

基于枝节加载谐振器的新型三频带通滤波器设计

王旭光^{1,2}, 杨维明¹, 尤旭颖¹, 彭菊红¹, 曾张帆¹

(1. 湖北大学计算机与信息工程学院, 湖北武汉 430062; 2. 毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘 要: 提出了一种新型平面三频带通滤波器, 该滤波器由一个加载短路枝节的阶梯阻抗谐振器, 一对加载开路枝节的背靠背 E 型谐振器, 以及包含源负载直接耦合的馈电结构组成. 所采用的枝节加载谐振器的多模工作特性使滤波器的体积大大减小, 同时每个通带的位置及其耦合特性都能够独立调谐. 另外, 通过源负载直接耦合引入通带两侧的传输零点, 实现了滤波器良好的频率选择性. 最后设计并加工了一款高选择性小型化三频带通滤波器, 其三个通带的中心频率分别为 2.0GHz, 3.95GHz 和 6.35GHz, 插入损耗均小于 2.5dB, 带内回波损耗均优于 14dB, 实验结果与仿真结果吻合良好.

关键词: 微带带通滤波器; 三频带通滤波器; 枝节加载谐振器; 阶梯阻抗谐振器; 传输零点

中图分类号: TN713.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)04-0970-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.04.025

Design of a New Tri-Band Bandpass Filter Using Stub-Loaded Resonators

WANG Xu-guang^{1,2}, YANG Wei-ming¹, YOU Xu-ying¹, PENG Ju-hong¹, ZENG Zhang-fan¹

(1. School of Computer Science and Information Engineering, Hubei University, Wuhan, Hubei 430062, China;

2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: A new microstrip tri-band bandpass filter is presented. The filter is composed of a stepped-impedance resonator loaded with short stub, a pair of E-shape resonators loaded with open stub, and the external coupling structure with input/output direct-coupling. Due to the multi-mode characteristics of the resonators, the filter size can be significantly miniaturized, and each passband can be separately controlled. In addition, the proposed filter can generate six transmission zeros on both sides of each passband, resulting in improved frequency selectivity. Such a demonstrative tri-band bandpass filter with center frequencies of 2.0GHz, 3.95GHz and 6.35GHz were designed and fabricated. The measured results show that the insertion loss is less than 2.5dB, and the return loss is better than 14 dB for each passband, which is in agreement with the simulated ones.

Key words: microstrip bandpass filter; tri-band bandpass filter; stub-loaded resonator; stepped-impedance resonator; transmission zero

1 引言

多模多频无线通信系统的快速发展对射频前端结构提出了新的要求, 滤波器作为无线通信射频前端的关键器件, 目前对其具有多频带通频率响应特性的需求不断增加. 因此, 三通带滤波器的设计成为无线通信领域研究的热点之一, 得到越来越多的关注.

传统的三通带滤波器是将三组工作在不同频段的级联型滤波器并联, 共用输入输出耦合结构来实现^[1-3]. 虽然其具有设计容易, 结构简单的特点, 但由于

滤波器尺寸与谐振器的数量成正比, 因此此类滤波器的尺寸难以充分压缩, 并且插入损耗也较大. 为了克服传统设计方法的缺陷, 国内外许多专家学者进行了广泛的探索研究, 并提出了许多新型结构与设计方法. 文献[4]使用多个传输零点, 将一个宽通带分割成三个通带, 从而形成三通带滤波器, 但是这种设计方法很难实现各个通带中心频率的自由调谐; 文献[5]使用耦合互补开口环谐振器设计平衡三通带滤波器, 但其各通带的频率选择特性并不理想.

多模谐振器也被广泛应用于三通带滤波器的设

计:文献[6]使用三模谐振器并使其三个谐振频率分别形成三个通带;文献[7]通过可产生八个谐振点的多模谐振器实现了应用于5G和WiFi的三通带滤波器;文献[8~11]分别采用阶梯阻抗谐振器与枝节加载谐振器,通过调节各个谐振模式对应的频率,实现多个通带;文献[12]结合多个多模谐振器来构建三通带结构.此外,为了减小滤波器尺寸或者改善滤波器性能,设计中也可以采用一些特殊结构,例如缺陷式接地结构^[13],多模微带贴片谐振器结构^[14],以及复合左右手结构传输线^[15,16]等,这些方案会增加滤波器结构的复杂程度,而且在设计和调谐过程中比较难以控制,使得同时兼顾性能指标和小型化存在一定的困难.

