

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106983

# 基于薄膜工艺的C频段交指滤波器小型化设计

唐陆瑶 江肖力 刘巍巍

(中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

**摘要:** 为满足卫星通信某滤波器小型化需求,基于薄膜工艺设计了一款陶瓷基板的C频段交指滤波器。该滤波器由5阶平行耦合的谐振单元构成,输入输出形式采用抽头结构,相比于平行耦合输入输出更有利于实现滤波器的小型化。为了满足高抑制度的指标,该滤波器采用交叉耦合与并联1/4波长开路线的方式引入传输零点,有效地提高了滤波器的带外抑制度。同时采用了阻抗补偿的方式对滤波器驻波进行调节。测试结果显示,滤波器中心频率为3.7 GHz,相对带宽为27%,通带插损为-1 dB,在2.7 GHz与4.8 GHz处阻带抑制>30 dB,在2.5 GHz与5 GHz处阻带抑制>40 dB。滤波器尺寸为9.25 mm×6.72 mm。

**关键词:** 带通滤波器;薄膜工艺;小型化;交指滤波器;传输零点

**中图分类号:** TN713.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Design of miniaturized C-band interdigital filter based on thin film process

Tang Luyao Jiang Xiaoli Liu Weiwei

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** In order to meet the miniaturization requirements of a certain filter in satellite communications, a C-band interdigital filter with a ceramic substrate was designed based on thin film technology. The filter is composed of a 5-order parallel coupled resonant unit, and the input and output form adopted a tap structure, which is more conducive to the miniaturization of the filter than the parallel coupling input and output. In order to meet the high rejection index, the filter adopted cross-coupling and parallel 1/4 wavelength open route to introduce transmission zero points, which effectively improved the filter's out-of-band rejection. Besides, the standing wave of the filter was adjusted by means of impedance compensation. The test results showed that the center frequency of the filter is 3.7 GHz, the relative bandwidth is 27%, the center insertion loss is -1 dB, the stopband rejection is 30 dB at 2.7 GHz and 4.8 GHz, and the stopband rejection is 40 dB at 2.5 GHz and 5 GHz. The filter size is 9.25 mm×6.72 mm.

**Keywords:** bandpass filter; thin film process; miniaturize; interdigital filter; transmission zero point

## 0 引言

随着通信系统的集成化发展,滤波器的性能与尺寸大小直接影响整个通信系统的方案选择。通信系统对滤波器的需求越来越朝着小型化、低成本、高性能等方向发展<sup>[1-2]</sup>。近些年,滤波器设计主要通过新的谐振单元、紧凑的结构与新材料新工艺以及通过引入传输零点提高滤波器的性能等方法实现小型化<sup>[3-6]</sup>。文献[3]中使用阶跃阻抗谐振器(SIR)构造紧凑的梳状结构同时通过交叉耦合引入传输零点,很大程度地实现了滤波器的小型化设计。文献[5]中通过多层设计实现了滤波器的小型化。结合滤波器小型化的各种方法,在一定工艺条件下,通过引入传输零点实现高性能的滤波器的方法更具有小型化的潜力。微带滤波器由于其适用频带宽、利于小型化、易于加工与低成本等优点,常

用于滤波器的小型化设计<sup>[7-8]</sup>。

交指滤波器是由多组平行的谐振单元通过相互交叉平行耦合形成的滤波器结构。通过各谐振单元的长度确定滤波器的中心频率,通过改变各平行谐振单元之间的间距改变耦合的强度以此来改变滤波器的带宽。交指滤波器使用1/4波长短路线作为谐振单元,常用于滤波器的小型化设计。在滤波器的带外增加有限传输零点来增大带外抑制度也是常用的滤波器小型化设计思路,但是可控的交叉耦合与零度馈电等零点引入方法常常不适用于交指滤波器的结构<sup>[9-10]</sup>。通过支节加载来实现传输零点理论上是可行的。但实际设计中,支节加载会使滤波器的驻波显著恶化,需要额外的匹配网络来改善滤波器的驻波<sup>[11]</sup>,这显然不利于滤波器的小型化设计。

