

文章编号: 2095-4980(2016)01-0072-04

## C 波段 LTCC 高频前端模块的研究与实现

纪建华, 郭 敏, 许 明, 田建伟

(北京无线电测量研究所, 北京 100039)

**摘 要:** 针对现有雷达高频接收组件尺寸大、集成度不高的情况, 采用低温共烧陶瓷(LTCC)多层基板、单片微波集成电路(MMIC)芯片和微组装技术, 设计和实现了 C 波段 LTCC 高频前端模块。该模块采用二次混频方案, 包含限幅器、放大器、滤波器、衰减器、混频器等; 其中主要器件用 MMIC 芯片实现, 滤波器埋置在 LTCC 多层基板中实现, 极大减小了模块的尺寸, 模块最终尺寸为  $64\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 1.1\text{ mm}$ , 比现有的接收组件尺寸减小了 50%。经测试, 该 LTCC 高频前端模块的增益大于 40 dB, 带内平坦度小于 2 dB, 噪声系数小于 5 dB, 镜像抑制优于 51 dB。可将高频前端模块应用于雷达高频接收组件中, 从而减小组件尺寸。

**关键词:** 低温共烧陶瓷(LTCC); 高频前端模块; 小型化

**中图分类号:** TN957.5

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201601.0072

## Development and implementation of C band front-end module based on Low Temperature Co-fired Ceramic technology

Ji Jianhua, Guo Min, Xu Ming, Tian Jianwei

(Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100039, China)

**Abstract:** As current radar receivers are bulky and low integrated, Low Temperature Co-fired Ceramic(LTCC) multilayer substrates, Monolithic Microwave Integrated Circuit(MMIC) chips and micro-assembly technology are adopted to design and develop a C band front-end module. This module utilizes superheterodyne scheme, including a limiter, amplifiers, filters, attenuators and mixers. Most of the main components are using MMIC chips, and filters are integrated into LTCC multilayer substrates, which can greatly reduce the size of the module. The size of the prototype is  $64\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 1.1\text{ mm}$ , with 50% reduction in size comparing to the current ones. The module is measured and has a gain of 40 dB with a flatness of  $\pm 1\text{ dB}$ , NF of 5 dB, image rejection of 51 dBc. The module can be used in radar receivers, which reduces the size of current receivers.

**Key words:** Low Temperature Co-fired Ceramic(LTCC); front-end module; compact size

LTCC 具有低损耗、高可靠性、耐高温、高湿, 以及介电常数、热膨胀系数灵活可变的特点, 基于 LTCC 多层基板、MMIC 芯片和微组装技术可以为高频前端模块提供优良的解决方案: LTCC 技术具有比厚膜和薄膜技术更加灵活的设计方法, 可以将微波传输线、逻辑控制线和电源线的混合设计, 集成于三维立体结构之中; 利用安装于 LTCC 腔体的 MMIC 实现微波单元电路功能, 同时将印制电阻、电容、电感、埋置滤波器、耦合器等多种无源器件集成于 LTCC 基板内部, 进一步提高整个高频前端模块的集成度; LTCC 多层微波电路中可采用多层屏蔽金属地和通孔栅来改善系统中的电磁兼容问题, LTCC 技术可以方便地实现一体化封装, 用 LTCC 基板本身作为封装的一部分, 这样既可以减小封装的体积又使组件具有良好的导热性。因此, 使用基于 LTCC 多层基板、MMIC 芯片和微组装技术, 可以研制出尺寸小、重量轻, 同时性能优良的高频前端组件。基于 LTCC 的高频前端模块小型化技术对于雷达的高频接收组件的改进有重要的工程意义和实际价值。国外将 LTCC 技术应用在 TR 组件和高频前端模块的研究<sup>[1-3]</sup>较多, 国内同行也开展了相应研究<sup>[4-7]</sup>, 为了掌握 LTCC、MMIC 芯片和微组装等相关技术, 本文选用 Dupont 951 生瓷材料, 通过对 LTCC 多层基板层分布的优化布局、微波电路和滤波器的优化设计, 研发 11 层 LTCC 基板电路, 实现小型化 C 波段高频前端模块。

