



Lowpass Filter with Wide Stopband Based on T-Shaped Resonator Loaded Step-Impedance Hairpin Resonator

Zhong Lunjie, Zuo Qiliang, Xu Jinping*

State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, China

Email address:

220170647@seu.edu.cn (Zhong Lunjie), 220160639@seu.edu.cn (Zuo Qiliang), jpxu@seu.edu.cn (Xu Jinping)

*Corresponding author

To cite this article:

Zhong Lunjie, Zuo Qiliang, Xu Jinping. Lowpass Filter with Wide Stopband Based on T-Shaped Resonator Loaded Step-Impedance Hairpin Resonator. *Science Discovery*. Vol. 7, No. 1, 2019, pp. 45-49. doi: 10.11648/j.sd.20190701.20

Received: April 19, 2019; Accepted: May 20, 2019; Published: May 23, 2019

Abstract: A lowpass filter with wide stopband based on stepped impedance hairpin resonator is proposed. Multiple transmission zeros are created in the stopband region by different size T-shaped resonator to achieve wide stopband. A lowpass filter with 3dB cutoff frequency (f_c) at 3.2GHz is designed, simulated and fabricated. Experimental results indicate that stopband can be extended to more than $7f_c$ with a rejection level of 20dB after loading T-shaped resonator. The insertion loss is lower than 0.4dB and return loss is better than 16dB in the passband. Excluding the feed lines, the size of the filter is less than $0.26\lambda_g \times 0.06\lambda_g$. The modified filter is of good value in engineering application for its small size, sharp cutoff frequency response and wide stopband.

Keywords: Hairpin Resonator, T-shaped Resonator, Lowpass Filter, Wide Stopband

加载T形单元的阶梯阻抗发卡谐振器宽阻带低通滤波器

钟伦杰, 左琪良, 徐金平*

东南大学毫米波国家重点实验室, 南京, 中国

邮箱

220170647@seu.edu.cn (钟伦杰), 220160639@seu.edu.cn (左琪良), jpxu@seu.edu.cn (徐金平)

摘要: 本文提出了一种基于阶梯阻抗发卡谐振器的宽阻带低通滤波器。通过加载不同尺寸T形谐振单元, 在阻带内引入了多个传输零点, 从而实现滤波器的宽阻带范围。仿真设计并加工制作了3dB截止频率(f_c)为3.2GHz的低通滤波器。实测结果表明, 加载T形谐振单元后滤波器的阻带范围延拓至 $7f_c$ 以上, 抑制度优于20dB, 通带内的插入损耗小于0.4dB, 回波损耗优于16dB。不考虑馈线长度, 整个滤波器的尺寸小于 $0.26\lambda_g \times 0.06\lambda_g$ 。改进后的滤波器体积小, 截止特性陡峭, 阻带宽, 具有较高的工程实用价值。

关键词: 发卡谐振器, T形谐振单元, 低通滤波器, 宽阻带

1. 引言

无线通信系统的广泛应用是当今信息化社会发展的重要基础。在常见的超外差接收机系统中, 接收到的

高频信号通常会经过多次变频变换到中频进行数字信号处理, 一个性能优异, 体积小, 低通滤波器能够很好的抑制来自高频信号的干扰, 保证中频信号的质量, 提高接收机的灵敏度。已经有众多学者进行了低通滤波器

的研究[1-9]。常用的低通滤波器有阶跃阻抗滤波器和短截线低通滤波器，但是它们都存在体积较大，截止特性不陡峭等缺点，因此限制了它们在射频系统中的应用。Lung-Hua Hsieh 等人提出了一种新颖的阶梯阻抗发卡谐振器低通滤波器结构[2]。该滤波器尺寸小，容易制造，同时具有陡峭的截止频率响应特性，但是滤波器的阻带较窄。工程中常常通过增加谐振器的阶数来拓宽发卡型低通滤波器的阻带[5-6]，这种方法会显著增加插入损耗和滤波器体积。部分低通滤波器通过增加谐振单元可以拓宽滤波器阻带[7-9]，但从结果看出阻带增加有限仍无法满足宽阻带的工程要求。因此研究宽阻带的高性能低通滤波器具有重要意义。

本文在阶梯阻抗发卡低通滤波器的结构基础上，增加了 T 形谐振单元，优化谐振单元位置，引入带外传输零点，极大拓展了滤波器的阻带，同时对滤波器体积和截止特性影响较小，具有工程实用价值。

2. 基于阶梯阻抗发卡谐振器的低通滤波器

阶梯阻抗发卡谐振器结构简单，原理清晰，调整方便，通过选择不同材料的基片可以工作在不同的射频频率范围内，因此在实际工程中被广泛的应用于微带低通滤波器、带通滤波器[10]、振荡器和混频器中[11]。

