

一种多通道高隔离度毫米波发射组件的设计

沈 玮,张理正,秦 琨,李振海,陈桂莲

(上海航天电子技术研究所,上海 201109)

摘要:随着雷达技术的发展,毫米波单片集成电路技术日趋成熟,小型化、轻量化、多功能的毫米波雷达在国内得到了深入的研究和应用。为满足毫米波雷达的需求,设计了一种多通道高隔离度毫米波发射组件。采用普通 FR4 多层板实现电源和控制信号走线,其中功分器芯片、电容、电阻等器件装配在 FR4 多层板的表层;采用低损耗的 Rogers 5880 微波板材进行毫米波射频传输。为提高通道间和级联功放间的隔离度,进行金属隔墙处理,以获得更好的物理隔离。通过对腔体进行电磁仿真,使腔体的谐振频率高于工作频带。该组件质量仅为 41 g,输出功率不低于 35.5 dBm,发射效率大于 16%,可应用于毫米波 SAR 和固态发射机等场景。

关键词:高隔离;毫米波;多通道;发射组件;轻量化

中图分类号:TN42 **文献标志码:**A

DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.06.019

Design of Multi-Channel Millimeter Wave Transmitter Module with High Isolation

SHEN Wei, ZHANG Lizheng, QIN Kun, LI Zhenhai, CHEN Guilian

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: With the development of radar technology, millimeter wave MMICs are becoming more and more mature. Miniaturized, lightweight and multifunctional millimeter wave radar has been deeply studied and applied at home and abroad. To meet the needs of millimeter wave radar, this paper proposes a multi-channel millimeter wave transmitter module with high isolation between channels. For reducing its cost, one multi-layer FR4 board is used to realize the routing of DC and control signals. Power divider MMICs, capacitors and resistors are sealed on the top metal layer of FR4. Furthermore, a Rogers 5880 board which implements the millimeter wave transmission can obtain low insertion loss. In order to get high isolation between channels and series amplifiers, some metal iris walls are introduced to acquire better physical isolation. Electro-magnetic simulation of the cavity is demonstrated to push the resonant frequencies away from work frequency. Finally, the millimeter wave transmitter module is presented with an extremely lightweight of only 41 g by this technology. Its output power is greater than 35.5 dBm and the efficiency is higher than 16%. The transmitter module can be used in millimeter SAR, millimeter wave solid-state transmitter and other scenarios.

Keywords: high isolation; millimeter wave; multi-channel; transmitter module; light weight

0 引言

有源相控阵雷达已广泛应用于陆基、舰载和机载移动雷达系统中^[1]。有源相控阵雷达由大量天线辐射单元组成,每个辐射单元需要由 TR 组件进行功率驱动。因此对具有高性能、低成本的 TR 组件提出了迫切需求^[2-4]。TR 组件主要分为瓦片式、砖块式 2 种。其中,瓦片式封装 TR 组件可实现轻量

化设计,但由于其散热面积较小,输出功率相对较低^[5-6]。对于机载雷达等领域,高输出功率必不可少。对于大功率 TR 组件,导热性能是一个非常重要的参数,其决定了组件的工作环境温度^[7]。因此,在空间允许范围内,优先使用传统的砖块式封装技术。

本文提出了一种砖块式封装的高隔离度毫米波

发射组件设计方法。介绍了组件的电路原理；描述了该组件的设计与实现过程，通过 FR4 多层板、Rogers 5880 微波板材的组合实现数字信号和微波信号的传输，通过引入金属隔墙实现放大器间的高隔离度；最后给出了加工实物与测试结果。