收稿日期: 2014-12-23; 修回日期: 2015-02-16

## 1 高频前端模块的原理分析

高频前端模块为雷达高频接收机不可或缺的一部分，提供来自雷达天馈系统回波信号的限幅、低噪声放大、滤波和下变频等功能，在整个接收机系统中起到关键的作用。高频前端模块综合了各种有源和无源电路，形成功能较复杂的电路结构，设计时根据总体指标要求确定具体的电路形式，是超外差式，还是零中频，最终确定框图。本文设计的高频前端模块采用超外差式架构，采用高本振两次变频的模式工作，一路射频信号进入，一路中频信号输出。为了满足接收系统灵敏度的要求，要求尽量减小噪声，低噪声放大器的选择很关键，综合考虑输入最大信号和噪声系数，选择增益适中、噪声系数小的放大器作为第一级低噪声放大器。为了实现高增益，选择三级放大；考虑强信号对接收机的冲击或破坏，在输入端接入限幅器进行保护；为了实现自动增益控制，采用两级数控衰减器，第一级数控衰减器提供 32 dB 衰减量，第二级数控衰减器提供 31.5 dB 衰减量。综合以上考虑，本文设计的高频前端模块的组成框图如图 1 所示。信号经天线进入高频前端模块，模块工作在 C 波段，经过限幅、衰减、放大、滤波之后进入第一级混频，输出的一次中频信号经过滤波、衰减和放大进入二次混频，二次混频后的信号通过低通滤波器和放大器输出，最终得到需要的中频信号。

## 2 高频前端的设计和实现

为了实现小型化，利用 LTCC 多层陶瓷三维基板混合集成高频前端模块。为了提高集成度，减小体积和重量，一次混频前的带通滤波器和二次混频前的带通滤波器(图 1 中带通滤波器)埋置在 LTCC 内部实现，输出端的低通滤波器由表贴器件实现，其他元件全部用 MMIC 裸芯片在 LTCC 表层实现。

### 2.1 高频前端模块的多层设计

LTCC 多层陶瓷基板的特点之一就是它可以用多层结构来集成有源器件、无源器件以及多种信号线，包括微带线、带状线、电源线和控制线等。考虑到基板的机械强度和高频前端的指标需求，LTCC 总层数一般要求 10 层以上(生瓷厚度在 0.1 mm 的情况下)。

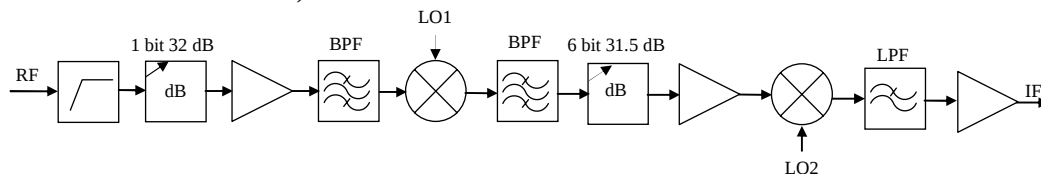


Fig.1 Block diagram of a front-end module

图 1 高频前端模块组成框图

另外高频前端的布线密度越大，需要的层数可能也越多。本文选用了 11 层 LTCC 介质基片来实现高频前端模块，图 2 左侧标识了不同层金属导带的名字，由上而下，分别为 L1 到 L11B，L1 是 LTCC 的表层，L11B 是 LTCC 的最底层，金属导带的层与层之间即为 LTCC 介质基片。11 层介质基片总厚度约为 1.1 mm，与图 2 右侧的标识  $h_2$  对应，即  $h_2=1.1$  mm。MMIC 芯片通过导电胶粘贴在 LTCC 表层。

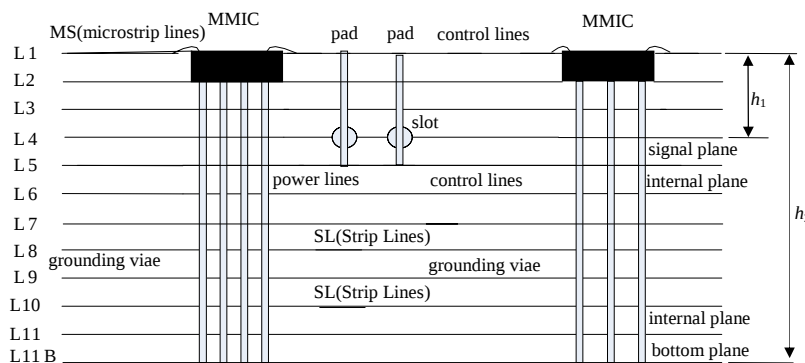


Fig.2 Multilayer structure of the frond-end module

图 2 高频前端模块的层结构示意图

### 2.2 高频前端模块的滤波器设计

埋置的带通滤波器是本文的难点和亮点，包括一次混频前的 C 波段带通滤波器和二次混频前的 L 波段带通

滤波器。设计时,在 HFSS 中对滤波器进行三维电磁场仿真,结合 LTCC 工艺特点和加工公差等因素进行滤波器图形的优化。由于滤波器埋置在 LTCC 中间层实现,微波信号需要通过过孔与顶层微带线进行连接,应对其着重设计以保证滤波器带内特性、驻波和带外抑制不恶化。

