文章编号:1004-2474(2017)06-0809-04

基于 LTCC 的高集成度射频前端研究

卢胜军,林逸群,张锦旗,钱 捷
(中国电子科技集团公司第三十六研究所,浙江 嘉兴 314033)

摘 要:针对现代通信电子战系统对小型化射频前端的需求,该文基于低温共烧陶瓷(LTCC)技术研制出工作在 30～3 000 MHz,具有高集成度的射频前端模组。该模组尺寸仅为 48 mm×46 mm×12 mm,质量仅为 68.5 g,在满足技术指标的同时,体积与质量均减小到原有产品的 1/7。此外,该文还对三维互联和隔离度优化等高度集成关键技术进行了总结和分析。

关键词:通信电子战;低温共烧陶瓷;射频前端;高集成度
中图分类号:TN384 **文献标识码**:A

Study on High Integration Radio Frequency Front-end Based on LTCC

LU Shengjun, LIN Yiqun, ZHANG Jinqi, QIAN Jie
(No. 36 Research Institute of CETC, Jiaxing 314033, China)

Abstract: Aiming at the demand for miniaturized RF front-end for modern communications electronic warfare systems, a 30～3 000 MHz high integration radio frequency front-end module based on LTCC technology has been developed. The size of the module is 48 mm×46 mm×12 mm, and weight is only 68.5 g. Both the volume and weight are reduced to 1/7 of the original product while meeting the technical specifications. The key technologies of high integration such as 3-D interconnection and isolation optimization are also summarized and analyzed in this paper.

Key words: communication electronic warfare; LTCC; radio frequency front-end; high integration

0 引言

未来电子装备对体积的要求日益严苛,在系统中占有重要地位的射频前端也必然朝高集成、小体积和高性能的方向快速发展。低温共烧陶瓷(LTCC)技术集高密度多层互联、埋置无源元件和气密性封装等多种特点于一体,是满足射频前端高密度集成的重要手段[1-2]。

本文基于 LTCC 技术开展了射频前端的高集成与小型化的研究。在研究过程中,充分利用 LTCC 的三维叠层结构,缩小电路尺寸;同时,采用微带线-带状线-通孔-微带线的三维互联结构以节省空间。最后,通过优化设计,在保证通道间的高隔离和低损耗接收等电性能指标的同时,最终实现了射频前端的高集成与小型化。

1 研究目标与原理分析

本文研究的高集成度射频前端是通信电子战系统天线共用器中的基本组成单元。通过小型化设计,研制出高集成度的标准化射频前端单元模块,当需要时,即可通过增加该单元模块的数量,实现阵列化接收系统。本研究能够缩短天线共用器的研制周期,提高工艺稳定性、产品可靠性,降低研制成本。

由于设计覆盖全频段(30～3 000 MHz)的天线存在很大的技术难度,为了满足系统要求,本文采用多个重点频段天线切换使用的方案。本文将射频前端设计成 4 路输入、1 路输出的形式。其中,3 路接外部天线,1 路接系统内部校正信号,在该射频前端中对射频信号进行直通、放大、衰减,原理框图如图 1 所示。