1 组件电路原理

四通道 Ka 波段发射组件的原理框图如图 1 所

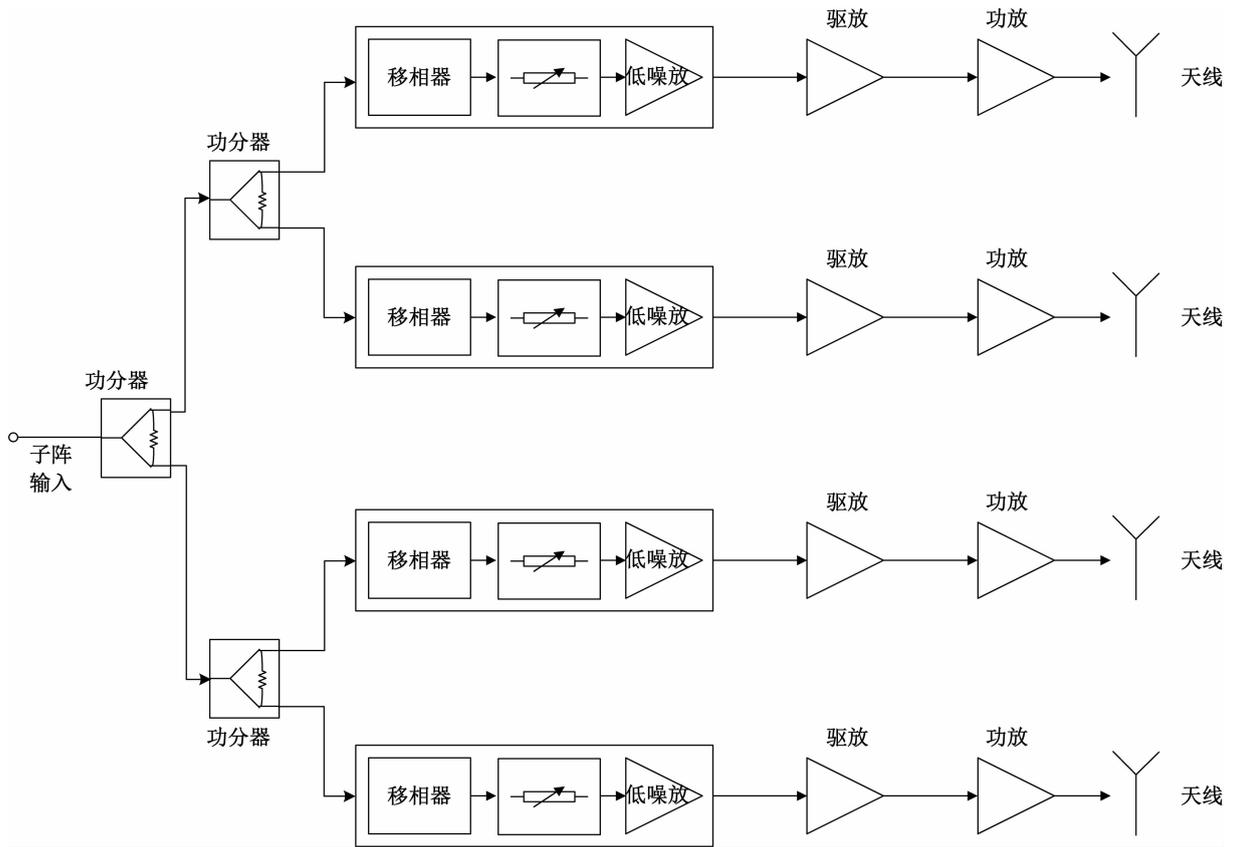


图 1 组件框图

Fig. 1 Block diagram of proposed module

正交合成功放如图 2 所示。图 2 中采用 2 个 3 dB 朗格电桥耦合器实现正交合成功放^[8]，合成功放饱和输出功率为 36 dBm，效率约为 25%。耦合器直接在砷化镓基板上实现。相较于威尔金森功分器，朗格电桥耦合器两输出端连接相同负载，可对输入驻波进行有效改善；同理，对于输出驻波受负载牵引的影响较小。

发射组件的输入功率约为 (10 ± 1) dBm，末级功放的饱和输出功率大于 36 dBm。考虑到四路功分器、移相器，以及衰减器的插损约为 21 dB，组件的发射通道增益应大于 47 dB。此链路中，为补偿

