

高隔离 SAW 双工器模组的研制

蒲志勇,杨桃均,罗文汀,张伟,龚旭,杨卫东,温桎茹

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 401332)

摘要:为进一步提高 LTE B3 双工器频段间隔离度,利用系统级封装(SIP)技术设计了一种高隔离声表面波(SAW)双工器模组。该模组由 2 个 SAW 双工器和 3 个耦合器组成,利用 TX-RX 路径的相位相消及耦合器的隔离度,实现单颗 SAW 双工器上下行链路间隔离度的提高。采用阻抗元滤波器架构,实现了单颗 SAW 双工器隔离度达 51 dB。采用宽边带状线多层螺旋耦合线结构实现了工作宽带宽、集成小型化的 3 dB 耦合器。研制的模组测试结果表明,在 B3 频段内,尺寸为 8.0 mm×8.0 mm×2.0 mm,插入损耗小于 3.2 dB,回波损耗大于 13 dB,隔离度优于 65 dB,承受瞬间功率可达 34 dBm。

关键词:高隔离;SAW 双工器;耦合器;模组;频分双工;多层螺旋耦合线

中图分类号:TN62 **文献标识码:**A

Development of High-Isolation SAW Diplexer Module

PU Zhiyong, YANG Taojun, LUO Wenting, ZHANG Wei,

GONG Xu, YANG Weidong, WEN Zhiru

(The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 401332, China)

Abstract: To further improve LTE B3 diplexer interband isolation, a high-isolation SAW diplexer module is designed using SIP technology in this study. The module is composed of two SAW duplexers and three couplers. It applies the phase cancellation of the TX-RX path and the isolation of the couplers to improve the isolation between the uplink and downlink of a single SAW diplexer. An impedance-element filter architecture is used to achieve an isolation degree of 51 dB for the proposed module. A broadside stripline multilayer helical coupler-line architecture is adopted to achieve miniaturized integrated 3 dB couplers with a wide operating bandwidth. The results of the developed module show that in the B3 band, for a SAW diplexer measuring 8.0 mm×8.0 mm×2.0 mm, the insertion loss is less than 3.2 dB, the return loss exceeds 13 dB, and the isolation degree exceeds 65 dB; furthermore, it can withstand instantaneous power levels up to 34 dBm.

Key words: high isolation; SAW diplexer; coupler; module; frequency division duplexing (FDD); multilayer helical coupling line

0 引言

双工器是一种通过有用信号抑制干扰信号的三端口器件,被广泛应用于移动通信系统和卫星通讯中以实现频分双工,在射频前端收发中起关键作用^[1-2]。频分双工是指发射通路和接收通路在较窄频率间隔上同时通信的技术,允许用户同时无线接收和发射信号。收发通路间存在信号泄漏问题,影响接收和发射信号的质量^[3-4]。在商用 LTE 的个人设备中,为阻止发射功率泄漏、谐波分量或互调产物进入高灵敏度的低噪声放大器单元,收发通路之

间的隔离度需大于 60 dB^[4]。

为实现双工器收发通道间的高隔离度,通常采用补偿电路和高阶滤波电路。文献[5-6]通过补偿电路将 SAW 双工器的隔离度提高了约 10 dB,实现了隔离度大于 50 dB。文献[7]在高阶电路拓扑结构中引入传输零点,实现了薄膜体声波谐振器(FBAR)双工器隔离度大于 50 dB。这些工作增加了双工器的开发难度和成本,不利于商用。因此,学者们提出了新的构架来实现收发的高隔离度。文献[8]提出,将 2 个带阻滤波器和 2 个正交混合耦

收稿日期:2024-06-16

作者简介:蒲志勇(1990-),男,四川省通江县人,工程师,硕士。

合器相结合,实现了组件隔离度大于 50 dB,但对组件每个单元性能要求极高,生产难度大。文献[9]在收发通路上采用电气平衡双工器(EBD)来实现前馈射频自干扰消除,达到隔离收发通路间泄漏和谐波分量的目的,该技术的不足是实现隔离信道带宽小,电路复杂度高。文献[10]提出由 3 个正交混合耦合器和 2 个微带双工器组成的新型平衡式双工器,将收发通道全带宽内隔离度都提高了 15~20 dB,但采用的微带双工器隔离度只有 45 dB,且体积较大。