本文提出了一种新型平面三频带通滤波器结构,采用一个加载短路枝节的阶梯阻抗(SIR)谐振器与一对加载开路枝节的背靠背E型谐振器,产生六个不同的谐振模式来实现滤波器的三个通带.通过奇偶模理论分析,每个谐振器均工作在双模模式,不仅大大减小了滤波器的体积,同时每个通带的位置(中心频率)及其耦合特性(带宽)都能够独立调谐.馈电结构包含输入输出直接耦合,使各通带的两侧都产生一对传输零点,实现了滤波器良好的频率选择性和带外抑制性能.最后成功设计并加工了一款高选择性小型化三频带通滤波器,该滤波器三个通带的中心频率分别为2.0GHz、3.95GHz和6.35GHz,插入损耗均小于2.5dB,带内回波损耗均大于14dB,实验结果和仿真结果吻合良好,从而验证了文中所提设计方法的有效性.

2 枝节加载谐振器特性分析

本文提出的新型三频带通滤波器拓扑结构如图1所示,是由多模谐振器和馈线组成.多模谐振器包含一个加载短路枝节的SIR谐振器(图中深灰色部分)和一对加载开路枝节的背靠背E型谐振器(图中浅灰色部分),短路枝节通过金属过孔接地(图中白色填充图形),馈线(图中黑色部分)的开路端通过弯曲折叠形成输入输出直接耦合. $L_i(i=1, \dots, 9)$ 分别表示第*i*段微带线的长度, $W_i(i=1, \dots, 7)$ 分别表示第*i*段微带线的宽度, $G_i(i=1, \dots, 5)$ 分别表示微带线之间的间距.由于该滤波器具有结构对称性,故可用奇偶模分析法对其谐振特性进行分析.

2.1 加载短路枝节的SIR谐振器分析

图2(a)为中心加载短路枝节的SIR谐振器的基本结构,是在一段阶梯阻抗线的中心位置加载长度为 L_3 ,宽度为 W_3 的短路枝节构成的.当奇模激励时,对称面可看作虚拟短路,等效为理想电壁,此时加载的短路枝节如同不存在,可得到图2(b)所示的奇模等效结构;当偶模激励时,对称面可视为虚拟开路,等效为理想磁壁,此

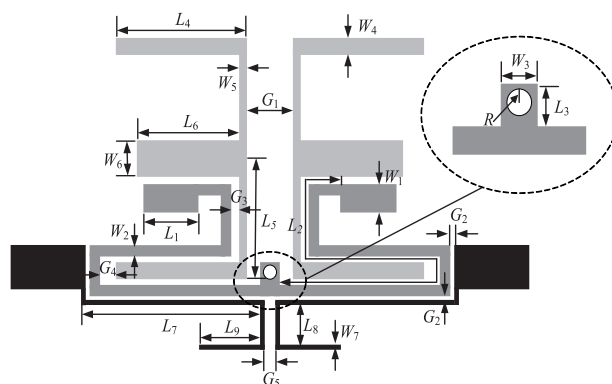


图1 基于枝节加载谐振器的三频带通滤波器结构图

时加载的短路枝节被等分,因此得到图2(c)所示的偶模等效结构.

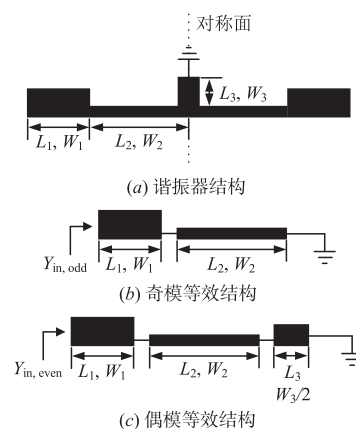


图2 加载短路枝节的SIR谐振器及其奇偶模等效结构

由此可知,其奇偶模等效结构均为终端短路的1/4波长SIR谐振器,都是由不同特性阻抗及不同长度的微带线组合而成.令 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别代表物理长度为 L_1, L_2, L_3 的三段传输线所对应的电长度, Y_1, Y_2 代表宽度为 W_1, W_2 的传输线的特性导纳.为设计方便,设定 $W_2 = W_3/2$,则根据传输线基本理论,通过分别求解奇偶模输入导纳 $Y_{in,odd}$ 与 $Y_{in,even}$,并令输入导纳等于0,即可求出奇模和偶模等效结构的谐振条件分别为式(1)和(2)^[17]:

