

文章编号: 2095-4980(2020)06-1030-05

基于多向馈电耦合的折叠小型化三带通滤波器

沈笛宇, 王 虹, 张光锋, 刘国庆

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 基于奇偶模理论, 通过多向馈电耦合的方式, 在十字形双频带通滤波器(DBPF)的基础上, 研究并设计了一种十字形枝节折叠的双馈线三通带通滤波器(TBPF)模型。结构分析表明, 该模型具有三频中心频率灵活独立可调, 结构易级联, 小型化和频率设计参量少的特点。仿真结果表明, 增加的馈电方向激励起滤波器的第三通带, 设计的 TBPF 在 5G 通信的中低频段和室内 WiFi 低频段具有良好的特性。文献比较显示, 提出采用的多向馈电设计方法, 减少了谐振器结构复杂度和频率设计参数个数, 同时, 该法对基础谐振器通带频段的增加有一定启示意义。

关键词: 奇偶模理论; 多向馈电耦合; 三带通滤波器; 小型化

中图分类号: TN713

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019273

Miniaturized folded tri-band bandpass filter based on multidirectional-feed coupling

SHEN Diyu, WANG Hong, ZHANG Guangfeng, LIU Guoqing

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: Based on odd-even mode theory and multidirectional-feed coupling, a cross-shaped new structure Tri-band Band-Pass Filter(TBPF) with folded stub is studied and designed on the basis of cross-shaped Dual-band Band-Pass Filter(DBPF). The structure analysis shows that the TBPF based on multidirectional-feed has the characteristics of flexible and independent adjustment at the three center frequencies, easy cascade structure, miniaturization and less frequency design parameters. The simulation results show that the added feed-direction excites the third passband of the filter. The designed TBPF has good performance in 5G medium-low frequency band and Indoor WiFi band. Literature comparison shows that the proposed multi-directional feed design method reduces the structure complexity and the number of frequency design parameters of the resonator. Meantime, this method can provide reference for increasing passband numbers of the basic resonator.

Keywords: odd-even mode theory; multidirectional-feed coupling; Tri-band Band-Pass Filter; miniaturization

随着通信技术的发展, 通信频段被划分得越来越细, 这要求各类发射接收器件具有多频段接发能力。多频段带通滤波器作为其中举足轻重的一部分, 正成为相关领域研究和设计的热点。随着 5G 技术中低试验频段^[1-4](3.3~3.6 GHz, 4.8~5 GHz)的提出, 多频滤波器又获得了极大的应用空间。其中, 三通带通滤波器(TBPF)具有多频可选择特性, 在频率选择日益苛刻和多样化的将来占有重要地位。

多数文献中, TBPF 都以多模谐振器^[5]或组合谐振器的方式设计及实现。文献[6]利用阶跃阻抗半波长谐振环并联普通谐振器组成 TBPF, 实现三频段灵活调节, 但基本单元较多, 面积利用率不高; 文献[7-8]采用阶跃阻抗环形谐振器上添加开路枝节的方式, 运用多模理论设计了一款平衡 TBPF, 具有良好的共模抑制特性和合适的传输零点, 但频率设计的结构变量和自由度过多; 文献[9]采用非对称十字形结构设计了小型化 TBPF, 实现带宽

收稿日期: 2019-07-27; 修回日期: 2019-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61371038); 近程高速目标探测技术国防重点学科实验室开放基金资助项目(30918014106)

作者简介: 沈笛宇(1994-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波毫米波器件。email: Caesar_SH@163.com

可调和零点可选择,但同样的,结构和频率设计参量较多,设计较为复杂。

本文首先运用奇偶模理论,分析了十字形结构滤波器及其双频段带通特性。在此基础上,借助双馈线在不同位置耦合馈电形成多向激励的方式,获得其三频段通带特性;接着对结构进行折叠小型化,获得谐振器模型。仿真结果表明,该基于多向馈电耦合的 TBPF 具有三频段中心频率灵活独立可调、结构易级联、小型化的特点,在 5G 中低频段(3.3~3.6 GHz,4.8~5 GHz)和室内 WiFi 频段(2.45 GHz)具有良好的特性。