本文采用平衡式双工器构架设计了一种高隔离 SAW 双工器模组,其应用频段为 B3(1 710~

1 785 MHz, RX 端;1 805~1 880 MHz, TX 端),隔离度大于 65 dB,体积为 8.0 mm×8.0 mm×2.0 mm。先在同一压电晶片上通过半导体工艺和表面贴装技术制备了单颗 SAW 双工器,再通过 SIP 技术,将其与耦合器集成为模组。该构架降低了 SAW 双工器设计难度,同时实现 TX-RX 隔离度的增强,简单易行,成本低。

1 高隔离 SAW 双工器模组设计

1.1 设计原理构架

该模组是由 2 个完全相同的 SAW 双工器单元、3 个完全相同的耦合器单元及匹配电路组合而成,原理图如图 1 所示。

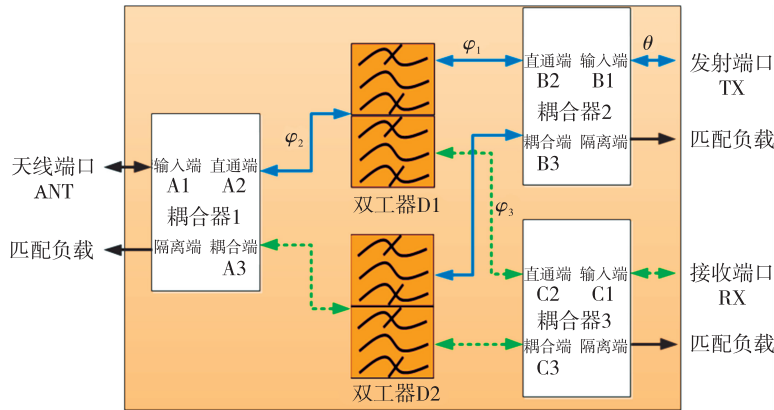


图 1 双工滤波模组原理图

信号从天线端口(ANT 端)输入耦合器 1 中,然后从其直通端口输出的信号进入双工器 D1,耦合端口输出的信号进入双工器 D2。双工器将信号分成发射信号和接收信号,发射信号进入耦合器 2 中,经合成从发射端口(TX 端)发射出去,接收信号进入耦合器 3 中,经合成从接收端口(RX 端)出去,所有耦合器的隔离端口均接匹配负载。该双工器模组原理简单,其基于单元结构的整体设计易实现。

假设 TX 端输入信号的幅度为 A ,相位为 θ ,双

工器(D1, D2)的通带插入损耗为 IL ,隔离度为 ISO_1 ,耦合器为 3 dB 耦合器,其隔离度为 ISO_2 。 φ_1 、 φ_2 和 φ_3 为各路径的相位变化。从 TX 端泄漏到 RX 端的各路径信号相位与幅度变化如表 1 所示。路径 2、3 的信号幅度相同,相位差为 180° ,功率相消。路径 1 的信号可传输到 RX 端,但其幅度衰减了 $A-6-2\times IL-ISO_1-ISO_2$,从而增强了双工器(D1, D2)TX-RX 间的隔离度。由此可见,利用信号传输路径的相位相消及耦合器的隔离度可提升 TX-RX 的隔离度。

表 1 TX 端到 RX 端传输信号的相位与幅度变化

路 径	相位变化/ $^\circ$	幅度变化/dB
1 B1→B2→D1→A2→A3→D2→C3→C1	$\theta-2\times\varphi_1-2\times\varphi_2-270$	$A-6-2\times IL-ISO_1-ISO_2$
2 B1→B3→D2→C3→C1	$\theta-\varphi_1-\varphi_3$	$A-6-IL-ISO_1$
3 B1→B2→D1→C2→C1	$\theta-\varphi_1-\varphi_3-180$	$A-6-IL-ISO_1$

1.2 单颗 SAW 双工器设计

双工器设计和实现方案多种多样,在不同领域运用各有优势^[1,4,11],而在移动通信设备中,对质量、

体积较敏感,于是选择具有质量、体积优势的 SAW 双工器。SAW 滤波器是通过在压电晶圆上制作叉指电极,利用压电材料的正、逆压电效应实现“电-

声-电”物理转换的选频器件。在输入叉指电极上施加外部信号时,逆压电效应激发出同频声表面波(电-声转换),SAW 传播至输出叉指电极,再通过压电效应转化为电信号输出(声-电转换)。