交指型滤波器的体积小,结构简单,设计方便,性能优良,故选用交指型滤波器来实现 C 波段滤波器。滤波器的指标为:频率  $F1 \pm 300$  MHz,镜像抑制大于 40 dB。在 HFSS 对该滤波器进行建模,如图 3 所示,带状线交指滤波器的尺寸为  $4.8 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$ 。在仿真时结合 LTCC 工艺特点对 C 波段滤波器进行仿真,结果满足指标要求。

选用 LC 滤波器来实现 L 波段滤波器。滤波器的指标为:  $F2 \pm 10$  MHz,镜像抑制大于 30 dB。结合 LTCC 的多层优势,滤波器分布在 L7~L9 层。在 HFSS 对该滤波器进行建模,如图 4 所示,LC 滤波器的尺寸为  $3 \text{ mm} \times 5.4 \text{ mm}$ 。



Fig.3 3D module of the band-pass filter in C band  
图 3 C 波段带通滤波器的三维模型图

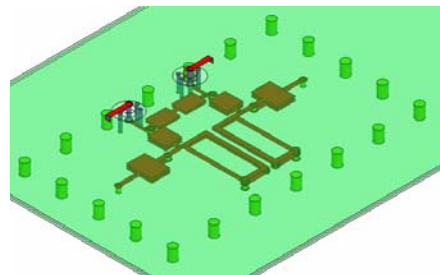


Fig.4 3D module of the band-pass filter in L band  
图 4 L 波段带通滤波器的三维模型图

### 3 高频前端模块的实现

在高频前端模块的电路布局时,由于多层基板电路中既要传输微波信号,又要传输逻辑控制信号和电源信号,如果基板设计和布局布线不当就会在电路间产生互耦、串扰和辐射,导致模块内部产生严重的电磁干扰,而这些干扰又极易引起放大器的自激,因此应重点考虑电磁兼容问题。在 LTCC 布局时,应遵守下列原则:

- 1) 微波电路布局布线时应同时兼顾电源和控制电路的布局,应采用接地通孔栅等手段保证大面积的微波接地,走线中应尽量减小微波传输线的不连续性、线宽阶梯突变和拐弯。微波电路周围空白处覆地屏蔽。
- 2) 微波传输线尽量远离电源和控制电路;微波层、电源层与逻辑信号层之间应该用地层隔离,控制信号电路和电源尽量采用低阻抗线回路,电源线采用单独的电源层进行供电,并在电源输入和输出端口并联滤波电容和高频扼流电感,去耦合电容应该尽量靠近芯片引脚。

对高频前端模块的布局进行设计和优化,11 层 LTCC 电路的版图尺寸为  $64 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1.1 \text{ mm}$ ,如图 5 所示,装配后的实物照片如图 6 所示。前端模块有 4 个模拟输入输出接口,输入信号包括射频、一本振,二本振,输出信号是中频信号,另外还包括电源和控制信号。