示。由图可见，该组件包含 3 个功分器芯片、5 位数字移相器芯片、5 位数字衰减器芯片、低噪声放大器、驱动和功率放大器芯片。所有 Ka 频段的微波单片均采用砷化镓技术。由于在 Ka 频段隔离器的插损较大，为了提高发射组件效率，组件输出端未设置隔离器。组件的输出驻波可通过采用正交合成的末级功放进行改善。该组件既能提供发射功率，又具备波束控制的相移功能。

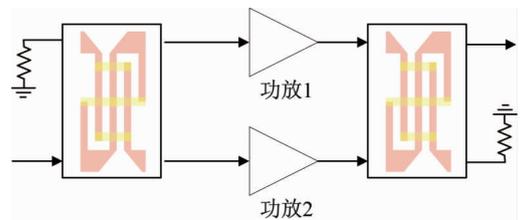


图 2 正交合成功放

Fig. 2 Quadrature composite power amplifier

发射增益，将一款低噪声放大器置于衰减器之后，低噪声放大器也可用增益模块进行替代。

2 组件的设计与实现

2.1 物理布局

Ka 频段发射组件的设计关键是控制微波信号的传输损耗。为此,将 FR4 多层板和 Rogers 5880 微波板材相结合,从而实现电源、控制信号和微波信号的传输。多层板和微波板示意如图 3 所示。其中:FR4 多层板主要用于电源和控制信号的传输;具有低损耗角的 Rogers 5880 微波板材在 Ka 频段损耗较小,用于微波信号的传输。

Rogers 5880 微波板材焊接在 FR4 多层板表层,其接地特性可通过接地通孔实现。通孔必须置于 $50\ \Omega$ 微带线正下方,从而保证良好的接地性能。

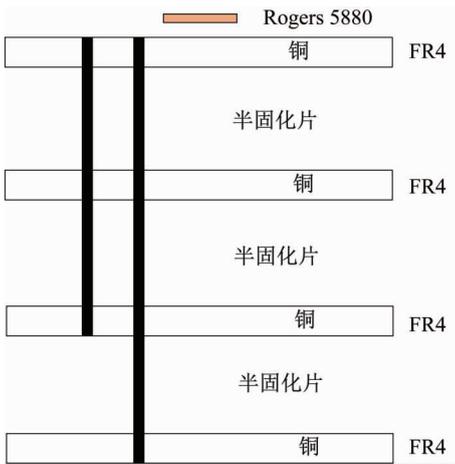


图 3 多层板和微波板示意图

Fig. 3 Schematic diagram of multi-layer board and microwave board

2.2 毫米波传输结构

设计 5 个微波端口和功分器或天线进行连接,端口的驻波是关键指标,可减少由于驻波恶化引入的能量反射。为解决驻波恶化问题,提出一种渐变过渡结构,实现连接器到微带的过渡,端口处渐变微带线如图 4 所示^[9]。

基于 $0.254\ \text{mm}$ 厚的 Rogers 5880 基板, $50\ \Omega$ 微带线线宽为 $0.75\ \text{mm}$,连接器的针直径为 $0.38\ \text{mm}$ 。由电磁仿真结果发现,当渐变线宽度从 $0.4\ \text{mm}$ 到 $0.75\ \text{mm}$ 渐变时,传输结构具有很好的回波损耗。