本文中 SAW 双工器是基于钽酸锂(LiTaO_3)体单晶晶圆,采用阻抗元结构进行设计开发,电路拓扑结构如图 2 所示。ANT-RX 端共有 11 个谐振器,采用 6 串 5 并拓扑结构;ANT-TX 端共有 7 个谐振器,采用 4 串 3 并拓扑结构。为提升滤波器带宽,改善带内平坦度,在 ANT、TX、RX 端各并联 1 个匹配电感,分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 。

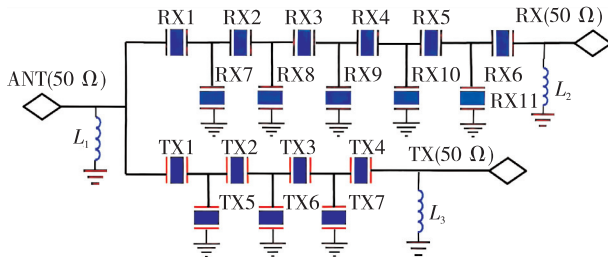


图 2 单颗 SAW 双工器电路拓扑结构

通过“声-电”协同仿真,设计优化出单颗 SAW 双工器的响应曲线如图 3 所示。TX 和 RX 的通带插入损耗小,平坦度好,且具有较高的带外抑制,两通道间的隔离度达 55 dB。

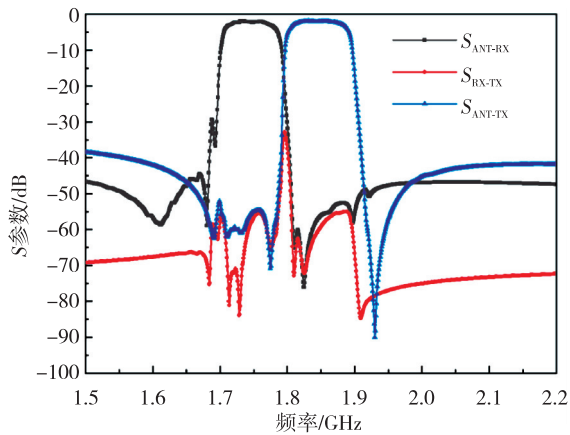


图 3 SAW 双工器传输响应仿真曲线

经过半导体工艺流片和表面贴装技术,制备出单颗尺寸为 $2.5 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ 的 SAW 双工器实物,在 RX、TX 和 ANT 端分别外匹配 1 个 5.0 nH 、 3.0 nH 、 4.0 nH 电感,其响应曲线如图 4 所示。插损小于 2.2 dB ,通带内波动小于 1 dB ,带外抑制大于 35 dB ,RX 与 TX 之间隔离度大于 51 dB 。测试结果较仿真值小 4 dB ,其原因可能是加工工艺误差引入。

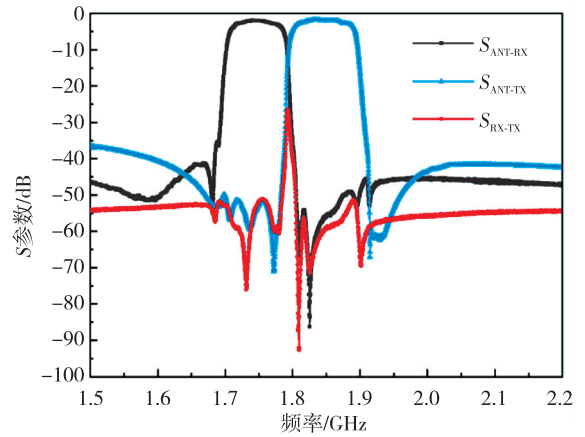


图 4 SAW 双工器实测响应曲线

1.3 3 dB 耦合器设计

3 dB 耦合器又称 3 dB 电桥,是一种强耦合四端口定向器件,由主传输线和副传输线两部分组成,如图 5 所示。基本功能是将端口①输入的信号功率均分到端口②(直通端)和端口③(耦合端),且这两个端口的输出信号相位相差 90° ,而端口④(隔离端)理论上没有能量输出。