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \tan\theta_1 \tan\theta_2 \quad (1)$$

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \tan\theta_1 \tan(\theta_2 + \theta_3) \quad (2)$$

因此,加载短路枝节的SIR谐振器工作于双模模式,可产生两个不同的谐振频率,分别为奇模谐振频率 f_{io} 和偶模谐振频率 f_{ie} .其中 f_{io} 仅由阶梯阻抗线的参数决定,与加载的短路枝节无关,短路枝节只能调节 f_{ie} .利用这一对谐振点可形成滤波器的第一个通带,由于改变阶梯阻抗线的长度(θ_1, θ_2)对 f_{io} 和 f_{ie} 均有影响,可以用来对第一个通带的中心频率进行整体调节;改变

加载的短路枝节线的长度 (θ_3) 可单独控制谐振频率 f_{1e} , 对 f_{1o} 没有影响, 因而可用来调节第一个通带的带宽; Y_2 与 Y_1 的比值, 则用来调节谐振器基模与高次模的间距, 进而将其杂散频率移动到三频带通滤波器的工作频带以外, 避免对通带形成干扰.

2.2 加载开路枝节的 E 型谐振器分析

中心加载开路枝节的 E 型谐振器结构如图 3(a) 所示, 其仍然具有对称性. 因此, 再次利用奇偶模分析法进行讨论, 可得到图 3(b) 与 (c) 所示的奇偶模等效结构. 假定 $W_4 = W_5 = W_6/2$, 则其对应的奇模谐振频率 f_{2o} 与偶模谐振频率 f_{2e} 可分别由式 (3) 和 (4) 计算得到^[18]:

$$f_{2o} = \frac{(2n-1)c}{4(L_4 + L_5)\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (3)$$

$$f_{2e} = \frac{nc}{2(L_4 + L_5 + L_6)\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (4)$$

其中, $n=1, 2, 3, \dots$, c 为自由空间的光速, ϵ_{eff} 为介质基板的有效介电常数. 由此可见, 奇模谐振频率 f_{2o} 不受开路枝节 L_6 的影响, L_6 可单独调节偶模谐振频率 f_{2e} , 同时在调节的过程中 f_{2o} 保持不变, 即奇偶模之间本身并没有耦合. 这种特性避免了奇偶模谐振之间的相互干扰, 可以准确得到奇偶模两个谐振频率, 当 $L_6 < L_4 + L_5$ 时 ($n=1$), 奇模谐振频率 f_{2o} 小于偶模谐振频率 f_{2e} .

结构上完全对称的两个 E 型谐振器, 显然可产生一共四个谐振频率, 分别记为 $f_{2o,1}$ 、 $f_{2e,1}$ 与 $f_{2o,2}$ 、 $f_{2e,2}$, 且其大小关系为 $f_{2o,1} = f_{2o,2} < f_{2e,1} = f_{2e,2}$. 如果将这样两个 E 型谐振器背靠背放置, 如图 1 中所示, 由于耦合的作用可使 $f_{2o,1}$ 与 $f_{2o,2}$ 分离, $f_{2e,1}$ 与 $f_{2e,2}$ 分离, 分别形成第二与第三通带. 通过调节 E 型谐振器的耦合间距 G_1 或者耦合长度 $2L_5$, 可以控制 $f_{2o,1}$ 与 $f_{2o,2}$ 、 $f_{2e,1}$ 与 $f_{2e,2}$ 的分离程度, 进而调节第二/三两个通带的带宽.

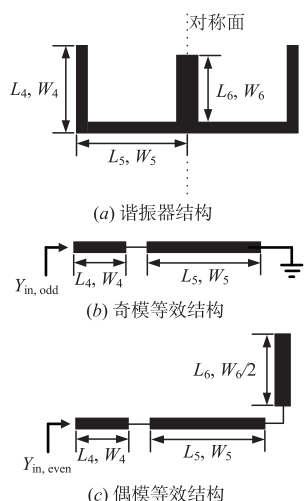


图3 加载开路枝节的E型谐振器及其奇偶模等效结构

3 三频带通滤波器的设计与仿真

3.1 初始设计

基于上述分析, 该滤波器的六个谐振模式均可等效为 $1/4$ 波长谐振器, 同时每个谐振模式都可以相对独立的进行调谐. 通过合理设计滤波器的结构参数, 使上述六个谐振模式每两个一组分离为三组, 即可形成三个通带.