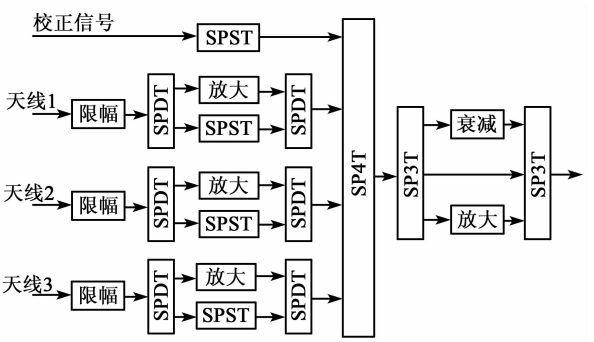


图 1 射频前端原理框图

收稿日期:2017-08-28
作者简介:卢胜军(1973-),男,浙江东阳人,高级工程师,主要从事射频微系统、LTCC 集成技术、频率合成器的研究。

该射频前端主要由限幅器、单刀单掷开关(SPST)、单刀双掷开关(SPDT)、单刀三掷开关(SP3T)、单刀四掷开关(SP4T)、放大器、数控衰减器组成。限幅器主要用于 1 W 连续波的大信号保护;由 SPST、SPDT 和放大器组成支路增益选择,在噪声系数要求较高时,可以选择放大支路工作;SP4T 主要用于天线阵频段选择。由 SP3T、放大器、数控衰减器组成的增益选择组件主要用于通道增益控制,根据不同的工作需求选择不同的增益档。

2 基于 LTCC 的高集成度射频前端设计

2.1 LTCC 基板设计

本文的高集成度射频前端采用 14 层结构的 LTCC 基板设计。该基板采用 Ferro 公司的 A6M 系列生瓷带制备,生瓷带厚度为 0.127 mm,烧结后厚度约为 0.095 mm,基板烧结后总厚度控制在 1.33 mm 左右,基板介电常数为 5.9,损耗角正切值为 0.001 2。出于成本考虑,顶层浆料采用金银混合系统,大面积地和控制线采用银浆料系统,带状线则采用金浆料系统。整体的结构如图 2 所示。

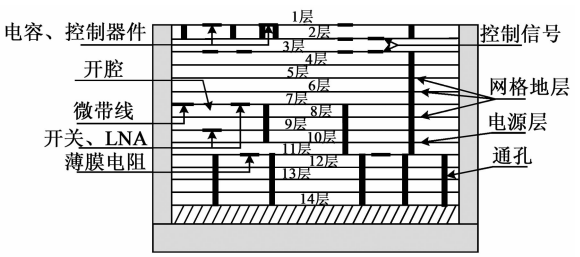


图 2 基于 LTCC 工艺的射频前端剖视图

在电路布局设计时,在 LTCC 基板最上层放置器件(包括电源、控制器件和部分电容等),第 7 层为传输线层;第 4、9 层为大面积地层;第 5、6、8 层为网格化地层(起隔离作用);第 10 层为电源层,第 11 层埋置薄膜电阻;第 2、3 层为控制信号层,电源地通过大量的过孔与微波地相连。需要指出的是,在 LTCC 基板布局中,接地方式对产品性能有着至关重要的作用,因此,设计时需要细致考虑。整体布局尺寸为 37 mm×40 mm,将单刀双掷开关和低噪声放大器(LNA)放在一个腔里,这样既能减少布局尺寸,同时也可保证开关隔离度。

2.2 高密度集成的关键技术

高密度集成的关键技术主要有:传输线三维互联技术、LTCC 电路隔离优化技术等。对于这些关键电路和结构,首先以基本电磁场理论计算出初值,再利用 HFSS 电磁仿真软件,建立起对应的三维模型,然后以 LTCC 电路加工工艺为边界条件,对这些关键电路和结构进行三维电磁分析和参数优化,直到获得满意的结果[3-5]。

传输线主要采用微带-带状-微带同层过渡(见图 3)及微带-带状-微带垂直互联过渡(见图 4)两种形式。经仿真计算,确定带状线宽度为 0.15 mm,微带线宽度为 0.29 mm,带状线、微带线与屏蔽地的缝隙为 0.25 mm。此外,通过仿真还发现,在传输线和过渡端的两边布置通孔,能有效地减小电磁场的辐射,抑制寄生(见图 5)。