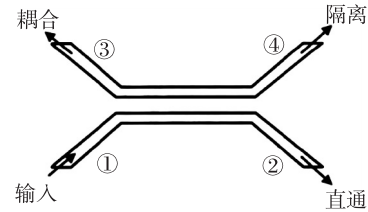


图 5 耦合器原理示意图

为了实现耦合器的大带宽 ($1.7 \sim 2.0 \text{ GHz}$) 和强耦合,采用具有宽边耦合带状线的结构,如图 6 所示。图中上下层金属为接地层,中间两个导体层为带状耦合线, ϵ_r 为介质材料的相对介电常数, b 为介质厚度, S 为耦合线间距, W 为耦合线线宽, t 为金属层厚度。其中 ϵ_r 决定了耦合线的长度, W 和 S 决定了耦合器的耦合度 C 。

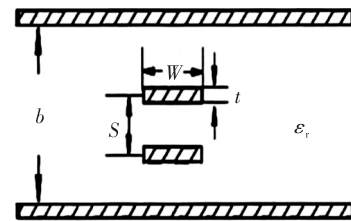


图 6 宽边耦合带状线结构

运用奇偶模分析法可知,3 dB 耦合器的奇偶模特征阻抗^[12] Z_{0e} 、 Z_{0o} 分别为

$$Z_{0e} = Z_0 \sqrt{\frac{1+k}{1-k}} \quad (1)$$

$$Z_{00} = Z_0 \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} \quad (2)$$

式中: Z_0 为端口阻抗; $k = 10^{-C/20}$; C 为耦合器的耦合系数。

奇模、偶模阻抗与端口阻抗 Z_0 需满足:

$$Z_0 = \sqrt{Z_{0e} \cdot Z_{0o}} \quad (3)$$

根据式(1)-(3)可推导出 3 dB 电桥的奇偶模特征阻抗分别为 $Z_{0e} = 120.91 \Omega$, $Z_{0o} = 20.67 \Omega$ 。再根据宽边耦合带状线综合法, 得到 S 、 b 和 W 与 Z_{0e} 、 Z_{0o} 的关系^[13]为

$$\frac{S}{b} = \frac{Z_{0o}}{Z_{0e}} - \frac{Z_{0o} \sqrt{\epsilon_r}}{188.3} \times 0.4413 \quad (4)$$

$$\frac{W}{b} = \left(\frac{188.3}{Z_{0e} \sqrt{\epsilon_r}} - \frac{C'_{fe}}{\epsilon} \right) \cdot \left(1 - \frac{S}{b} \right) \quad (5)$$

其中:

$$\frac{C'_{fe}}{\epsilon} = 0.4413 + \frac{1}{\pi} \left[\left(\ln \frac{1}{1-S/b} \right) + \left(\frac{S/b}{1-S/b} \right) \ln(S/b) \right] \quad (6)$$

耦合线长度为

$$L = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (7)$$

基于 PCB 材料和工艺条件, 设定 $S = 0.03 \text{ mm}$, 基板介电常数为 4.68, 代入式(4)-(7)计算出工作在 B3 范围所需 $b = 0.43 \text{ mm}$, $W = 0.084 \text{ mm}$, $L = 19.7 \text{ mm}$ 。在 L 波段中, 为缩小耦合器, 常采用集总参数法和多层螺旋耦合线级联结构^[14]。集总参数法能减小体积, 同时也缩减了带宽, 不利于设计大宽带。因此, 本文采用多层螺旋耦合线级联结构, 螺旋耦合线单元间通过通孔连接, 其结构如图 7(a)所示, 由 6 层介质材料、2 个耦合线单元及屏蔽金属构成, 三维结构如图 7(b)所示。

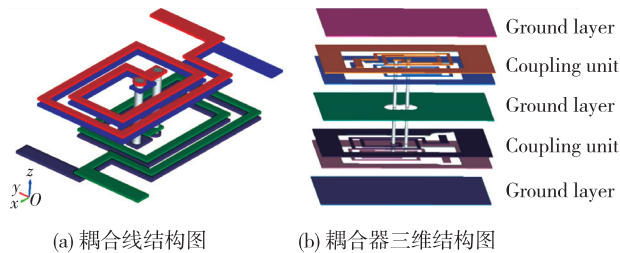


图 7 耦合器结构示意图

利用 HFSS 软件优化仿真, 耦合器的仿真曲线如图 8 所示。耦合器在 1.7~2.0 GHz 内的耦合度

为 3.3 dB, 隔离度大于 25 dB, 输入端口回波损耗大于 25 dB, 耦合端与直通端口的相位差为 90° , 尺寸为 $3.2 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm} \times 0.43 \text{ mm}$ 。