收稿日期:2021-06-18

薄膜工艺是通过溅射、光刻、电镀、刻蚀等工艺流程在特定介电常数的基板上形成特定图形的工艺<sup>[12]</sup>。其具有精度高、稳定性好与尺寸小等优点<sup>[13]</sup>。

本文拟设计一款宽带高抑制度的小型化滤波器。对于宽带滤波器,其品质因数 $Q$ 值较小,对应的其阻带的衰减将比较慢。通常情况下,宽带滤波器的阻带抑制度较低。结合本文的技术指标,通过并联 $1/4$ 波长线与交叉耦合的方式引入传输零点,增加滤波器的带外抑制度。

同时,针对并联支节导致驻波恶化的问题,采用在谐振器上进行阻抗补偿的方法进行改善。通过引入传输零点,使用最少的谐振单元满足滤波器的各项技术指标需求,实现滤波器的小型化。

## 1 基于薄膜工艺的传统交指滤波器设计

应项目需求,本文拟设计的带通滤波器的技术指标如下:通带频率范围: $3.2\sim 4.2$  GHz;带内波动: $\leq 1$  dB;通带插损: $\leq 2$  dB;回波损耗: $\geq 15$  dB;带外衰减: $\geq 30$  dB@ $2.7$  GHz& $4.8$  GHz; $\geq 40$  dB@ $2.5$  GHz& $5$  GHz;结构尺寸: $\leq 10$  mm $\times 7$  mm。该滤波器设计的重点为宽带宽、高的带外抑制与小型化。

对比巴特沃斯、切比雪夫与椭圆函数3种滤波器的低通模型,同阶的低通原型中切比雪夫低通模型具有更好的带外抑制且能在有限的频率范围内引入传输零点<sup>[14]</sup>,所以考虑使用切比雪夫模型设计滤波器。切比雪夫模型中,电抗元件的数目计算公式为:

$$n \gg \left\lceil \frac{ch^{-1} \sqrt{(10^{\frac{L_{As}}{10}}) / \epsilon}}{ch^{-1} \Omega_s} \right\rceil \quad (1)$$

式中: $\Omega_s$ 为阻带频率; $L_{As}$ 为阻带衰减; $\epsilon$ 为波纹因子。取波纹 $0.1$  dB,阻带衰减 $40$  dB, $\Omega_s = 5$  GHz。代入式(1)得 $n \gg 4.77$ ,所以 $n$ 取 $5$ 。通过查表得到各元件初始值: $g_0 = g_6 = 1, g_1 = g_3 = 1.1468, g_2 = g_4 = 1.3712, g_5 = 1.9750$ 。

滤波器耦合系数计算公式为:

$$k_{ij} = \frac{FBW}{g_i * g_j} \quad (2)$$

式中: $FBW$ 为相对带宽; $g_i, g_j$ 为滤波器元件初始值,结合上文滤波器元件初始值得到 $k_{12} = k_{45} = 0.2153, k_{23} = k_{34} = 0.1641$ 。

选择介电常数为 $9.8$ 的陶瓷基板,基板厚度为 $H = 0.254$  mm。为了保证加工精度,谐振单元的线宽选择为 $W_0 = 0.4$  mm,谐振器的长度为 $L = \lambda/4 = 7.75$  mm。由于谐振单元开路端对地电容的存在<sup>[15]</sup>,谐振单元的长度可能会略低于 $7.75$  mm。

在确定好谐振单元之后,两个谐振单元之间的耦合系数与间隙之间的关系可以通过HFSS软件萃取得到<sup>[16]</sup>。设两谐振单元之间的间距为 $S$ ,在HFSS中对 $S$ 进行扫参可以等到如图1所示的耦合系数与间距之间的关系曲线。

根据计算得到的耦合系数与图1所示耦合系数与间距关系曲线对比,可以得到各谐振单元之间的间距 $S_{12} = S_{45} = 0.17$  mm,  $S_{23} = S_{34} = 0.23$  mm。滤波器采用抽头方式对外连接,采用 $50 \Omega$ 微带线转共面波导结构(Coplanar Waveguide)实现,便于滤波器的测试。