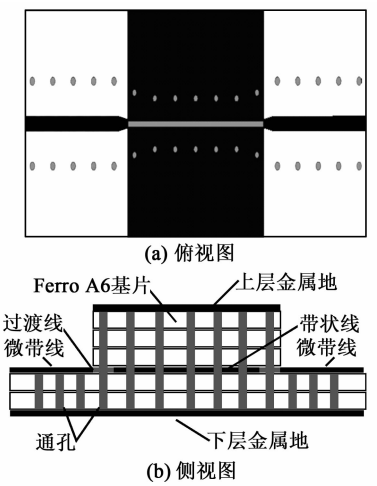


图 3 微带-带状-微带同层过渡结构仿真模型

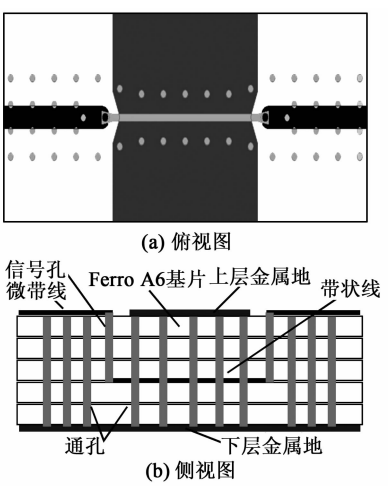
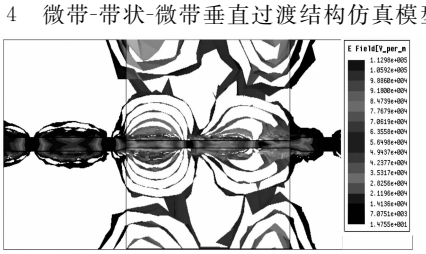
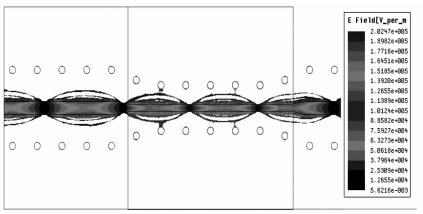


图 4 微带-带状-微带垂直过渡结构仿真模型



(a) 未加通孔电场图



(b) 添加通孔电场图

图 5　微带-带状-微带同层过渡电场分布

图 6 为添加通孔前后的传输特性仿真曲线。由图可见，在过渡端和带状线两旁排布通孔后的传输特性得到了改善，在频率 20 GHz 内，端对端插损仅为 0.3 dB，回波损耗优于－25 dB。

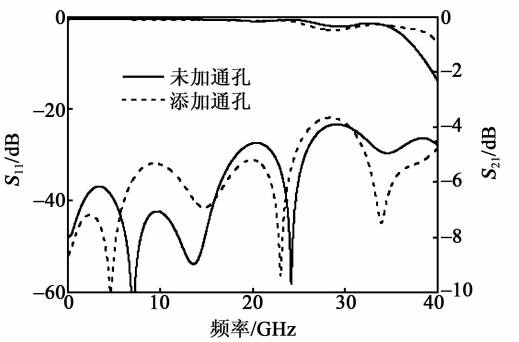


图 6　微带-带状-微带同层过渡 S 参数仿真曲线

LTCC 基板生产过程中，堆叠带来的对位误差和烧结过程中自身收缩率的影响，孔与孔之间会存在 20～50 μm 的误差；在通孔的填充过程中，偶尔出现孔填充不实的现象，导致射频孔不是正规的圆柱状，这些工艺上的误差都能引起传输线的阻抗不匹配。为了分析研究孔与孔之间的误差对传输特性的影响，本文通过构建通孔的电磁仿真模型进行分析，如图 7 所示。由图可见，本文采用的设计方案在频率 20 GHz 内，垂直互联结构的插入损耗小于 0.5 dB，回波损耗在－20 dB 以下，且对位误差 W 在 0～50 μm 变化时，在 20 GHz 范围内的传输特性变化不大。