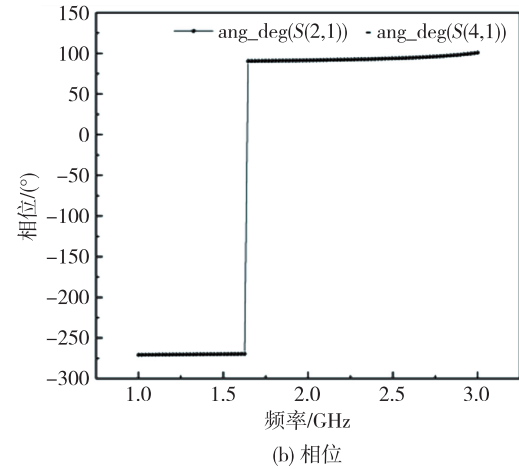
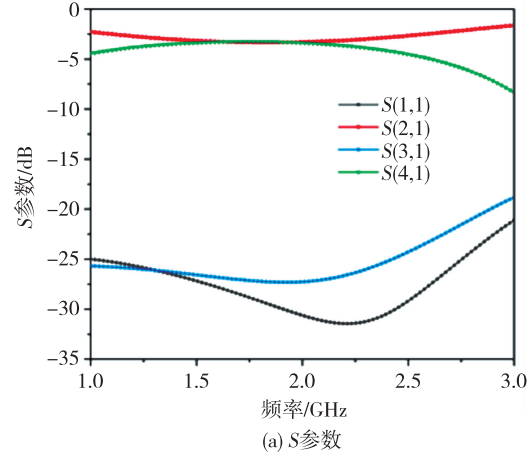


图 8 耦合器仿真曲线

1.4 SAW 双工器模组版图设计

SAW 双工器模组版图共由 9 层介质材料与 10 层导体层构成。将 3 个耦合器集成在 PCB 的第 5-6 层和第 8-9 层导体层中, 匹配电感采用正八边形结构集成在第 3 层导体层上, 2 个 SAW 双工器和 3 个 0402 封装的 50Ω 电阻贴装在 PCB 的顶层上, 输入输出端口放置在底层上, 其他层是屏蔽隔离层, 最后通过走线与通孔将其连接起来。让每条信号链路的路径长度基本保持一致, 保证输入到耦合器中信号的相位相同。在耦合器、射频走线附近加上接地孔, 减少模组射频信号线间串扰, 最终的布线版图如图 9 所示。利用 HFSS 对版图进行有限元仿真, 获取版图的 SNP 文件, 再与未匹配的 SAW 双工器 S3P 文件在 ADS 中仿真, 其模型与结果如图 10 所示, RX 与 TX 间的隔离度大于 70 dB, 通带波

动小于 0.6 dB,插入损耗小于 3.2 dB,注塑前的 PCB 的外形尺寸为 8.0 mm×8.0 mm×1.3 mm。

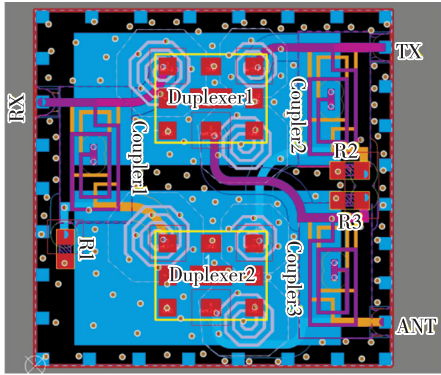
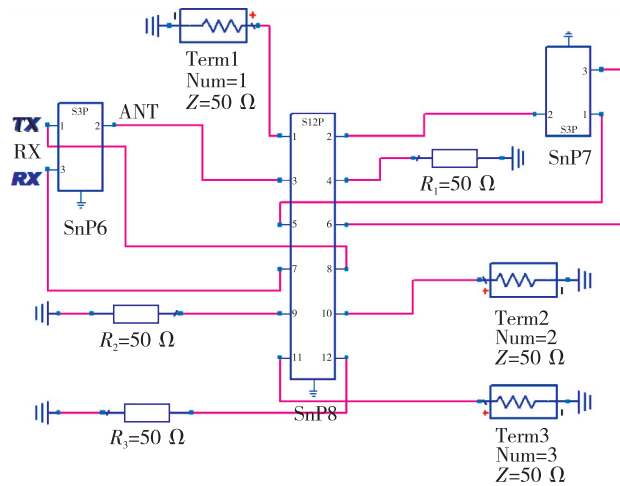
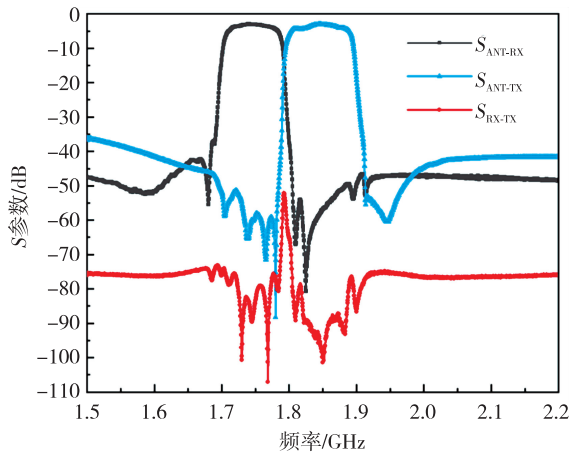


