“多功能芯片”进一步缩小尺寸，实现了组件小型化，可满足高集成度相控阵天线的需求。

1 组件设计

1.1 电路设计

T/R 组件的性能指标主要包括：发射通道输出功率、接收增益、接收噪声系数等。本组件选定频率为 Ku 波段，带宽为 40%。传统 T/R 组件原理框图如图 1 所示，单个 T/R 组件含有的芯片数量较多，不利于组件小型化。为保证集成度，组件应尽可能包含数量较少的芯片。

E/D HEMT(E-FET/D-FET HEMT，增强/耗尽型)工艺可把多个芯片集成在单个芯片(称为“多功能芯片”)上，进一步缩小组件的尺寸^[9-10]。在 E/D HEMT 工艺中，组件中的移相器、数控衰减器等可以集成在单个芯片上。由于集成芯片难以实现低噪声的低噪声特性以及功放的高效率输出特性，因此低噪声和功放为独立芯片。

本组件的原理框图如图 1 所示。采用“多功能芯片”，其中数控移相器、数控衰减器、FET 开关以及部分放大器集成在单个“多功能芯片”内，如图 2 所示。该“多功能芯片”集成度高，为组件小型化提供可行性基础。

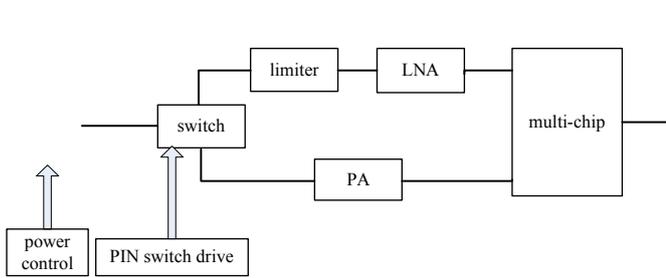


Fig.1 Diagram of T/R module
图 1 T/R 组件原理框图

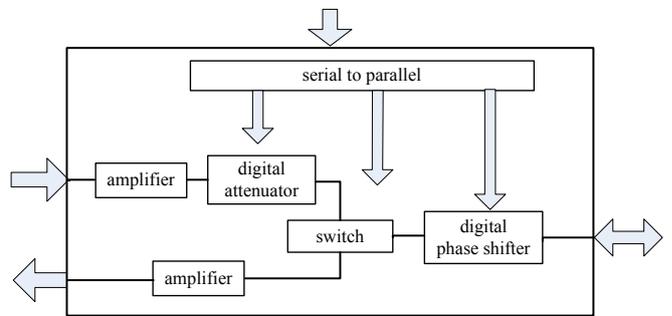


Fig.2 Diagram of multi-function chip
图 2 “多功能芯片”内部原理框图

1.2 垂直微波互连设计

在三维组件中，垂直微波互连结构对于实现不同平面的传输线间的平稳转换，以及保证微波信号的有效传输是至关重要的^[11]。

垂直微波互连结构含有电路板内互连结构和电路板间互连结构。虽然板内互连和板间互连分别采用 LTCC 金属填充孔和 BGA 球实现，但垂直互连结构的计算方法是相同的。

当传输线从上层过渡到下层时，会有一段附加的垂直连接线(垂直填充孔)，这段线可以等效为电感，其电感值 ΔL 近似为^[7]：

$$\Delta L = 60 \frac{\Delta l}{v} \left[-\gamma + \ln \frac{2\lambda_0}{\pi w \sqrt{\epsilon_r}} \right] \tag{1}$$