滤波器的输入输出馈电结构如图 1 中所示, 采用的是一段开路端弯曲折叠的均匀阻抗线 (长度为 $L_7 + L_8 + L_9$, 宽度为 W_7) 连接在 50Ω 传输线上构成. 两条馈线通过长度为 L_8 的部分相互耦合, 从而使每个通带的两侧各形成一对传输零点. 源负载耦合强度由耦合长度 L_8 和耦合间隙 G_5 控制, 可用其调节传输零点所在频率. 设计中令通带外传输零点位于合理的位置上, 可使滤波器兼顾频率选择性与带外抑制能力.

图 4 为使用电磁仿真软件 HFSS 仿真得到的端口弱耦合情况下的传输响应曲线, 可以看出所形成的三个通带的基本趋势, 同时比较了有无输入输出直接耦合两种情况下的传输响应, 验证了传输零点产生的原因.

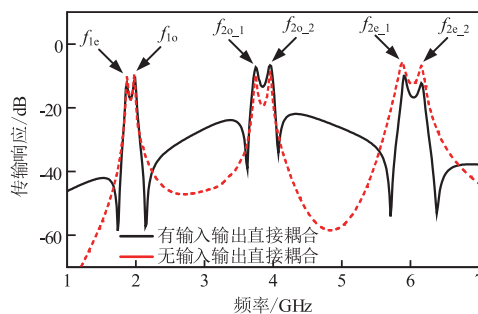


图4 弱耦合下三频带通滤波器的传输响应

图 5 分别给出了弱耦合情况下传输响应与滤波器结构参数 L_3 、 L_6 、 G_1 的关系, 从中可以得到以下结论.

(1) L_3 的变化只影响 f_{1e} , 对其他模式几乎没有影响. 如图 5(a) 所示, 随着 L_3 的增大, f_{1o} 基本不变, f_{1e} 逐渐左移, 使 f_{1o} 和 f_{1e} 的间距增大.

(2) L_6 的变化对 $f_{2e,1}$ 与 $f_{2e,2}$ 均有影响, 随着 L_6 的减小, $f_{2e,1}$ 与 $f_{2e,2}$ 同时增大, 但是其他四个谐振频率基本保持不变, 如图 5(b) 所示.

(3) G_1 的变化对 f_{1e} 和 f_{1o} 没有影响. 减小 G_1 , 将使背靠背放置的两个 E 型谐振器之间的耦合增强, 从而使 $f_{2o,1}$ 与 $f_{2o,2}$ 、 $f_{2e,1}$ 与 $f_{2e,2}$ 各自的分离程度增大, 如图 5(c) 所示.

综合以上分析可知, 本设计中滤波器三个通带的中心频率和带宽都是独立可控的: 第一通带的中心频率可以通过改变 L_1 和 L_2 的长度控制, 带宽则主要由短路枝节 L_3 的长度决定; 第二和第三通带的中心频率可以通过调节 E 型谐振器及开路枝节的长度来改变, 而其通带带宽主要受耦合间距 G_1 与耦合长度 $2L_5$ 的影响.