图9 SAW 双工器模组版图



(a) 双工器模组仿真模型



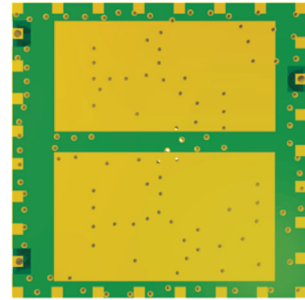
(b) 双工器模组传输特性仿真曲线

图10 双工器模组仿真模型及传输特性仿真曲线

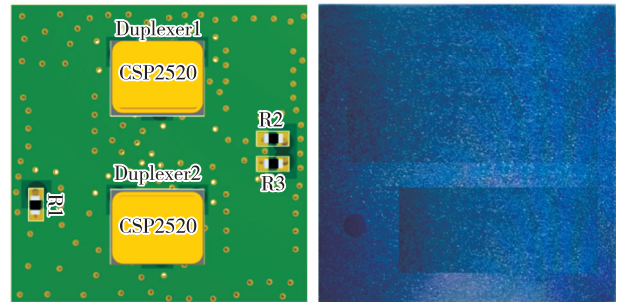
2 SAW 双工器模组的实现与测试

通过系统级封装(SIP)将 SAW 双工器和无源器件封装在一起。底部焊盘层为信号的引出端与接地端,中间元件层放置了 3 个 50 Ω 负载,2 个

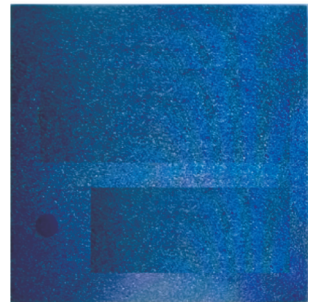
SAW 双工器,最后注塑封装,厚 2.0 mm,SAW 双工器模组的立体结构如图 11 所示。



(a) 底部焊盘层



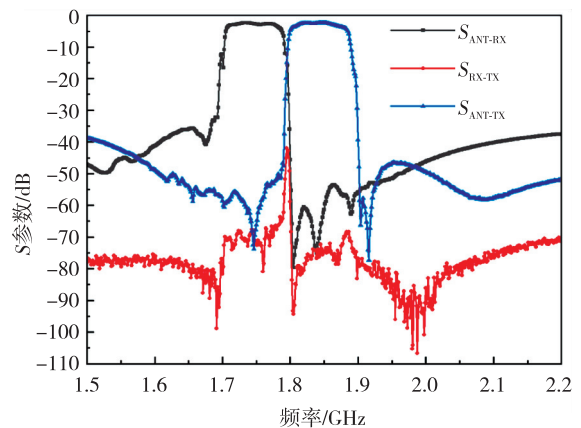
(b) 中间元件层



(c) 顶部注塑层

图11 SAW 双工器模组的立体结构

完成注塑后,实物测试结果如图 12 所示。RX 通带内回波损耗均大于 18 dB, TX 通带内回波损耗均大于 13 dB,通带内波动小于 0.8 dB,在室温下模组实测瞬间功率达 34 dBm。通带频率、损耗、带外抑制性能与仿真特性结果吻合, RX 与 TX 通道间隔离度达 65 dB。隔离度与仿真特性相差 5 dB,可能是 RX 端与 TX 端的链路间存在串扰引起的,仿真时未考虑该因素。实测模组的隔离度比单颗 SAW 的隔离度提高了 14 dB,增加了频分双工通信系统抗串扰的能力,与相同指标的 SAW 双工器相比,降低了加工难度和成本。