式中： Δl 为垂直连接线的长度； v 为自由空间的波速； $\gamma = 0.5772$ 为欧拉常数； w 为微带线宽度； ϵ_r 为微带线等效介电常数； λ_0 为自由空间波长。这个电感 ΔL 与微带线原有的电感 L_0 串联，导致在过渡阶段微带线的总电感 L_1 增加到：

$$L_1 = L_0 + \Delta L \tag{2}$$

这样如果不加补偿，则该过渡段微带线的特性阻抗 Z 变为：

$$Z = \sqrt{\frac{L_1}{C_0}} = \sqrt{\frac{L_0 + \Delta L}{C_0}} \tag{3}$$

式中 C_0 为电容值。

而过渡段外微带线的特性阻抗仍然是：

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \tag{4}$$

这样两边阻抗不同,引起反射,需要引入补偿电容 ΔC ,使得过渡段的特性阻抗仍然保持在 Z_0 ,即令:

$$\sqrt{\frac{L_0 + \Delta L}{C_0 + \Delta C}} = Z_0 \quad (5)$$

因此补偿电容值应该是:

$$\Delta C = \frac{L_0 + \Delta L - Z_0^2 C_0}{Z_0^2} \quad (6)$$

在垂直互连结构中,为了连接 LTCC 上层接地层与下层接地层,在射频垂直结构附近增加接地金属填充孔,同时为了增加信号传输线间的隔离度,把垂直部分设计成类同轴结构,如图 3(a)所示。板间互连结构采用 BGA 连接,即 2 个电路板之间的地信号和射频信号采用 BGA 焊接对应连接,如图 3(b)所示。设计垂直互连结构时,在垂直填充孔与传输线的连接处加长带状线(图 3(a)位置 a),同时在射频金属填充孔与 BGA 球连接处增加圆形焊盘,提供补偿电容。

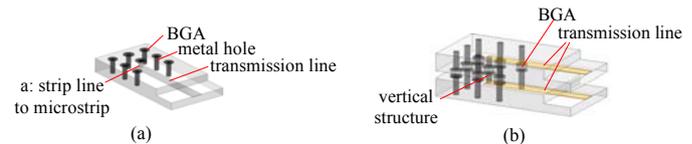


Fig.3 Strip line to co-coaxial structure map (a) and vertical structure map (b)
图 3 带状线转类同轴结构(a)和垂直互连结构(b)

传输线采用带状线形式,含有 6 层 LTCC 介质,介质选择 Ferro 型号,介电常数 5.9,厚度约为 0.576 mm (单层 LTCC 厚度 0.096 mm),其中带状线线宽 0.21 mm。在以上方法计算的基础上采用三维电磁场仿真软件高频结构模拟器(HFSS)对垂直微波互连结构进行了优化。带状线延长长度为 0.1 mm,射频金属填充孔与 BGA 球连接处圆形焊盘直径为 0.45 mm,8 个地信号金属填充孔与 BGA 球连接处圆形焊盘直径为 0.4 mm(BGA 球直径 0.38 mm)。仿真和测试结果(插入损耗(Insertion Loss, IL))曲线如图 4 和图 5 所示,由于存在加工和测试误差,测试曲线相对仿真曲线有一定抖动,但 2 条曲线整体趋势相同,测试与仿真结果相符。

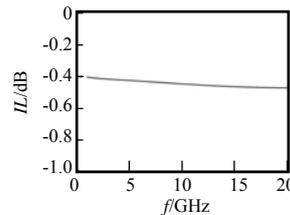


Fig.4 Simulation result of vertical structure
图 4 垂直微波互连结构仿真结果

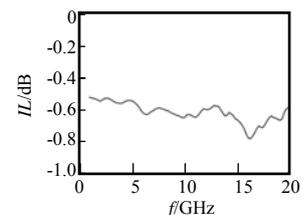


Fig.5 Test result
图 5 测试结果

1.3 电路布局设计

三维 T/R 组件为了节省横向尺寸,需充分利用纵向尺寸,在单层电路无法实现合理布局时,采用层叠形式实现组件的高密度集成^[12]。一般情况下,增加层数会降低组件体积,但单层面积要考虑芯片面积及垂直互连结构截面尺寸。综合考虑,本小型化组件电路采用 3 层布局。