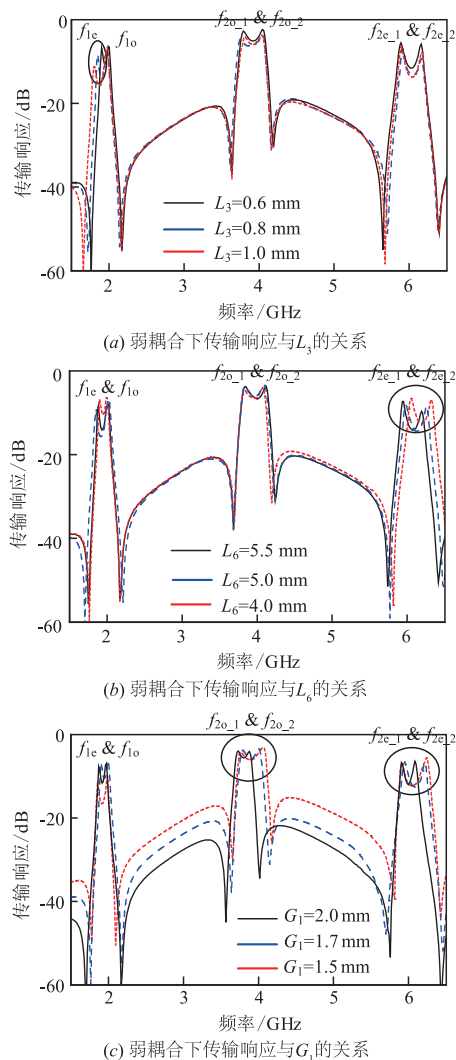


图5 弱耦合下传输响应与滤波器特定结构参数的关系

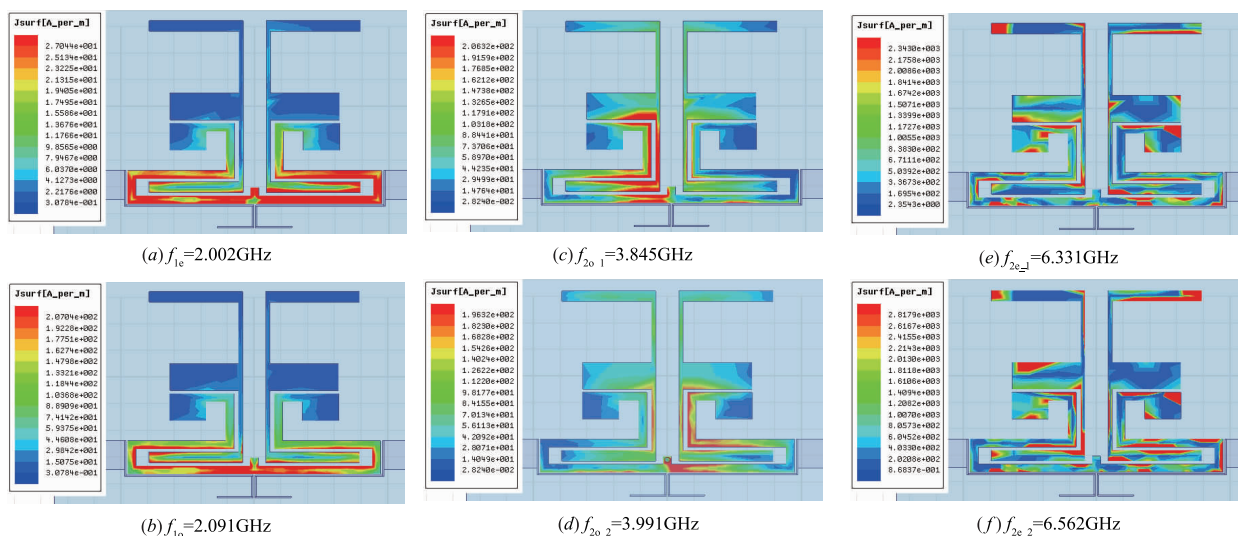


图6 各谐振频率对应的表面电流分布仿真结果

为了进一步验证以上分析内容,使用 HFSS 仿真研究了多模谐振器在各谐振频率下的表面电流分布情况,如图 6 所示. 其中,图 6(a)和(b)为两个较低频率处谐振器表面电流的分布情况,可以看出电流主要流经 SIR 谐振器,短路枝节对 f_{1c} 处的谐振有贡献,而对 f_{1o} 处的谐振不起作用,与奇偶模理论一致;图 6(c)和(d)中电流主要流经 E 型谐振器,并且该谐振器加载的开路枝节末端电流密度较小,说明开路枝节对奇模谐振 f_{2o_1} 与 f_{2o_2} 贡献不大;图 6(e)和(f)中表面电流仍然集中分布于 E 型谐振器,并且开路枝节末端也有电流分布,因此对应 f_{2e_1} 与 f_{2e_2} 这两个偶模谐振模式.