1 结构模型及原理分析

1.1 基本结构奇偶模分析

图 1 为十字形基本模型和对应奇偶模模型。根据传输线定理及现有的资料^[10-12]对其进行计算分析,可得前 2 个谐振模式对应的输入导纳:

$$Y_{oi} = -jY_1 \cot \theta_1 \tag{1}$$

$$Y_{ei} = \frac{Y_1(Y_1 \tan \theta_1 + Y_2 \tan \theta_2)}{Y_1 - Y_2 \tan \theta_1 \tan \theta_2} \tag{2}$$

式中: Y_{oi} 为奇模导纳; Y_{ei} 为偶模导纳; θ_1, θ_2 为谐振臂 1,2 的电长度; L_1, L_2 为谐振臂 1,2 的实际长度; Y_1, Y_2 为谐振臂 1,2 的特性导纳。

根据输入导纳 $Y_{oi}=Y_{ei}=Y_{in}=0$ 时谐振,可见式(1)~(2)各存在一个基本谐振频率电长度,即 $\theta_1=\pi/2$, $\theta_2=\arctan(Y_1/Y_2 \times \tan \theta_1)$,与双臂电长度和导纳有关。当双臂长 L_1, L_2 为谐振 θ_1, θ_2 下频率对应的 1/4 波长时,可得其对应的基本谐振频率 f_1, f_2 。该模型为基本的双频谐振器,通过级联耦合可构成双通带带通滤波器(DBPF)。

1.2 多方向馈电结构三频分析

据所知的文献描述,奇偶模法分析谐振器,通常是将谐振器的一端作为输入,得到此端口方向下的奇偶模谐振频率。将结构扩展到多频,一般是通过提高结构复杂性来添加自由变量,从而增加谐振频率;或采用高阶谐波谐振频率的方式。但这样势必会增加结构设计复杂度或频率约束度。

为了在不增加结构复杂度的基础上获得多频特性,根据十字形结构双向对称的特点,本文提出采用多向馈电法激发谐振器不同端口方向的奇偶模谐振频率,以达到增加谐振器谐振频率的目的,从而将 1.1 节所述双频特性改变为三频。

由于十字形谐振器结构的双向对称性,由图 2 可见,当馈电位置位于不同谐振器枝节时,其奇偶模等效电路形式上相同,但参数不同。图 2(b)可由式(1)~(2)得其奇偶模导纳,图 2(c)两谐振模式导纳求法与之类似,同样有

$$Y_{oi2} = -jY_2 \cot \theta_2 \tag{3}$$

$$Y_{ei2} = \frac{Y_2(Y_2 \tan \theta_2 + Y_1 \tan \theta_1)}{Y_2 - Y_1 \tan \theta_2 \tan \theta_1} \tag{4}$$

可以看到,式(2)和式(4)具有相同的分子部分零点,因此图 2(b)和图 2(c)具有相同的偶模谐振,即馈电同时加在十字形谐振器 2 个谐振枝节端时,一共产生 3 个不同的谐振频率。结合 1.1 节分析,归纳得

$$f_1 = c / (4L_1 \sqrt{\epsilon_e}) \tag{5}$$

$$\tan \left(\frac{f_2}{f_1} \theta_{11} \right) + G_y \tan \left(\frac{f_2}{f_1} \theta_{12} \right) = 0 \tag{6}$$

$$f_3 = c / (4L_2 \sqrt{\epsilon_e}) \tag{7}$$

式中: f_1 为馈电方向 1 下奇模第一频率(L_1 长度为其 1/4 导波波长),并且作为基准频率; f_3 为馈电 2 下奇模第一频率; f_2 为共同的偶模第一频率; θ_{11} 为 L_1 在 f_1 下电长度,取 $\pi/2$; θ_{12} 为 L_2 在 f_1 基频下的电长度; $G_y=Y_2/Y_1$ 为导纳比; c 为真空光速; ϵ_e 为等效介电常数。

其中,式(6)由式(2)、式(4)分子零点公式变形而来,将式(5)、式(7)代入式(6):