组件里另一种传输结构为微波单片和传输线间的键合金丝^[10-11]。为了减小金丝引入的寄生电感,一般采用 2 或 3 根并联金丝进行微带线间的互联。

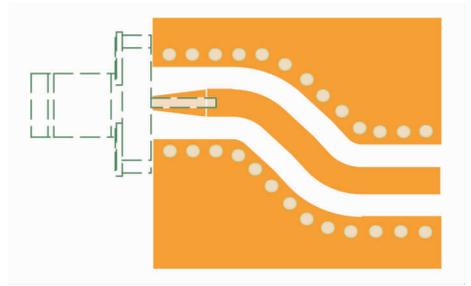


图 4 端口处渐变微带线

Fig. 4 Tapered microstrip line at the port

微带线间的金丝互联传输结构如图 5 所示。

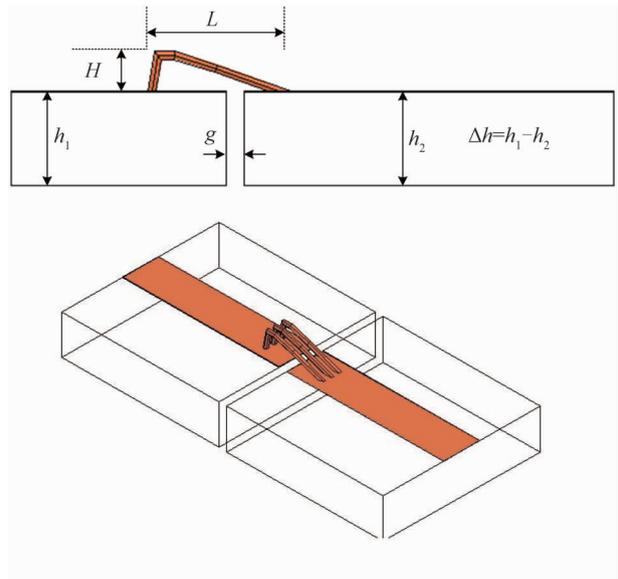


图 5 微带线间的金丝互联传输结构

Fig. 5 Bonding wire structure between microstrip lines

通过改变图 5 中键合线结构的高度 H 、长度 L 、间隙 g 进行电磁仿真, S 参数的变化情况如图 6 (a)、(b)和(c)所示。由图 6(a)中可以看出,插入损耗(IL)和回波损耗(RL)随着高度 H 的减小而变小;由图 6(b)和(c)可以看出,微带线间的长度 L 和间隙 g 变小,传输损耗越小。

2.3 高隔离度的实现

在盒体设计中,首先要规避的是盒体通道内区域的谐振频率位于工作频带内。发射组件盒体结构的顶视图如图 7 所示,绿色部分为各级放大器的隔腔。由于级联放大器具有较大的小信号增益,因此引入了金属隔墙,对各级放大器进行物理隔离,从而获得较高的空间隔离度。