3.2 整体设计

通过以上对谐振特性的分析比较可知,文中所用两种谐振器的共同特点是枝节长度的改变仅使偶模谐振频率发生改变,奇模不受影响. 不同点在于加载短路枝节的 SIR 谐振器奇模谐振频率高于偶模,改变的是频率较低的模式,而 E 型谐振器偶模谐振频率高于奇模,改变的是频率较高的模式.

在上一小节初始结构参数的基础上,利用分布参数滤波器设计常用的耦合系数/外部品质因数法,设计了一款工作于 2.0GHz/3.9GHz/6.4GHz 的三频带通滤波器,其三个通带的相对带宽分别设定为 3%、2.5% 和 3%. 由滤波器理论可知,满足技术指标要求的各通带耦合系数 K_n 与外部品质因数 Q_{en} 可由下式计算得到^[19]:

$$K_n = \frac{FBW}{\sqrt{g_1 g_2}} \quad (5)$$

$$Q_{en} = \frac{g_0 g_1}{FBW} \quad (6)$$

式中, FBW 为相对带宽, $g_i (i=0, 1, 2)$ 为低通滤波器原型的归一化元件值. 本文设计采用纹波值为 0.01 dB 的切比雪夫低通原型, $g_0 = 1.0, g_1 = 1.3782, g_2 = 1.2693$, 因此可求得三个通带的耦合系数与外部 Q 值分别为: $K_1 = 0.023, Q_{e1} = 45.94$ (第一通带); $K_2 = 0.019, Q_{e2} = 55.13$ (第二通带); $K_3 = 0.023, Q_{e3} = 45.94$ (第三通带).

求出耦合系数与外部品质因数的理论值之后, 利用 HFSS 对各个谐振器进行全波仿真, 并通过下式提取实际耦合系数 k_n 与外部品质因数 $q_{en}^{[20]}$:

$$k_n = \frac{f_H^2 - f_L^2}{f_H^2 + f_L^2} \quad (7)$$

$$q_{en} = \frac{2f_0}{\Delta f_{3dB}} \quad (8)$$

式中, f_H 和 f_L 分别为每组两个谐振模式中较高与较低的谐振频率, f_0 为各个通带的中心频率, Δf_{3dB} 为各通带的 3dB 带宽.

通过调整各组谐振频率的分离程度, 以及端口馈线与谐振器之间的间距, 使提取参数与理论计算值相一致, 即可确定滤波器物理结构的具体尺寸. 图 7 给出了三频带通滤波器的整体等效拓扑电路, 图中圆圈代表谐振模式与源/负载, 每一通带均包含两个谐振模式; 线条代表耦合, 包括信号通路的主耦合与源负载之间的直接交叉耦合.

表 1 三频带通滤波器经优化后的结构参数

参数	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	R
数值 (mm)	2.70	25.50	0.60	7.00	6.42	5.43	9.55	1.70	2.60	2.00	0.60	1.20	0.80	0.80	1.60	0.10	1.75	0.50	0.35	1.00	0.85	0.20

4 实验验证

对仿真优化之后的三频带通滤波器进行了加工及测试, 加工后的滤波器实物如图 8 所示, 测试采用 Agilent 5071C 矢量网络分析仪. 图 9 给出了仿真结果和测试结果的对比情况, 除了第二第三通带的中心频率略有偏移外, 两者吻合良好, 频率偏移的原因可能是由加工误差引起的. 滤波器的实测中心频率分别为 2.0GHz, 3.95GHz 和 6.35GHz, 各通带相对带宽分别为 3.0%,