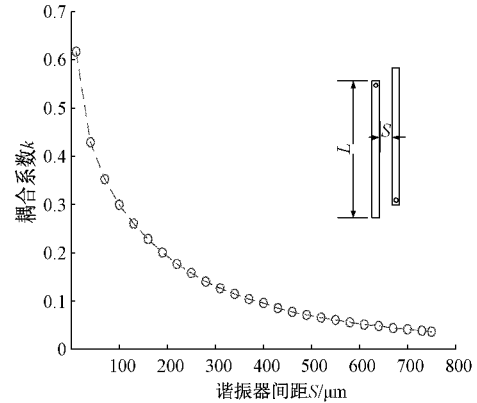


图1 谐振单元耦合系数与间距关系曲线

对于抽头的位置,通过谐振器外部品质因数( $Q_e$ )与抽头的位置关系进行确定。外部品质因数计算公式为:

$$Q_{e1} = \frac{g_0 g_1}{FBW}, Q_{en} = \frac{g_n g_{n+1}}{FBW} \quad (3)$$

结合相对带宽与滤波器元件初始值,计算出 $Q_{e1} = Q_{en} = 4.24$ 。

群延时与外部品质因数的关系为:

$$\tau_{s_{11}(\omega_0)} = \frac{4 * Q_e}{\omega_0} \quad (4)$$

代入上文得到的外部品质因数数值,得出 $\tau_{s_{11}(\omega_0)} = 730$  ns,设参数 $t$ /mm描述滤波器输入输出抽头位置。利用HFSS软件对不同的 $t$ 值进行扫参,得到图2所示的群时延随抽头位置的变化曲线。与计算得出所需的 $730$  ns的群时延进行比对,得到 $t = 2.5$  mm。

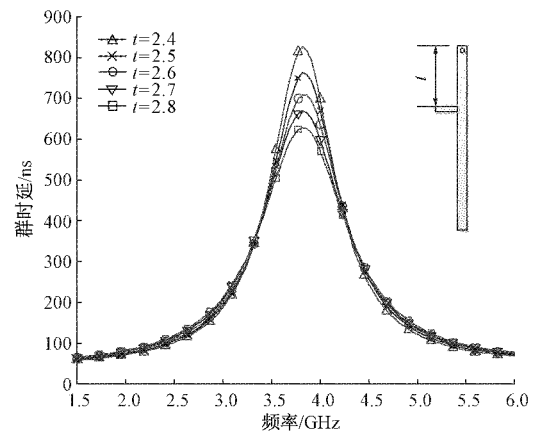


图2 群时延随抽头位置变化曲线

对滤波器进行微调,得到最终的尺寸数据为 $S_{12} = S_{45} = 0.15$  mm,  $S_{23} = S_{34} = 0.21$  mm。谐振器的间距与理

论设计得到的间距偏小,这是由于各谐振单元之间的交叉耦合导致两相邻谐振单元之间的耦合强度变弱。滤波器结构如图 3 所示。滤波器的结构尺寸为  $9.07 \text{ mm} \times 6.72 \text{ mm}$ 。仿真结果如图 4 所示。