(a) 传输特性曲线

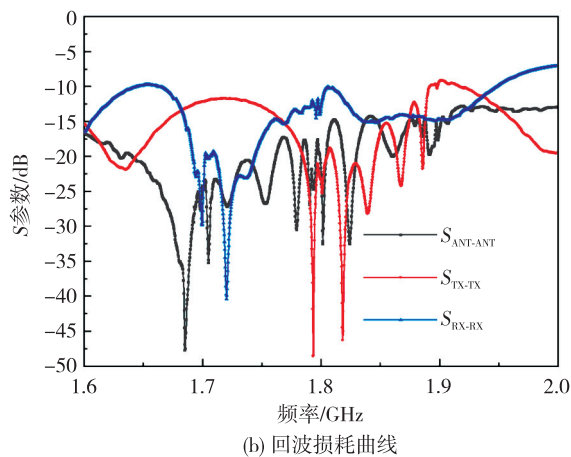


图 12 SAW 双工器模组实测频率响应曲线

3 结束语

通过采用 SIP 技术,本文提出了一种利用链路相位相消、耦合器的隔离度来增强 TX-RX 隔离度的方案,其原理简单,尺寸紧凑。最终实现了尺寸为 $8.0\text{ mm} \times 8.0\text{ mm} \times 2.0\text{ mm}$,隔离度大于 65 dB,上下行链路插入损耗小于 3.2 dB,室温瞬间功率为 34 dBm,通带内的回波损耗大于 13 dB 的 SAW 双工器模组。模组的隔离度相比单颗 SAW 双工器的隔离度提高了 14 dB,这有助于提高 LTE 系统中信号串扰的能力。在未来的工作中,将进一步分析实测与仿真隔离度差异的原因,同时开展对模组的环境适用性的研究。

参考文献:

- [1] 丁江乔,雷雅淋,闫玉涛,等.全 W 波段宽带波导双工器研究[J].微波学报,2022,4(38):45-49.
- [2] 张炜焯,刘军,李菲,等.一种宽带高隔离双工器的设计[J].电子设计工程,2019,24(27):190-193.
- [3] LIEMPD B V, VISWESWARAN A, ARIUMI S, et al. Adaptive RF front-ends using electrical-balance duplexers and tuned SAW resonators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(11):4621-4628.
- [4] LAUGHLIN L, ZHANG C, BEACH M A, et al. Tunable duplexers: Downlink band isolation requirements for LTE user equipment[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2019, 8(5):1349-1352.
- [5] 程一民,齐梦珂,李孟辉,等.高隔离度声表面波双工器技术研究[J].压电与声光,2022,44(5):704-708.
- CHENG Yimin, QI Mengke, LI Menghui, et al. Research on high isolation surface acoustic wave duplexer technology[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2022, 44(5):704-708.
- [6] IWAKI M, UEDA M, SATOH Y. High-isolation SAW duplexer with on-chip saw compensation circuit optimized for isolated multiple frequency bands[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 66(12):1927-1934.
- [7] WU Y, WU H, WANG W, et al. A compact low-loss high-selectivity excellent-isolation FBAR duplexer integrated chip for LTE band-3 industrial applications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(11):4563-4567.
- [8] HONG J S, LANCASTER M J, GREED R B, et al. A high-temperature superconducting duplexer for cellular base-station applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(8):1336-1343.
- [9] SHI K, DARABI H, ABIDI A A. Design and analysis of an electrical balance duplexer with independent and concurrent dual-band TX-RX isolation[J]. Journal of Solid-State Circuits, 2022, 57(5):1385-1396.
- [10] ELZAYAT A M, KOUKI A B. Tx/Rx isolation enhancement based on a novel balanced duplexer architecture[C]//[S. l.]: Microwave Symposium Digest, IEEE, 2011:1-4.
- [11] 孙力,李国辉.小型化高隔离度基片集成波导双工器[J].电子测量技术,2019,42(16):163-166.
- [12] 沈峻威,陈志华,叶强,等.新型 LTCC 高隔离低插损 3 dB 90°电桥设计[J].压电与声光,2023,45(1):153-157.
- SHEN Junwei, CHEN Zhihua, YE Qiang, et al. Design of new LTCC 3 dB 90° bridge with high isolation and low insertion loss[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2023, 45(1):153-157.
- [13] COHN S B. Characteristic impedances of broadside-coupled strip transmission lines[J]. Microwave Theory and Techniques, IRE Transactions on, 1960, 8(6):633-637.
- [14] YI X, SHI Y, YU Z, et al. Wideband and miniaturized forward-wave directional coupler using periodical parallel plates and vertical meanderlines[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(11):2402-2406.