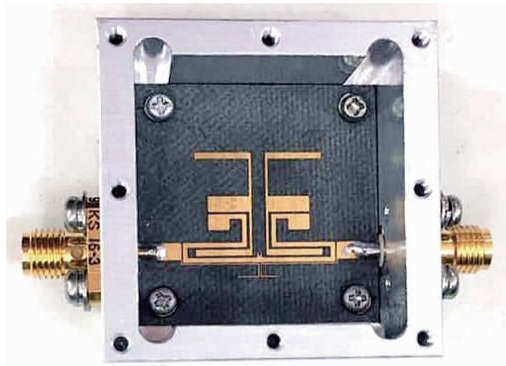


图8 滤波器加工实物图

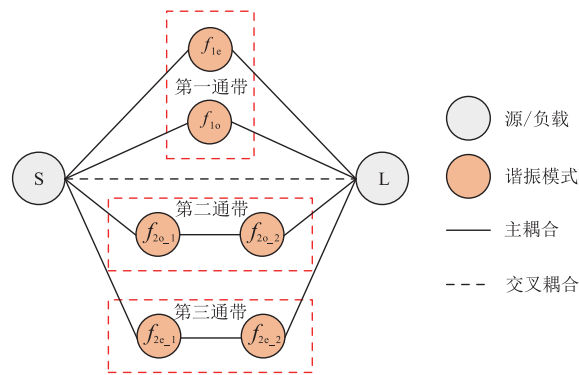


图7 三频带通滤波器的等效拓扑电路

3.3 仿真优化

最后使用 HFSS 对滤波器整体结构进行优化, 通过合理调节源负载直接耦合的强度使通带外传输零点位于合适的位置上, 从而兼顾滤波器的频率选择性和带外抑制性. 所用介质基板为 RogersRT/duroid5880, 其相对介电常数为 2.2, 厚度为 0.78mm, 表面敷铜厚度为 0.018mm, 得到的最终尺寸如表 1 所示. 不计馈线部分, 电路尺寸为 $18.95\text{mm} \times 13.69\text{mm}$, 即 $0.172\lambda_g \times 0.124\lambda_g$, 其中 λ_g 代表第一个通带中心频率对应的波长.

2.5% 和 3.1%, 带内插入损耗均小于 2.5dB, 带内回波损耗均大于 14dB. 位于各个通带两侧的六个传输零点使该滤波器具有良好的频率选择性, 相邻通带之间的带外抑制大于 20dB.

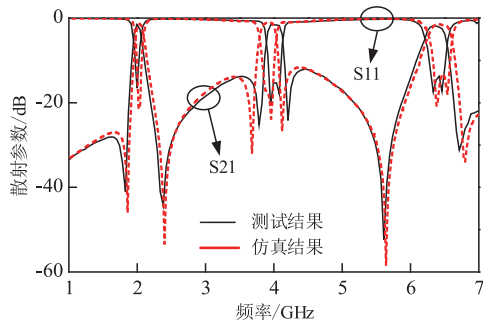


图9 三频带通滤波器的仿真与测试结果比较

5 结论

本文提出了一种基于短路枝节加载 SIR 谐振器与开路枝节加载 E 型谐振器的混合结构微带三频带通滤波器, 并利用奇偶模分析法对其谐振特性进行了分析研究. 由于谐振单元结构的特点, 本设计中三个通带的

中心频率和带宽独立可控,具有较强的设计灵活性,并且采用了带有源负载直接耦合的馈电结构,在每个通带两侧均引入一对传输零点,显著提高了滤波器的频率选择性.该滤波器结构简单紧凑,便于调节,具有广泛的工程应用价值.