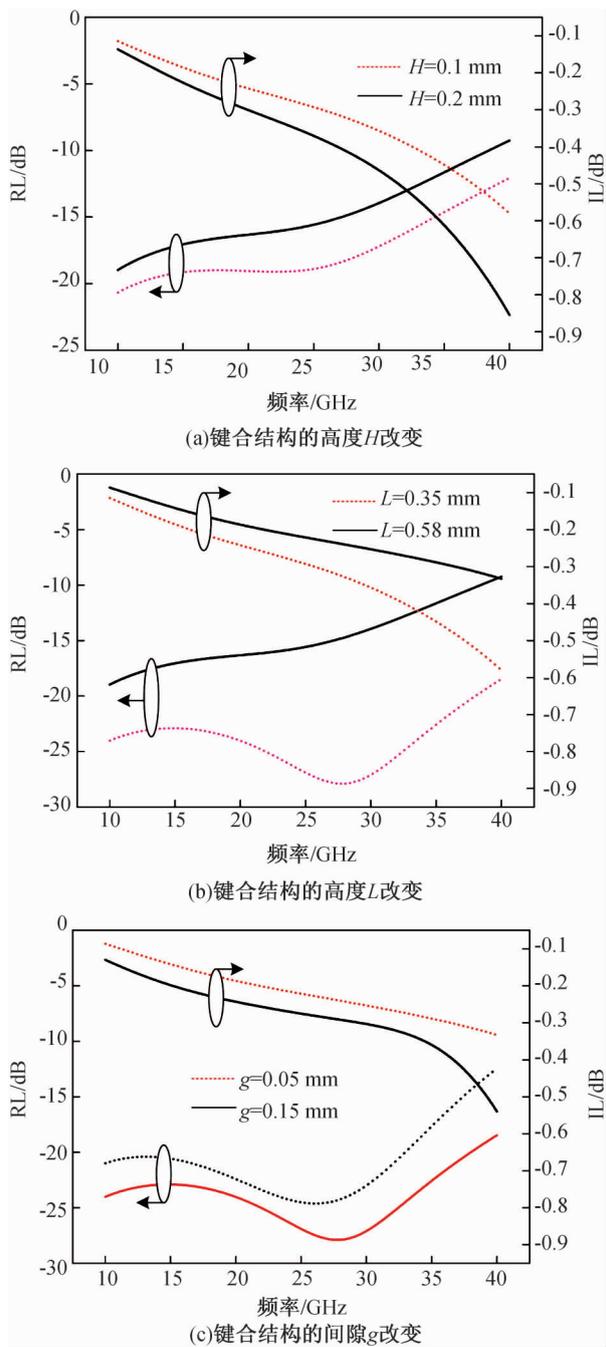


图6 键合结构的高度 H 、长度 L 、间隙 g 对 S 参数的影响

Fig. 6 Simulated S parameters of bonding structure with different values of H , L and g

利用电磁仿真软件 HFSS 进行隔离度仿真,金属墙引入的空间隔离度如图 8 所示。通过仿真软件建模,矩形腔的宽带和高度分别按发射组件各个通道的宽带和高度设置,并在矩形腔中间放置 1 个与发射组件宽度、高度均一致的金属墙。金属墙上蚀刻了 1 个宽度 1.5 mm、高度 0.5 mm 的槽。

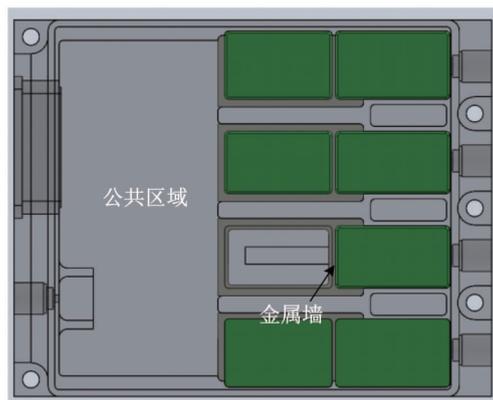


图7 发射组件箱体结构

Fig. 7 Box structure of transmitter module

5880 微带传输线的宽带小于 1.5 mm, 嵌入在此槽中, 用于实现微带线信号传输。仿真频带宽度为 40 GHz。由图 8 可以看出, 整体隔离度约为 50 dB, 可以较好地实现放大器之间的空间隔离。

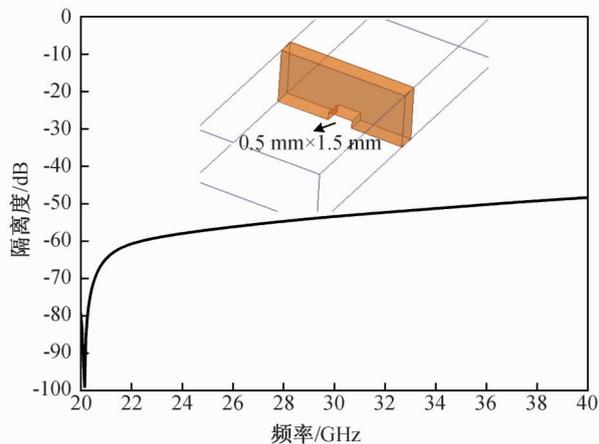


图8 金属墙引入的空间隔离度

Fig. 8 Spatial isolation of metal wall

3 加工与测试结果

该组件里所有的微波单片通过微组装技术进行装配。组件实物和测试结果如图 9 所示。其中: 图 9(a) 展示了四通道发射组件的外形实物; 图 9(b) 给出了 4 个通道输出功率, 以及发射效率与频率间的关系。测试条件是脉冲工作, 输入功率 10 dBm, 输出功率在频带内不小于 35.5 dBm, 发射效率约为 16%。且在 -40 °C 工作温度下, 组件没有出现自激现象。