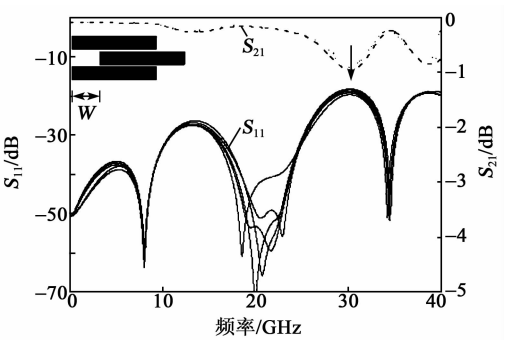


图 7　微带-带状-微带垂直过渡 S 参数随通孔加工误差影响

在优化好传输线基本模型后，在电路设计工具里完成了 LTCC 电路版设计，并将其导入 HFSS 进行整版隔离度及腔体效应的仿真优化，如图 8 所示。针对一些关键端口间的隔离度进行仿真优化，如隔离度 1 表示两个相邻输入端口间的隔离性能，隔离度 2 表示两个共电源的放大器通路之间的隔离性能，隔离度 3 表示图 1 中 SP4T 两个相邻输入射频信号端口之间的隔离性能。主要采用隔离通孔、优化信号线走向等手段[6]来实现隔离度达到 60 dB 的指标。图 9 为 3 个关键端口间优化后的隔离度仿真曲线。

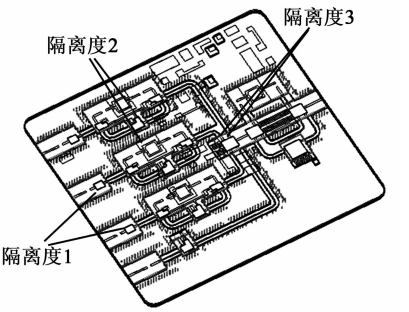


图 8　射频前端整体 HFSS 仿真模型

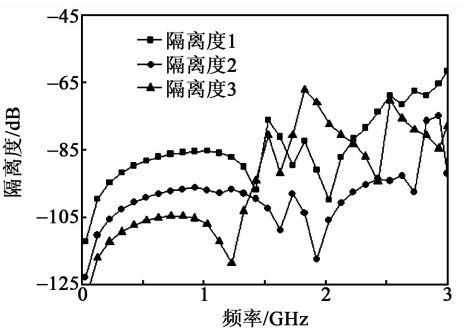


图 9　关键端口隔离度仿真结果

3　实物加工与性能测试

完成电路和结构的设计与加工后，将它们整体集成在密封的金属腔内，通过 SMP 连接器、J30J 连接器分别实现射频信号、电源及控制信号的输入、输出，最终得到了基于 LTCC 的高集成度射频前端，如图 10 所示。整个组件的尺寸为 48 mm×46 mm×12 mm（长×宽×高），质量仅为 68.5 g，体积与质量均减小到原有产品的 1/7。

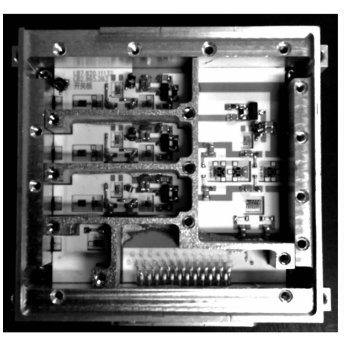


图 10　基于 LTCC 的高集成度射频前端

表 1 为本文研制产品与原组件性能指标对比。其中，增益指标为第一级放大器打开，同时第二级放大器关闭的测试数据。相比于原组件，本文设计的小型化射频前端的性能指标，除全频段增益平坦度略差外，其余电性能指标均略有提升。后续可通过支路添加衰减器，或者选择正斜率的放大器改善增益平坦度。

表 1 本文研制产品与原组件性能指标对比

	本文研制产品			原组件
频率/MHz	30	1 000	3 000	全频段
增益/dB	12.8	11.8	8	10±2
噪声系数/dB	2.41	2.76	3.96	≤4.5
隔离度/dB	90.1	82.5	71.3	≥70
尺寸/mm	48×46×12			142×105×30.5
质量/g	68.5			400

4 结束语

基于 LTCC 的一体化集成设计思路，本文成功实现了一款满足典型通信电子战系统需求的 30～3 000 MHz 射频前端产品。该产品在满足性能指标要求的同时，体积和质量均减小到原有产品的 1/7，达到了小型化的目的。该模组将广泛应用于阵列化的现代通信电子战系统，对减小原有系统体积起到极大地推动作用。