参考文献

- [1] WU Hung-wei, JIAN Li-yi, CHEN yung-wei, SU Yan-kui. New triple-passband bandpass filter using multipath stub loaded resonators[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, 26(3): 186 – 188.
- [2] ZHOU Xiao-jun, ZHAO Yong-jiu, FU Yong, LIU Yan-yun. Compact dual-mode tri-band microstrip BPF with three sets of resonators[J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2012, 33(1): 47 – 54.
- [3] WENG Min-hang, WU Hung-wei, SHU Kevin, CHEN Jau-rung, YANG Ru-yuan, SU Yan-kuin. A novel triple-band bandpass filter using multilayer-based substrates for WiMAX[A]. *European Microwave Conference (EuMC) [C]*. US: IEEE, 2007. 325 – 328.
- [4] LUO Sha, ZHU Lei, SUN Sheng. Compact dual-mode tri-band bandpass filters using three pairs of degenerate modes in a ring resonator[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2011, 59(5): 1222 – 1229.
- [5] WEI Feng, QIN Pei-yuan, GUO Y Jay, DING Chen, SHI Xiao-wei. Compact balanced dual- and tri-band BPFs based on coupled complementary split-ring resonators (C-CSRR) [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, 26(2): 107 – 109.
- [6] MURMU Lakhindar, DAS Sushrut, BAGE Amit. A compact tri-band bandpass filter using multi-mode stub-loaded resonator [A]. *Asia-Pacific Microwave Conference (APMC) [C]*. New Delhi, India: IEEE, 2016. 1 – 4.
- [7] GAO Li, ZHANG Xiu-yin, XUE Quan. Compact tri-band bandpass filter using novel eight-mode resonator for 5G WiFi application[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, 25(10): 660 – 662.
- [8] 张德伟, 王树兴, 刘庆, 周东方, 张毅, 吕大龙, 吴瑛. 基于奇偶模分析法的四模谐振器结构的双通带带通滤波器设计[J]. *电子学报*, 2018, 46(2): 387 – 392.
ZHANG De-wei, WANG Shu-xing, LIU Qing, ZHOU Dong-fang, ZHANG Yi, LU Da-long, WU Ying. The design of dual band bandpass filter using novel quadruple mode resonator based on odd and even mode method[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(2): 387 – 392. (in Chinese)
- [9] LIU Hai-wen, SONG Yi, REN Bao-ping, WEN Pin, GUAN Xue-hui, XU He-xiu. Balanced tri-band bandpass filter design using octo-section stepped-impedance ring resonator with open stubs[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(10): 912 – 914.
- [10] LAN Siang-wen, WENG Min-hang, CHANG Shou-jinn, HUNG Cheng-yuan, LIU Shih-kun. A tri-band bandpass filter with wide stopband using asymmetric stub-loaded resonators[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, 25(1): 19 – 21.
- [11] GAO Li, ZHANG Xiu-yin, ZHAO Xiao-lan, ZHANG Yao, XU Jin-xu. Novel compact quad-band bandpass filter with controllable frequencies and bandwidths [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, 26(6): 395 – 397.
- [12] XU Jin. Compact microstrip tri-band bandpass filter using new stubs loaded stepped-impedance resonator [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, 26(4): 249 – 251.
- [13] LAI Xin, LIANG Chang-hong, DI Hao, WU Bian. Design of tri-band filter based on stub loaded resonator and DGS resonator[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2010, 20(5): 265 – 267.
- [14] 王树兴, 吴瑛, 周东方, 张德伟, 张毅. 基于微带贴片谐振器的高选择性双模双通带带通滤波器的研究[J]. *电子学报*, 2018, 46(3): 595 – 601.
WANG Shu-xing, WU Ying, ZHOU Dong-fang, ZHANG De-wei, ZHANG Yi. Study of high-selectivity dual-mode dual-band bandpass filters based on microstrip patch resonator[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(3): 595 – 601. (in Chinese)
- [15] 赵晖, 崔铁军. 基片集成波导中的混合左右手结构及其应用[J]. *电子学报*, 2007, 35(6A): 108 – 111.
ZHAO Hui, CUI Tie-jun. Composite right/left handed structure realized by substrate integrated waveguide and its applications[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6A): 108 – 111. (in Chinese)
- [16] SHEN Guang-xu, CHE Wen-quan, XUE Quan. Novel tri-band bandpass filter with independently controllable frequencies, bandwidths, and return losses [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(6): 560 – 562.
- [17] MAKIMOTO Mitsuo, YAMASHITA Sadahiko. *Micro-wave Resonators and Filters for Wireless Communication [M]*. Berlin: Springer, 2000. 11 – 18.
- [18] ZHANG Xiu-yin, CHEN Jian-xin, XUE Quan, LI Si-min. Dual-band bandpass filters using stub-loaded resonators [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, 17(8): 583 – 585.
- [19] 周春霞, 夏侯海, 左涛, 何明, 赵新杰, 方兰, 阎少林. 自均衡双通带微带滤波器综合与设计[J]. *电子学报*, 2009, 37(12): 2783 – 2786.

ZHOU Chun-xia, XIA Hou-hai, ZUO Tao, HE Ming, ZHAO Xin-jie, FANG Lan, YAN Shao-lin. Synthesis and design of self-equalized dual passband filters [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2783 - 2786. (in Chi-

nese)

[20] Hong J S. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, 2nd ed[M]. New York: Wiley, 2011.

作者简介



王旭光 男, 1982 年出生于山西长治, 博士, 现为湖北大学计算机与信息工程学院副教授, 主要研究方向为微波射频电路理论与器件设计.

E-mail: wangxg@hubu.edu.cn



杨维明(通信作者) 男, 1969 年出生于湖北赤壁, 博士, 教授, 主要研究方向为微波器件与微波电路等.

E-mail: 20040416@hubu.edu.cn