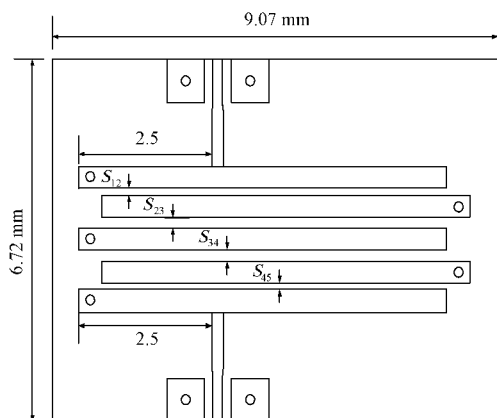


图 3 传统 5 阶交指滤波器结构

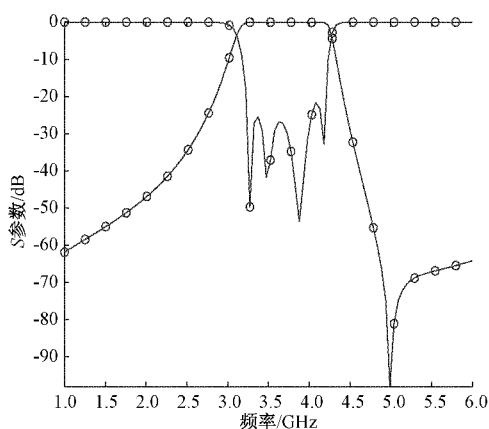


图 4 传统 5 阶交指滤波器仿真结果

由图 4 的结果可得,滤波器插损、带宽等指标满足需求,但是在  $2.5 \text{ GHz}$  与  $2.7 \text{ GHz}$  处抑制度分别为  $-23.8 \text{ dB}$  与  $-30.3 \text{ dB}$ ,不满足需求。高阻带由于通过交叉耦合引入了一个传输零点,提高了滤波器带外抑制度,高阻带抑制度满足需求。综合以上仿真结果,需要进一步增加滤波器的阶数或在低阻带引入传输零点才能满足阻带抑制需求。

根据 5 阶交指滤波器的设计思路,设计 7 阶交指滤波器。取波纹为  $0.1 \text{ dB}$ ,通过查表可得元件初始值为  $g_0 = g_8 = 1, g_1 = g_7 = 1.1812, g_2 = g_6 = 1.4228, g_3 = g_5 = 2.0967, g_4 = 1.5734$ 。  $k_{12} = k_{67} = 0.2083, k_{23} = k_{56} = 0.1563, k_{34} = k_{45} = 0.1487$ 。结合图 1 耦合系数与间距的关系曲线,可以得到  $S_{12} = S_{67} = 0.18 \text{ mm}, S_{23} = S_{56} = 0.25 \text{ mm}, S_{34} = S_{45} = 0.26 \text{ mm}$ 。对滤波器进行微调,得到最终的尺寸数据为  $S_{12} = S_{67} = 0.15 \text{ mm}, S_{23} = S_{56} = 0.21 \text{ mm}, S_{34} = S_{45} = 0.22 \text{ mm}$ ,孔径  $D$  为  $0.2 \text{ mm}$ 。7 阶滤波器结构如图 5

所示。滤波器的结构尺寸为  $9.07 \text{ mm} \times 7.96 \text{ mm}$ 。

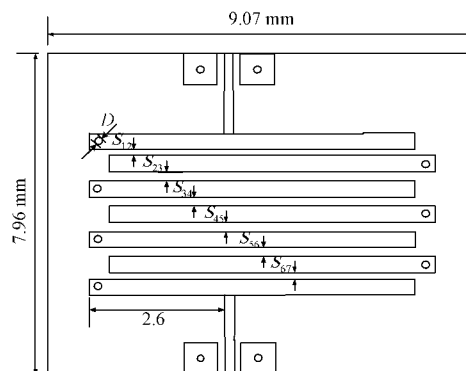


图 5 传统 7 阶交指滤波器结构

对滤波器模型进行仿真得到在  $2.5 \text{ GHz}$  与  $2.7 \text{ GHz}$  处抑制度分别为  $-35.8 \text{ dB}$  与  $-43 \text{ dB}$ ,满足需求。但是滤波器尺寸大于指标所需的  $10 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$  的尺寸要求,所以需要通过在滤波器低端引入传输零点的方式提高滤波器的低阻带抑制度实现滤波器小型化。