此外，在该组件小型化技术的研究过程中，对基于 LTCC 工艺的三维互联和隔离度优化等高度集成关键技术进行了总结和分析，积累了设计经验，并取得了良好效果，对后续基于 LTCC 的高密度集成组件设计也具有重要的借鉴意义。

参考文献：

[1] 秦跃利，刘志辉，王春富，等. LTCC-D 高密度微波集成工艺技术研究[J]. 电子工艺技术，2014，35(2)：91-94.
QIN Yueli, LIU Zhihui, WANG Chunfu, et al. Microwave integrated technology of thin film on LTCC [J]. Electronics Process Technology, 2014, 35(2): 91-94.

[2] 戴晓芒，徐自强，杨邦朝. 基于 LTCC 技术 S 波段 VCO 研制[J]. 压电与声光，2011，33(4)：665-668.
DAI Xiaomang, XU Ziqiang, YANG Bangchao. A novel S-band VCO based on LTCC technology[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(4): 665-668.

[3] 郎鹏. 微组装中的 LTCC 基板制造技术[J]. 电子工艺技术，2008，29(1)：16-18.
LANG Peng. LTCC substrate manufacture technology [J]. Electronics Process Technology, 2008, 29(1): 16-18.

[4] 徐鑫. LTCC 毫米波集成传输线的过渡及寄生模式的分析与建模[D]. 成都：电子科技大学，2009.

[5] TORBEN B, JACOB A F. K-band frequency synthesier with sub-harmonic signal generation and LTCC frequency tripler [C]//Amsterdam, Netherlands: 2008 European Microwave Integrated Circuit Conference, 2008: 466-469.

[6] 罗明，王贵昌，刘长江，等. 一种小型毫米波宽带频率源设计实现[J]. 电子工艺技术，2016，37(1)：17-20.
LUO Ming, WANG Guichang, LIU Changjiang, et al. RF SiP design based on silicon integrated passive device[J]. Electronics Process Technology, 2016, 37(1): 17-20.

（上接第 808 页）

[14] 徐铁军，许吉英，王佳，等. 扫描近场光学显微镜探针与光场相互作用的分析[J]. 光学学报，2005，25(4)：465-469.
XU Tiejun, XU Jiying, WANG Jia, et al. Numerical analysis of interaction and perturbation between evanescent field and probe in optical field detection by SNOM [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(4): 465-469.

[15] 陈秀秀. ZnSe/ZnS 核壳量子点制备与 SiO_2 包覆的研究[D]. 济南：济南大学，2011.

[16] SINGH J. Theory of excitons[M]. Springer US: Excitation Energy Transfer Processes in Condensed Matter, 1994: 1-45.

[17] HANAMURA E. Very large optical nonlinearity of semiconductor microcrystallites[J]. Phys Rev B: Condens Matter, 1988, 37(37): 1273-1279.

[18] HIROSHIMA T, HANAMURA E, YAMANISHI M. Exciton-exciton interaction and optical nonlinearity in biased semiconductor quantum wells[J]. Phys Rev B: Condens Matter, 1988, 38(2): 1241-1245.

[19] ANDREANI L C, BASSANI F, QUATTROPANI A. Longitudinal-transverse splitting in Wannier excitons and polariton states[J]. Il Nuovo Cimento D, 1988, 10(12): 1473-1486.

[20] 李志强，林伟，丁才蓉，等. 量子点激子超辐射的条件和量子点集合的相干辐射[J]. 量子光学学报，2011，17(2)：141-145.
LI Zhiqiang, LIN Wei, DING Cairong, et al. The condition of exciton superradiance in quantum dot and coherent radiation of excitons in nano-crystal aseemble[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2011, 17(2): 141-145.

[21] HAO L, BAI Z, HUANG Z, et al. Research of fluorescent spectra of oleic acid-stabilized ZnSe nanocrystals based on UV light modification [J]. Appl Phys A, 2016, 122(11): 967-973.