功放、低噪放、开关放置在底层,利于散热;“多功能芯片”放置在中间层正面;电源、控制器件及电容等放置在中间层底面;顶层电路是 T/R 组件与辐射单元的过渡层,把射频信号由组件边缘位置过渡到 T/R 组件中心,不放置芯片。其电路布局和走线如图 6 所示,端口 1 为 T/R 组件接天线的端口,采用毛纽扣连接器实现弹性连接;端口 2 为 T/R 组件接功分器的端口,3 层电路之间采用 BGA 连接在一起。

1.4 无源模型设计

为了获得在多层电路传输中射频插损小、互耦小等电气性能的要求,首先要在三维结构中进行无源传输的设计,用微带线代替芯片。组件共由 3 层 LTCC 基板构成,分别为底层基板、中间层基板以及顶层基板。底层和中间层基板均由 12 层 LTCC 板组成,顶层则由 8 层 LTCC 板构成,水平传输线和纵向垂直传输线的总长约为 24 mm。其仿真模型和实物模型如图 7 和图 8(组件有一个角是切角,是组件装配到阵面时给固定螺钉预留的位置)所示,其对应的仿真和测试结果如图 9($IL \leq 2.6$ dB)和图 10 所示($IL \leq 3.5$ dB)。受加工、测试误差影响,测试值相对仿真结果略大一些,仍与仿真结果基本符合。

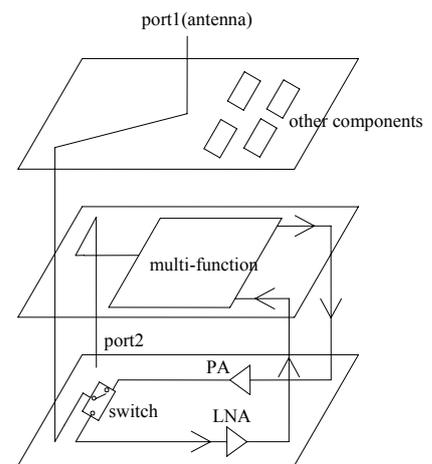


Fig.6 Circuit layout and routing
图 6 电路布局和走线

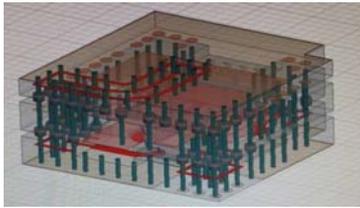


Fig.7 Passive simulation model
图 7 无源仿真模型

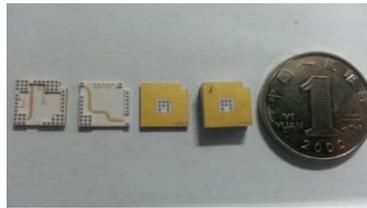


Fig.8 Passive physical model
图 8 无源实物模型

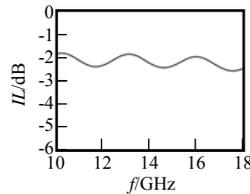


Fig.9 Insertion loss simulation result of passive model
图 9 无源模型插入损耗仿真

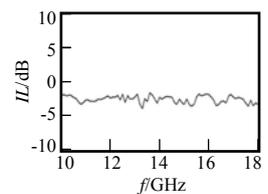


Fig.10 Insertion loss test result of passive model
图 10 无源模型插入损耗测试

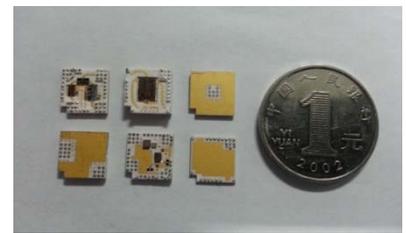
2 实物加工与测试

组件采用的功放饱和输出功率约为 25.6 dBm，低噪放增益和噪声系数分别约为 21 dB, 1.7 dB，开关损耗约为 0.8 dB，“多功能芯片”双向增益约为 9 dB。