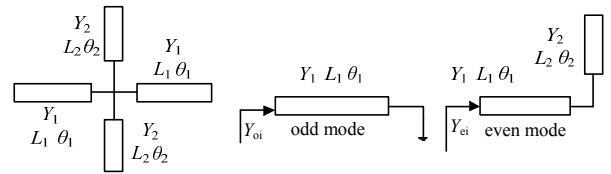


Fig.1 Cross resonator model and odd-even mode structure
图 1 十字形谐振器模型及奇偶模结构

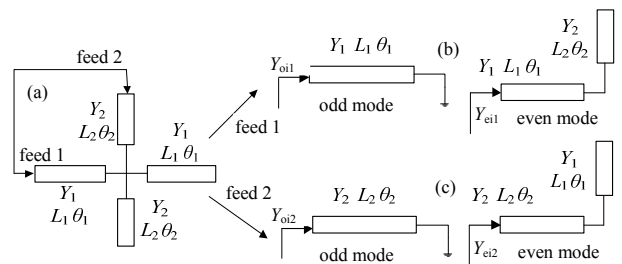


Fig.2 Multidirectional feed coupling model and odd-even mode structure
图 2 多向馈电耦合模型及奇偶模结构

$$\tan\left(\frac{f_2}{f_1} \times \frac{\pi}{2}\right) + G_y \tan\left(\frac{f_2}{f_3} \times \frac{\pi}{2}\right) = 0 \tag{8}$$

由此可见，三频频率 f_1, f_2, f_3 具有 3 个自由度，即 L_1, L_2, G_y 。 L_1, L_2 单独确定 f_1, f_3 ，同时 G_y 调节 f_2 。与原基本双频结构比较发现，引入多向馈电在不改变双频结构复杂度和频率设计参量数目的情况下(同样是 $L_1, L_2, G_y=Y_2/Y_1$)，增加了一个基本谐振频率。与一般三频谐振器在频率设计方面存在过多设计自由参量相比，大大简化了结构和设计过程。

1.3 三频滤波器设计方法

依据上述馈电模型及分析，一般 TBPf 设计方法可总结为：

1) 根据设计目标确定中心频率 f_1, f_2, f_3 ($f_1 < f_2 < f_3$)；

根据式(5)、式(7)取 L_1, L_2 为 f_1, f_3 频率下 1/4 波长。

2) 将频率变量代入式(8)，得

$$G_y = \frac{-\tan\left(\frac{f_2}{f_1} \times \frac{\pi}{2}\right)}{\tan\left(\frac{f_2}{f_3} \times \frac{\pi}{2}\right)} = \frac{-\tan\left(\frac{f_2}{f_1} \times \frac{\pi}{2}\right)}{\tan\left(\frac{f_2}{f_1} \times \frac{f_1}{f_3} \times \frac{\pi}{2}\right)} \tag{9}$$

选择合适的枝节阻抗 Z_1 ，通过 G_y 再确定 Z_2 。步骤 2) 可由图 3 所示简化。

3) 对谐振器进行折叠以促成小型化。调节谐振器之间的级联耦合关系、双馈线的馈电方向与馈电耦合的大小，以得到合适的通带带宽和带内平坦度。达到 TBPf 设计目标。

2 多馈线三频滤波器设计与仿真

本文采用图 2(a)为基础结构模型的新型枝节折叠谐振器，如图 4 所示，将十字形长臂通过金属过孔垂直折叠^[13]到底面，底面导带与地由缝隙 s_2 隔离，并将其余结构适当弯折，促成小型化同时易于级联。然后进行二级级联，并将两馈线分别耦合在谐振器两臂周边，形成多向馈电。