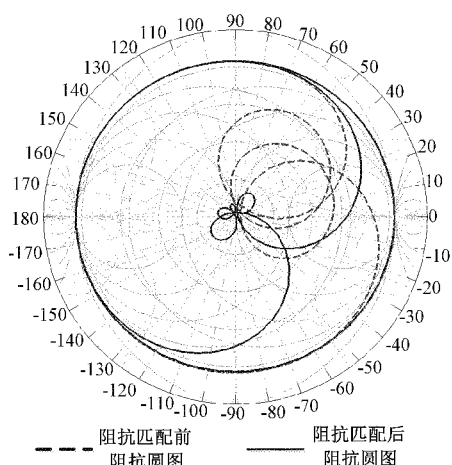
## 2 基于薄膜工艺的交指滤波器小型化设计

由以上 5 阶传统交指滤波器的仿真结果可得,除了低端的抑制度不够,其他的技术指标都满足需求。设计 7 阶的交指滤波器,虽然各项技术指标可以满足设计需求,但是滤波器的尺寸超过指标要求。为此,本文通过引入合适的传输零点增强滤波器的带外抑制度,进而实现滤波器的小型化。

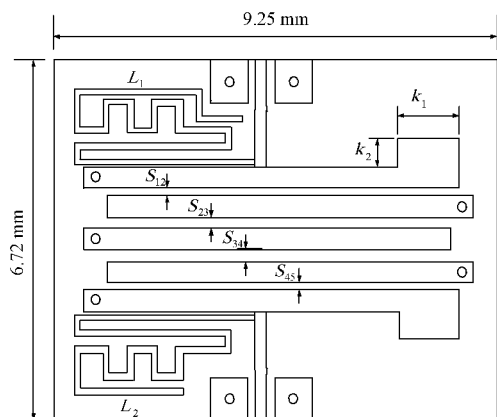
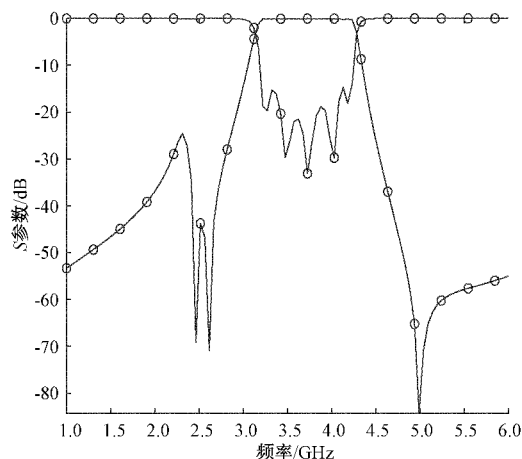
常用的引入传输零点的方法主要有串联或并联短节线、交叉耦合与零度馈电等。根据具体的滤波器结构与设计需求选取引入传输零点的方法。本文设计的交指滤波器通过交叉耦合已经在高阻带形成一个传输零点。鉴于低阻带带外抑制度不够的情况,拟采用在输入输出端并联  $\lambda/4$  开路短节线的方法引入合适的传输零点。

结合以上分析与滤波器的技术指标,在输入输出端分别并联长度为  $L_1 = 12.16 \text{ mm}, L_2 = 11.25 \text{ mm}$  的开路线,在频率  $2.5 \text{ GHz}$  与  $2.7 \text{ GHz}$  附近引入传输零点。但是经过仿真发现,在滤波器输入输出端并联  $\lambda/4$  开路线后滤波器的驻波有显著恶化。提取出滤波器的阻抗圆图如图 6 虚线所示,对滤波器的阻抗进行分析,滤波器通带的电阻偏大,电抗呈感性。

结合滤波器输入阻抗分析,本文通过在第 1 与第 5 谐振单元上添加合适的补偿微带线以增加滤波器输入阻抗的容抗,对驻波进行补偿调节。对补偿微带线的长宽  $k_1, k_2$  利用 HFSS 软件进行扫参优化,最后得到  $k_1 = 1.25 \text{ mm}, k_2 = 0.5 \text{ mm}$ 。并联  $\lambda/4$  开路短节线与谐振单元之间的间距对滤波器输入阻抗的阻值也有一定的影响。根据平行耦合线理论,随着两平行耦合线的间距减小,两微带线之间的耦合系数增加,微带线阻值减小。在该滤波器设计中,缩小