采用 LTCC 工艺制作的小型化三维 T/R 组件实物如图 11 所示，尺寸仅为 9.5 mm×9.5 mm×3.8 mm。由于该 T/R 组件采用垂直端口(类同轴)，所以测试需要专门的测试架。测试架含有毛纽扣弹性连接器^[4]、SMP 连接器、结构件等，把待测组件置于结构件中，用毛纽扣弹性连接器以及 SMP 接头连接在垂直端口位置进行测试。测试时采用矢量网络分析仪对此组件进行电性能测试，测试结果如表 1 所示。



(a) 3-D T/R module



(b) 3-D T/R module decomposing

Fig.11 3-D T/R module and 3-D T/R module decomposing
图 11 三维 T/R 组件实物和三维 T/R 组件分层实物

从测试结果来看，在 11 GHz~17 GHz 频段内，输出功率大于 24.5 dBm，接收增益大于 25 dB，接收噪声系数小于 3.5 dB(其中开关损耗 0.8 dB，垂直互连损耗约为 1 dB)，指标优良。

表 1 测试结果
Table1 Test results

	f/GHz						
	11	12	13	14	15	16	17
transmission power/dBm	25.4	25.1	24.9	24.9	25.3	24.8	24.5
receive gain /dB	25.7	26.3	26.9	27.3	26.4	26.1	25.5
receive noise figure/dB	3.19	3.24	3.28	3.35	3.42	3.32	3.47

3 结论

本文提出了一种新型层叠式三维 T/R 组件设计方法，该方法利用了 LTCC 的高密度布线以及 BGA 的高密度连接优点，并把部分芯片集成于“多功能芯片”进一步缩小尺寸，实现了组件小型化。与文献[6]中组件相比较(尺寸为 20 mm×20 mm×3.7 mm)，体积缩小约 75%，达到 9.5 mm×9.5 mm×3.8 mm。经过组件的垂直微波互连设计、电路布局及无源电路模型设计，得到了具有较好微波性能的三维 T/R 组件。设计结果表明该设计方法可有效实现小型化层叠式三维 T/R 组件。

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, 2004. (ZHANG Guangyi,ZHAO Yujie. Phase Array Radar Technology[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2014.)
- [2] 伍星,谢成利. 一种基于 LTCC 技术的新型功率放大器研制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(5):707-711. (WU Xing,XIE Chengli. Design of a new power amplifier based on LTCC technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(5):707-711.)
- [3] 李畅游,王勇. 基于 LTCC 多层基板技术的宽带 T/R 组件设计[J]. 船舶电子对抗, 2012,35(6):96-98. (LI Changyou, WANG Yong. Design of broadband T/R module based on LTCC multi-layer substrate technology[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2012,35(6):96-98.)