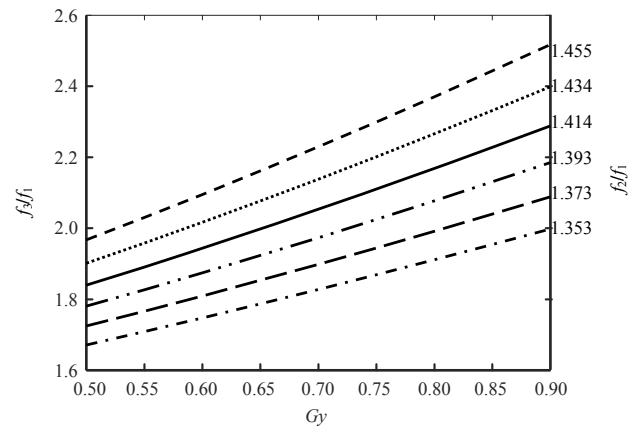


Fig.3 Relation of three center frequencies and admittance ratio
图 3 三频与导纳比关系图

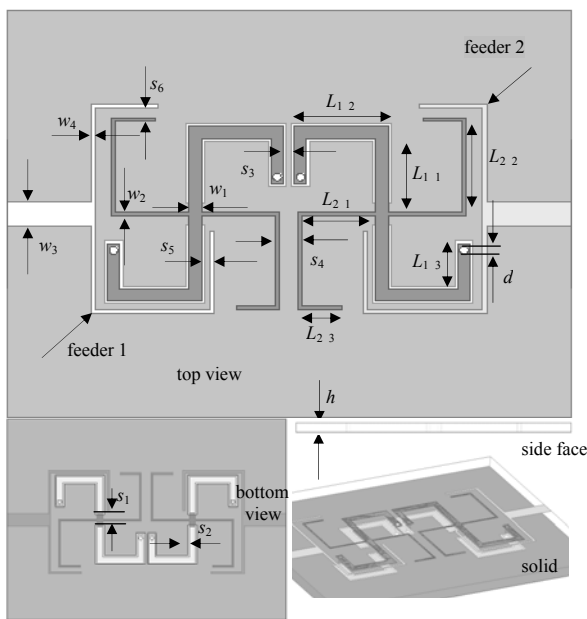


Fig.4 Model of designed TBPf
图 4 设计的 TBPf 结构模型图

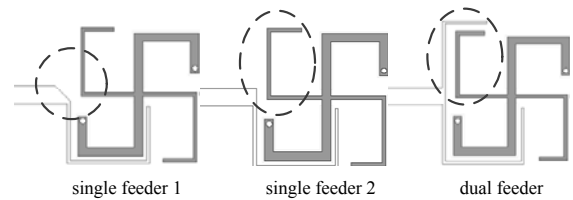


Fig.5 Coupled feeding model of single and double feedlines
图 5 单、双馈线耦合馈电模型

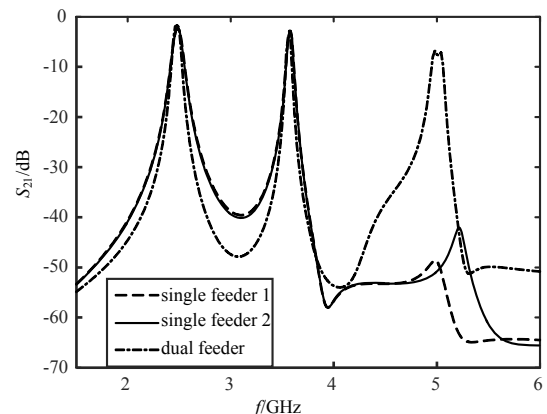


Fig.6 Passband characteristics of coupled feeding with single and double feedlines
图 6 单、双馈线耦合馈电通带特性

对图 4 馈电耦合部分采用单馈线耦合和双馈线耦合(即单、双向馈电,如图 5 所示),比较后发现,通过增加耦合馈线使其增加了一个馈电耦合方向,滤波器相应增加了一个基础谐振频率,即第三通带的产生,且耦合越大,第三通带特性峰值也越高, S 参数特性如图 6 所示。这与 1.2 节所述相符,因此本文采取双馈线馈电方法。

在谐振臂 1,2 长度不变时,对图 4 中谐振臂 2 宽度 w_2 变化(即导纳比 G_y 变化)进行仿真,结果如图 7 所示。可见通带 1 和通带 3 中心频率基本不受 w_2 大小影响(通带 3 中心频率略微偏移是因为 w_2 变化时,导致谐振器级间耦合大小略有变化引起),而通带 2 中心频率随 w_2 变大(相应地该臂特性导纳变大)而变低,仿真结果与 1.3 节关于谐振器两臂导纳比变化的推论基本相符。

设计一个工作中心频率在室内 WiFi(2.44 GHz), 5G 试验频段(3.45 GHz 和 4.9 GHz)的 TBPF。采用 Rogers RO3006 材料作为介质基板($\epsilon_r=6.15$, 介质损耗为 0.002 5, 厚度 $h=0.64$ mm), 由 1.3 节的设计过程, 得 $L_1=15.28$ mm, $L_2=7.58$ mm, $f_2/f_1=1.414$, $f_3/f_2=2.008$, 由图 3 得 $G_y=0.66$, 取合适的阻抗关系 $Z_1=70 \Omega$, $Z_2=106 \Omega$, 对应微带线宽度 $w_1=0.44$ mm, $w_2=0.12$ mm。