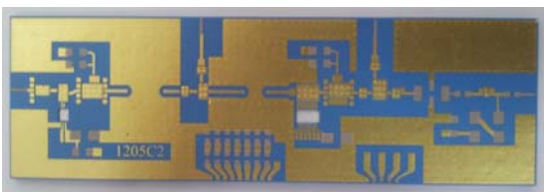


Fig.5 Layout of the front-end module  
图 5 高频前端模块的版图

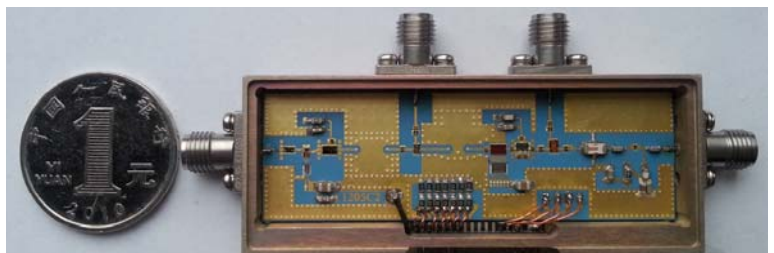


Fig.6 Picture of the front-end module  
图 6 高频前端模块的实物照片

### 4 高频前端模块的测试结果

对高频前端模块进行测试,测试项目和指标如表 1 所示。

如表 1 所示,高频前端模块的增益大于 40 dB,带内平坦度小于 2 dB,噪声系数小于 5 dB,输出  $P-1$  大于 13 dBm,镜像抑制优于 51 dB。模块的增益在频段的低端偏低,在频段的高端偏高,主要是由于 C 波段滤波器的带内平坦度造成的影响,今后在二次流片时结合 LTCC 工艺对其进行优化和修正,就可改善整个模块的带内平坦度。

表 1 高频前端模块的测试指标

Table1 Measurement results of the front-end module

| RF frequency | gain/dB | NF/dB | P-1/dBm | image suppression/dB |
|--------------|---------|-------|---------|----------------------|
| C band       | 42.1    | 4.1   | 13      | 51                   |
|              | 42.4    | 4.0   |         |                      |
|              | 44.0    | 3.5   |         |                      |
|              | 44.1    | 3.7   |         |                      |
|              | 42.6    | 3.6   |         |                      |
|              | 42.6    | 3.7   |         |                      |
|              | 44.1    | 3.5   |         |                      |
|              | 44.0    | 3.6   |         |                      |

5 结论

本文利用 LTCC 技术集成了小型化 C 波段高频接收模块，将 C 波段和 L 波段的带通滤波器埋置在 LTCC 中间层实现，在系统进一步集成时其对应顶层可放置其他电路，从而提高集成度。高频接收模块主要为产品的工程化实现进行尝试，其尺寸可根据实际需要进一步减小。经过测试，高频接收模块的指标基本符合设计要求，性能良好，可以进一步推广应用。

参考文献：

[ 1 ] GIORDANI R,AMICI M,BARIGELLI A,et al. Highly integrated and solderless LTCC based C-band T/R Module[C]// Proceedings of the 39th European Microwave Conference. Rome,Italy:IEEE, 2009:407–410.

[ 2 ] MARKOV K,KEILER T,CHERNYAKOV A,et al. Thermal characterisation of LTCC front-end modules with integrated power amplifiers for wireless LAN application[C]// Proceedings of the 36th European Microwave Conference. Manchester: IEEE, 2006:1774–1777.

[ 3 ] SCHUH P, Leberer R,Sledzik H,et al. Advanced high power amplifier chain for X-band T/R-modules based on GaN MMICs[C]// The 1st European Microwave Integrated Circuits Conference. Manchester:IEEE, 2006:241–244.

[ 4 ] 高勇,王绍东. 采用 LTCC 技术的 X 波段接收前端 MCM 设计[J]. 现代雷达, 2008,30(5):106–109. (GAO Yong, WANG Shaocong. MCM design of X band receiver front-end adopting LTCC technology[J]. Modern Radar, 2008,30(5): 106–109.)

[ 5 ] 严伟,禹胜林,房迅雷. 基于 LTCC 技术的三维集成微波组件[J]. 电子学报, 2005,33(11):2009–2012. (YAN Wei,YU Shenglin,FANG Xunlei. Three dimensional integrated microwave modules based on LTCC technology[J]. Acta Electronica Sinica, 2005,33(11):2009–2012.)

[ 6 ] 王周海,李雁,王小陆,等. X 波段双通道 T/R 组件的 LTCC 基板电路的设计[J]. 雷达科学与技术, 2005, 3(5): 301–305. (WANG Zhouhai,LI Yan,WANG Xiaolu,et al. Design of LTCC-substrate for X-band dual-channels T/R module[J]. Radar Science and Technology, 2005,3(5):301–305.)

[ 7 ] 潘光胜. 毫米波接收前端 LTCC 技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2005. (PAN Guangsheng. Research on front-end of millimeter wave receiver based on LTCC technology[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2005.)

作者简介：



纪建华(1981–)，女，山西省大同市人，博士，高级工程师，主要研究方向为 LTCC 集成技术、接收机系统、数字收发技术.email: 13810169941@139.com.

郭 敏(1984–)，男，吉林省长春市人，硕士，工程师，主要研究方向为微波电路、接收机系统.

许 明(1984–)，男，成都市人，硕士，工程师，主要研究方向为微波电路、接收机系统.

田建伟(1967–)，男，山东省青岛市人，硕士，研究员，主要研究方向为接收机系统.