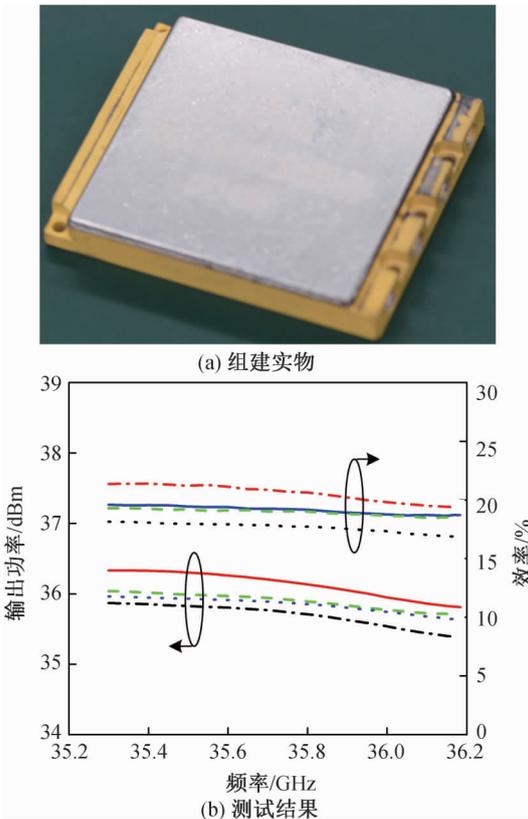


图 9 组件实物和测试结果

Fig. 9 Photograph and measured results of transmitter module

4 结束语

针对传统砖块毫米波 TR 组件级间隔离度低的不足,设计了一种多通道高隔离度毫米波发射组件。通过将 FR4 多层板和 Rogers 5880 微波板结合使用,可有效控制成本。Rogers 5880 微波板在毫米波波段具有低损耗特性。为了提高通道间和级联功放间的隔离度,对金属隔墙进行处理,获得了更好效果的物理隔离。设计了一个

质量仅为 41 g 的轻量化毫米波发射组件,其输出功率不小于 35.5 dBm,发射效率高于 16%。该研究成果可应用于毫米波 SAR 雷达、固态发射机等场景,为 10 W 以上大功率发射组件的研究奠定了基础。

参考文献

- [1] KOPP B A. X-band transmit/receive module overview[J]. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., 2000, 1(6): 705-708.
- [2] BROOKNER E. Phased array radars—past, present and future[C]// Radar. IET, 2002: 104-113.
- [3] 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.
- [4] 石星. 毫米波相控阵雷达及其应用发展[J]. 电讯技术, 2008, 48(1): 6-12.
- [5] 方文源. Ka 波段瓦片式 TR 组件研究与设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017.
- [6] AGRAWAL A K, HOLZMAN E L. Active phased array architectures for high reliability[C]// IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. 2002:159-162.
- [7] KORIYAMA S, KITAZAWA K, SHINO N, et al. Millimeter wave ceramic package for a surface mount [J]. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., 2000, 1(6): 61-64.
- [8] POZAR D M. Microwave engineering[M], 3rd ed. New York: Wiley, 2005: 266-318.
- [9] 林叶嵩. 基片集成人工介质阻抗变换器、耦合器的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2009.
- [10] 谢颖. 微组装关键工艺技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2010.
- [11] 王继学. 星载合成孔径雷达天线的现状与发展[J]. 上海航天, 2001, 18(6): 50-57.

(本文编辑:应振华)