采用高频电磁仿真软件 HFSS 进行仿真, 将上述参数代入图 4, $L_1=2(L_{1_1}+L_{1_2}+L_{1_3})+h-s_1/2$, $L_2=L_{2_1}+L_{2_2}+L_{2_3}$, 由于谐振臂弯折和级间耦合带来的频率略微偏移, 经过部分长度和宽度的优化调整, 并取其参数(单位 mm): $L_{11}=3$, $L_{12}=2.9$, $L_{13}=2$, $L_{21}=2.88$, $L_{22}=3.58$, $L_{23}=1.7$, $s_1=1$, $s_2=0.1$, $s_3=0.38$, $s_4=0.51$, $s_5=0.18$, $s_6=0.28$, $w_3=0.91$, $w_4=0.15$, $d=0.3$ 。 S 参数仿真结果如图 8 所示。可见三频中心频率分别在 2.45 GHz, 3.46 GHz, 4.92 GHz; 插入损耗为 1.9 dB, 2.1 dB, 2.3 dB, 基本满足设计频率要求。带宽还可以通过 s_3, s_4 调节, 即调节级间耦合系数大小, 本文不作详述。

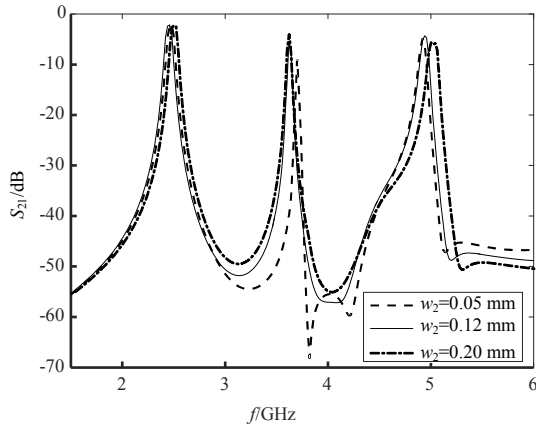


Fig. 7 Passband characteristics with width w_2 (admittance ratio G_y)
图 7 通带特性随宽度 w_2 (即导纳比 G_y)变化图

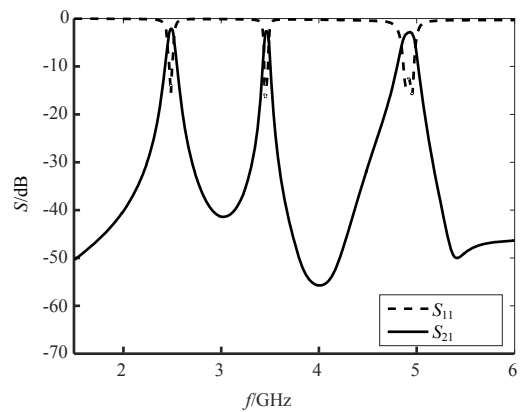


Fig. 8 S-parameter of TBPF simulation
图 8 TBPF 仿真 S 参数特性图

表 1 给出了本文和文献所述各 TBPF 结构在频率设计上的参数变量个数和尺寸大小。

表 1 各 TBPF 结构自由变量和尺寸大小

Table 1 Number of free variables and size of unit for each TBPF structure

| literature | number of parameter variables | number of cascaded units | total size: $\lambda_g \times \lambda_g$ | |
|------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| | | | (λ_g is the waveguide wavelength of the lowest central frequency) | average size of unit: λ_g^2 |
| Ref. [5] | 6 | 2 | 0.126×0.161 | 0.010 1 |
| Ref. [6] | 5 | 2 | 0.278×0.446 | 0.062 0 |
| Ref. [7] | 7 | 2 | 0.275×0.285 | 0.039 2 |
| Ref. [8] | 6 | 1 | 0.270×0.270 | 0.072 9 |
| Ref. [9] | 6 | 2 | 0.580×0.190 | 0.055 1 |
| Ref. [10] | 4 | 2 | 0.200×0.180 | 0.018 0 |
| this paper | 3 | 2 | 0.217×0.115 | 0.012 5 |

由表 1 可见, 本文采用的方法在达到设计小型化的同时大大减少了频率设计上的参数变量个数(本文为 L_1, L_2, G_y 3 个参量), 有助于简化设计。

3 结论

本文基于十字形谐振器奇偶模双频特性, 通过多向馈电耦合理论, 在不增加结构复杂性和频率设计中参数变量的情况下, 采用双馈线多方向馈电耦合 TBPF 模型, 并通过折叠实现小型化。仿真结果显示, 通过有目的增加