- [4] 严伟,吴金财,郑伟. 三维微波多芯片组件垂直微波互联技术[J]. 微波学报, 2012,28(5):1-6. (YAN Wei,WU Jincai,ZHENG Wei. Vertical microwave interconnection techniques for 3-D microwave multi-chip modules[J]. Journal of Microwaves, 2012,28(5):1-6.)
- [5] SIMON W,KASSNER J,LITSCHKE O,et al. Highly integrated Ka-band Tx front end module including 8×8 antenna array[C]// 2009 Asia Pacific Microwave Conference. Singapore:IEEE, 2009:5-8.
- [6] YEO S K,CHUN J H,KWON Y S. A 3-D X-band T/R module package with an anodized aluminum multilayer substrate for phased array radar applications[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2010,33(4):883-891.
- [7] 徐鸣,严伟. X 波段三维 LTCC 1/4 功分器的试验研究[J]. 微波学报, 2007,23(1):47-51. (XU Ming,YAN Wei. Study of X band 3-D LTCC 1/4 divider[J]. Journal of Microwaves, 2007,23(1):47-51.)
- [8] 姜伟卓,符鹏,王锋. LTCC 多层微波传输线的性能优化研究[J]. 电子机械工程, 2006,22(6):45-48. (JIANG Weizhuo,FU Peng,WANG Feng. Optimization of performances of microwave transmission lines on LTCC multilayer substrate[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2006,22(6):45-48.)
- [9] 李明,吴洪江,魏洪涛,等. 基于 GaAs PHEMT 的 5~12 GHz 收发一体多功能芯片[J]. 半导体技术集成电路, 2015, 40(1):8-11,62. (LI Ming,WU Hongjiang,WEI Hongtao,et al. 5-12 GHz multi-function transmit/receive chip based on GaAs PHEMTs[J]. Semiconductor Integrated Circuits, 2015,40(1):8-11,62.)
- [10] 黎明,张海英,徐静波,等. GaAs 基 E/D PHEMT 技术单片集成微波开关及其逻辑控制电路[J]. 半导体学报, 2008, 29(9):1823-1826. (LI Ming,ZHANG Haiying,XU Jingbo,et al. Monolithic integrated switches and logic control circuits with E/D-mode GaAs PHEMTs[J]. Journal of Semiconductors, 2008,29(9):1823-1826.)
- [11] HOU Fengze,LI Jun,XIE Huiqin,et al. Study on thermo-mechanical reliability of 3-D stacked chip SiP based on cavity substrate[C]// 2013 IEEE 15th Electronics Packaging Technology Conference. Singapore:IEEE, 2013:878-881.
- [12] SCHREINER M,LEIER H,MENZEL W,et al. Architecture and interconnect technologies for a novel conformal active phased array radar module[C]// 2003 IEEE International Microwave Symposium. Philadelphia,Pennsylvania,USA:IEEE, 2003:567-570.

作者简介:



万涛(1978-),男,西安市人,硕士,高级工程师,研究方向为有源相控阵天线、雷达 T/R 组件,email:wangyao20001@hotmail.com.

王耀召(1985-),男,安徽省宿州市人,硕士,工程师,主要研究方向为 T/R 组件、微波器件.

第三届燃烧流场的光学诊断技术学术研讨会

燃烧过程复杂恶劣,对瞬态环境的实时诊断技术要求极其苛刻。燃烧流场的光学诊断技术主要是以激光技术、光谱技术、光电探测技术、数据图像处理技术等为基础的一种综合性测试诊断技术,可以实现燃烧场温度、组分及浓度、火焰构造和流速等参量信息的高时空分辨精确测量,而且测量对燃烧过程无扰动。这些参数的测量对于研究燃烧场的瞬态化学反应动力学过程,如固体推进剂燃烧动力学、超声速燃烧动力学、汽车和飞机发动机燃烧效率和污染控制、以及保障电站锅炉安全和经济运行等具有重要意义。

为了促进我国本领域技术的完善与发展,学会定于2016年11月在西安召开“第三届燃烧流场的光学诊断技术学术研讨会”。会议组委会将邀请国内外该领域的知名专家和学者到会共同交流,深入探讨燃烧流场的光学诊断技术领域所取得的最新研究成果。诚挚欢迎国内外相关领域科研院所的科研人员以及高等院校的教师、研究生等踊跃参加。

主办单位: 中国工程院信息与电子工程学部 国家自然科学基金委员会 中国光学工程学会

承办单位: 中国光学工程学会 中国宇航学会光电专委会

联办单位(拟定): 西北核技术研究所 华南理工大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室(绵阳分部)

大会主席: 乐嘉陵 院士(中国空气动力研究与发展中心)

会议形式: 大会报告、专题报告、Poster、专题讨论、展览展示等

联系人: 吴迪, 022-58168520, wudi@cnoenet.com; 蔡方方, 022-85168541, cai_ff@csoc.org.cn

会议其他相关内容及要求见网站: <http://www.iaeej.com>.