图6 加载 $\lambda/4$ 开路线滤波器阻抗圆图

并联 $\lambda/4$ 开路短节线与谐振单元之间的间距有利于滤波器输入阻抗的匹配。阻抗匹配后滤波器的阻抗圆图如图6实线所示。滤波器结构如图7所示。滤波器的最终尺寸为 $9.25\text{ mm}\times 6.72\text{ mm}$ 。仿真结果如图8所示,在 $2.5\text{ GHz}$ 与 $2.7\text{ GHz}$ 处抑制度分别为 $-38.9\text{ dB}$ 与 $-50.8\text{ dB}$ ,其他技术指标也满足需求。

图7 并联 $\lambda/4$ 开路线引入传输零点的滤波器结构图8 并联 $\lambda/4$ 开路线引入传输零点的滤波器仿真结果

### 3 容差分析

由于薄膜工艺加工实现与理论仿真存在一定的误差,使得在滤波器加工过程中对滤波器的线长、线宽、线间距以及孔径等参数与设计存在一定的偏差<sup>[16-17]</sup>。结合薄膜加工的工艺精度,对加工误差对滤波器的性能影响进行仿真分析。薄膜工艺对图形的尺寸公差为 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ ,对滤波器谐振单元的线长、线宽与线间距增大/减少 $10\text{ }\mu\text{m}$ 进行仿真。交指滤波器的一端需要进行打孔接地,薄膜工艺对孔径的误差为 $20\text{ }\mu\text{m}$ ,对孔径增加/减少 $20\text{ }\mu\text{m}$ 进行仿真。通过与原5阶小型化滤波器的仿真结果相比较得出加工误差对滤波器的性能影响。

经过仿真分析,滤波器的线间距主要影响滤波器的耦合强度进而影响滤波器的带宽;间距波动 $10\text{ }\mu\text{m}$ 对滤波器的带宽有一定的影响,但由于设计带宽时留有一定的裕度,滤波器的整体性能还是满足需求的。滤波器谐振单元的线长主要影响滤波器的中心频率,但由于滤波器设计的频段为C频段,对谐振长度不是很敏感,加工误差对滤波器的性能影响不大。滤波器的线宽主要对滤波器的带宽与阻抗有一定的影响,由仿真分析得线宽的波动不破坏原有滤波器的性能。对地通孔的孔径对滤波器的性能几乎无影响。综合以上容差分析,在现有的工艺误差与设计条件下,能加工出符合要求的薄膜滤波器。

### 4 滤波器测试结果

设计的5阶小型化交指滤波器的实物图如图9所示,滤波器的实物尺寸为 $9.25\text{ mm}\times 6.72\text{ mm}$ 。滤波器的输入输出为CPW结构,通过GSG探针针对滤波器进行测试。在测试之前,对整个测试系统(矢量网络分析仪、射频同轴电缆以及探针)运用二端口(line-reflection-reflection-match)方法进行校准。

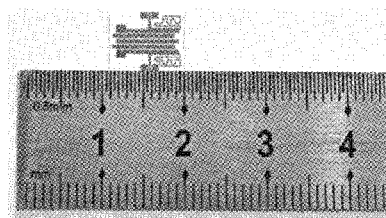


图9 5阶小型化交指滤波器的实物图

仿真与实际测试的S参数如图10所示。从仿真结果与测试结果的对比可以看出,测试结果与仿真结果的一致性较好。由实际测试结果可以看出,通过交叉耦合在高阻带引入了一个传输零点,在 $5\text{ GHz}$ 处的抑制度达到 $-51.9\text{ dB}$ 。通过并联开路线在低阻带引入两个传输零点使在 $2.5\text{ GHz}$ 处的抑制度达到 $-46.2\text{ dB}$ 。通带插损为 $-1\text{ dB}$ ,满足设计需求。