馈电耦合方向,能激发滤波器另一个基础谐振通带频率。设计案例和文献比较结果表明,所采用的方法能够较好地满足设计频率要求,且在小型化的同时减少了频率设计中的参数变量个数。该方法借助多馈线布置达成多向馈电,结构简单,易调节,为多频带通滤波器设计中减少参数变量,增加通带频段提供了一种新的设计思路。

参考文献:

- [1] 张磊,邢孟江,李小珍,等. 一种基于 IPD 工艺应用于 5G 网络的带通滤波器设计[J]. 通信技术, 2017,50(12):2875–2878. (ZHANG Lei,XING Mengjiang,LI Xiaozhen,et al. Design of band-pass filter based on IPD process for 5G network[J]. Communications Technology, 2017,50(12):2875–2878.)
- [2] 黄昆,王雄师,黄明富,等. 一种 5G 通信用 LTCC 低通滤波器的设计与实现[J]. 电子元件与信息技术, 2018(8): 108–111. (HUANG Kun,WANG Xiongshi,HUANG Mingfu,et al. Design and implementation of a LTCC Low-Pass Filter for 5G communication[J]. Electronic Component and Information Technology, 2018(8):108–111.)
- [3] 刘灿邦. 5G 试验频谱落地 我们还有哪些期待? [N]. 证券时报, 2018–12–08. (LIU Canbang. What expectations do we have for the 5G test spectrum to fall?[N]. Securities Times, 2018–12–08.)
- [4] 肖俊清. 5G:如何把握万物互联的投资机会[J]. 股市动态分析, 2018(37):7–9. (XIAO Junqing. 5G:How to seize the investment opportunities of interconnection?[J]. Stock Market Trend Analysis Weekly, 2018(37):7–9.)
- [5] 王菲,陈海华,胡方靖,等. 基于多模谐振器的三通带滤波器的设计[J]. 电子元件与材料, 2017,36(5):72–76,99. (WANG Fei,CHEN Haihua,HU Fangjing,et al. Design of a tri-band bandpass filter based on a multiple-mode resonator[J]. Electronic Components and Materials, 2017,36(5):72–76,99.)
- [6] MISHRA S,BHARTI G D. Compact design of triple band band-pass filter using resonant junctions[C]// 2017 International Conference on Innovations in Information,Embedded and Communication Systems. Coimbatore,India:IEEE, 2017:1–5.
- [7] LIU H,SONG Y,REN B,et al. Balanced tri-band bandpass filter design using octo-section stepped-impedance ring resonator with open stubs[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2017,27(10):912–914.
- [8] LU H,XIE T,YUAN N,et al. Compact tri-band bandpass filter designed using stub-loaded stepped-impedance resonator[C]// 2017 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication. Macau,China:IEEE, 2017:41–44.
- [9] ZHANG S X,CHEN Z H,CHU Q X. Design of tri-band balanced bandpass filter with controllable frequencies and bandwidths[C]// 2017 IEEE MTT–S International Microwave Symposium(IMS). Honolulu,HI,USA:IEEE, 2017:1823–1825.
- [10] 褚庆昕,涂治红,陈付昌,等. 新型微波滤波器的理论与设计[M]. 北京:科学出版社, 2016. (CHU Qingxin,TU Zhihong, CHEN Fuchang,et al. Theory and design of new microwave filter[M]. Beijing:Science Press, 2016.)
- [11] 张友俊,张颖. 新型通带可控低损耗小型四频带通滤波器设计[J]. 微波学报, 2017,33(6):35–38. (ZHANG Youjun, ZHANG Ying. Design of novel quad-band bandpass filter with controllable passband and low loss[J]. Journal of Microwaves, 2017,33(6):35–38.)
- [12] 张威,叶龙芳,许雄,等. X 波段阶梯阻抗微带带通滤波器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(4):668–671. (ZHANG Wei,YE Longfang,XU Xiong,et al. Design of multi-mode microstrip bandpass filter using stepped impedance resonator at X-band[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(4):668–671.)
- [13] OH S,CHOI J,SHIN B,et al. Bandpass filter design based on vertical split-ring resonators[J]. Electronics Letters, 2017, 53(21):1412–1414.