面内传播方向对 SAW 滤波器性能的影响研究

朱建宇^{1,2}, 魏子杰^{2,3}, 范维^{2,3}, 李沛然^{2,3}, 钱一聪², 帅垚^{2,3},
吴传贵^{2,3}, 罗文博^{2,3}, 潘忻强^{2,3}, 张万里^{2,3}

(1. 重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065;

2. 电子科技大学 重庆微电子产业技术研究院, 重庆 401332;

3. 电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 为了满足窄带声表面波滤波器对品质因数 Q 值和带外抑制日益增长的需求, 提出了一种窄带滤波器设计方法。在基于新型 POI 结构谐振器的基础上, 通过旋转谐振器达到改变波传播角度的目的, 并利用二维全模型得到准确的实验数据, 与原结构谐振器分别代入滤波器设计中进行比较。实验结果表明, 该方法在一定程度上能够有效地增加带外抑制, 对过渡带抑制能力有 2~4 dB 的提升, 且具有设计简便, 占用空间小等优点。

关键词: 声表面波 (SAW); 窄带; 谐振器; 带外抑制; 压电材料

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A

Influence of In-Plane Propagation Direction on the Performance of Surface Acoustic Wave Filters

ZHU Jianyu^{1,2}, WEI Zijie^{2,3}, FAN Wei^{2,3}, LI Peiran^{2,3}, QIAN Yicong², SHUAI Yao^{2,3},
WU Chuangui^{2,3}, LUO Wenbo^{2,3}, PAN Xinqiang^{2,3}, ZHANG Wanli^{2,3}

(1. School of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Chongqing Microelectronics Industry Technology Research Institute, University of Electronic Science and

Technology of China, Chongqing 401332, China; 3. School of Electronic Science and Engineering, University of

Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: To meet the increasing demand for Q -value and out-of-band suppression in narrowband surface acoustic wave filters, this paper proposes a design method based on a new type of piezo on insulator (POI) structure resonator. The purpose of changing the wave propagation angle is achieved by rotating the resonator, and accurate experimental data are obtained using a two-dimensional full model, which is compared with the original structure resonator in the filter design. The experimental results show that this method can effectively increase out-of-band suppression, with a 2-4 dB improvement in transition band suppression ability. Additionally, the design is simple and requires little space.

Key words: surface acoustic wave; narrowband; resonator; out-of-band rejection; piezoelectric materials

0 引言

随着 5G 时代的高速发展, 对滤波器的性能要求越来越高。现代无线通信系统具有尺寸紧凑的特点, 因此需要紧凑的滤波器。一般情况下, 每个频段都需要不同的射频 (RF) 滤波器, 以尽量减少串扰, 减轻非线性, 因此常使用声波滤波器 (AW 滤波器)。声波滤波器分为体声波 (BAW) 滤波器和声表面波 (SAW) 滤

波器两种。其中 BAW 滤波器引导信号能量通过基板的主体, 而 SAW 滤波器引导信号能量沿基板表面传递。由于声学传递的物理特性, 近年来村田公司推出了一种高性能 SAW 滤波器结构 (I. H. P. SAW), 很好地限制了表面能量效应, 在拥有高品质因数 (Q) 值的同时, 也有优异的频率稳定性和良好的散热性能, 谐振频率比传统 SAW 谐振器适用范围广。

收稿日期: 2023-12-26

基金项目: 四川省科技计划基金资助项目 (2020YFJ002)

作者简介: 朱建宇 (1998-), 男, 江西省新余市人, 硕士生。帅垚 (1983-), 男, 副教授, 博士