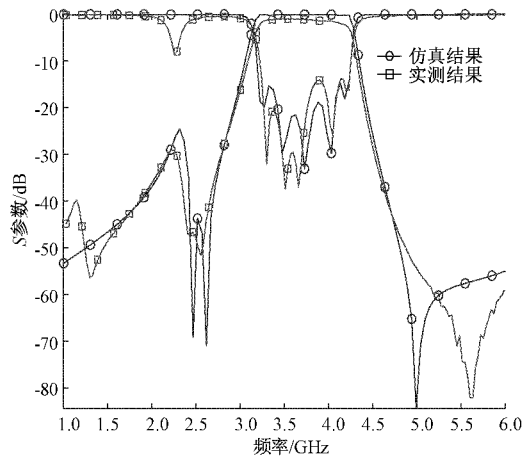


图 10 5 阶小型化交指滤波器仿真与测试结果对比

## 5 结 论

本文通过并联  $\lambda/4$  开路线与交叉耦合的方法在交指滤波器的带外引入了合适的传输零点,提高了滤波器的带外抑制度。但是由于增加了并联支节,导致滤波器的驻波显著恶化。本文通过对滤波器端口阻抗进行分析,通过对首尾谐振单元的阻抗补偿的方法对驻波进行了调节,有效地改善了滤波器的驻波。通过引入传输零点提高滤波器的带外抑制度,以尽量少的谐振单元实现滤波器的技术指标。相比于传统的 7 阶滤波器,通过引入传输零点,滤波器的结构尺寸减小了 15%。有效地减少了滤波器的尺寸,实现了滤波器的小型化设计。具有一定的工程实用性。滤波器通过交叉耦合在高阻带形成了一个传输零点,但零点的具体位置不能够精确设计。可以考虑交叉耦合矩阵理论实现传输零点的精确设计。这有待进一步改善与研究。

## 参考文献

- [1] 陈厚含,安澄全. 高性能微带带通滤波器的设计与研究[J]. 通讯世界, 2020, 27(4): 99-100.
- [2] 罗吕桅,叶强. C 波段 WLAN 通信系统高性能 LTCC 滤波器小型化设计[J]. 2018, 41(4): 941-944.
- [3] 王新,李其强,杨凯. Ku 频段梳状滤波器小型化设计[J]. 无线电工程, 2018, 48(7): 597-600.

- [4] 祝君豪,孟令琴,任龙. 基于共面波导的  $1/4$  波长 SIR 带通滤波器[J]. 电子测量技术, 2013, 36(6): 109-112.
- [5] 李力,年夫顺. 微波多层印制板带通滤波器[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(4): 63-65.
- [6] 杨永侠,王亚亚. 交叉耦合型滤波器的小型化设计及仿真[J]. 西安工业大学学报, 2013, 33(6): 499-504.
- [7] 谭小花,金宝龙,钱志芳,等. 微波滤波器小型化技术研究[J]. 舰船电子对抗, 2013, 36(1): 83-87.
- [8] 刘毅,戴永胜. 小型化高性能带状线型滤波器的研究[J]. 应用物理, 2016, 6(1): 7-14.
- [9] 王欢. 可控混合电磁耦合滤波器理论与实现[D]. 广东:华南理工大学, 2010.
- [10] 霍云峰. SIR 滤波器的研究与设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014.
- [11] 杨平,田建伟. 一种带传输零点交指带通滤波器的设计[J]. 舰船电子对抗, 2009, 32(4): 118-120.
- [12] 赵飞,党元兰,王璇. Ka 频段陶瓷基板微带带通滤波器设计分析[J]. 无线电工程, 2012, 42(3): 61-64.
- [13] 成彦. Ka 频段薄膜滤波器设计[J]. 电讯技术, 2012, 52(7): 1164-1168.
- [14] 张磊. 基于薄膜工艺的分布式滤波器的研究与设计[C]. 昆明:昆明理工大学, 2019.
- [15] 甘本波,吴万春. 现代微波滤波器的结构与[M]. 北京:科学出版社, 1964.
- [16] HONG J S, LANCASTER M J. Microstrip filters for RF/Microwave applications[M]. USA: John Wiley & Sons, 2004.
- [17] 王海苏. S 波段带通滤波器研究[C]. 成都:电子科技大学, 2016.

## 作者简介

唐陆瑶,在读研究生,主要研究方向为微波射频技术。

E-mail: 1715914830@qq.com

江肖力,研究员,主要研究方向为微波射频与小型化技术。

E-mail: 1750925863@qq.com

刘巍巍,高级工程师,主要研究方向为射频链路与微系统。

E-mail: hblw998@163.com