2.1. 阶梯阻抗发卡谐振单元的谐振条件分析

阶梯阻抗发卡型谐振器的结构如图 1 所示，图 2 同时显示其等效电路[7]，这种谐振器可以将其视作单一传输线和终端开路的平行耦合线并联来分析。

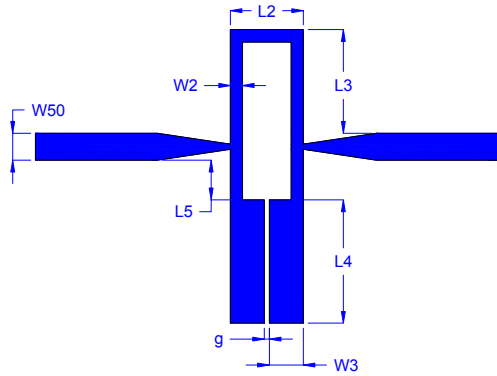


图1 阶梯阻抗发卡谐振器的结构。

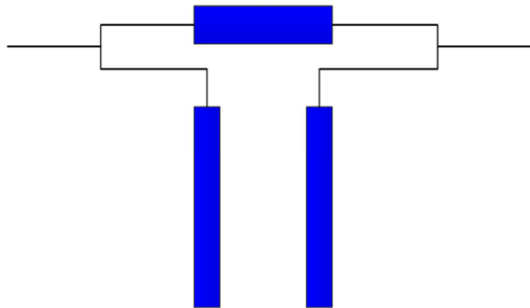


图2 阶梯阻抗发卡谐振器的等效电路。

平行耦合线的奇偶模阻抗和对应的耦合的角分别为 Z_{0o} 、 Z_{0e} 和 θ_o 、 θ_e ，传输矩阵为：

$$[F1] = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{0e} \cot \theta_e + Z_{0o} \cot \theta_o}{Z_{0e} \cot \theta_e - Z_{0o} \cot \theta_o} & -j \frac{2Z_{0e}Z_{0o} \cot \theta_e \cot \theta_o}{Z_{0e} \cot \theta_e - Z_{0o} \cot \theta_o} \\ j \frac{2}{Z_{0e} \cot \theta_e - Z_{0o} \cot \theta_o} & \frac{Z_{0o} \cot \theta_e + Z_{0e} \cot \theta_o}{Z_{0e} \cot \theta_e - Z_{0o} \cot \theta_o} \end{bmatrix} \quad (1)$$

单一传输线的传输矩阵为：

$$[F2] = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_T & jZ_S \sin \theta_T \\ j \sin \theta_T / Z_S & \cos \theta_T \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据传输矩阵的并联性质得到总的传输矩阵：

$$[F_T] = \begin{bmatrix} A_T & B_T \\ C_T & D_T \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_T = \frac{A_1 B_2 + A_2 B_1}{B_1 + B_2}, \quad B_T = \frac{B_1 B_2}{B_1 + B_2}$$

$$C_T = \frac{-(A_1 - A_2)(D_1 - D_2) - (B_1 + B_2)(C_1 + C_2)}{B_1 + B_2}$$

$$D_T = \frac{B_1 D_2 + B_2 D_1}{B_1 + B_2} = A_T$$

由总的传输矩阵得到负载为 Z_L 时的输入导纳

$$Y_i = \frac{C_T Z_L + D_T}{A_T Z_L + B_T}$$

考虑 Z_L 无穷大， $\theta_o = \theta_e = \theta_0$ ，得到谐振条件[11]

$$(Z_{0e} \cdot Z_{0o} \cot \theta_0 - Z_S^2 \tan \theta_0) \sin 2\theta_s + Z_S (Z_e + Z_o) \cos 2\theta_s - Z_S (Z_e + Z_o) = 0 \quad (4)$$

式中 $\theta_s = \theta_T / 2$ ，定义 $Z_0 = \sqrt{Z_{0e} Z_{0o}}$ ， $C = (Z_{0o} - Z_{0e}) / (Z_{0o} + Z_{0e})$ ， $R_Z = Z_P / Z_S$ 可得到进一步简化的谐振条件：

$$\sqrt{1 - C^2} \cdot (R_Z \cot \theta_0 - \tan \theta_0 / R_Z) \cdot \sin 2\theta_s + 2 \cos 2\theta_s + 2 \cos 2\theta_s - 2C = 0 \quad (5)$$

通过以上结果，可以得到谐振器总长度和单线长度的关系，用以讨论小型化条件。减小 R_Z 或增大 C 可以使谐振器尺寸变小。

2.2. 低通滤波器仿真

基于以上理论，本文设计了一款低通滤波器，具体

指标为：通带 0-2.2GHz，插入损耗小于 1dB，回波损耗优于 15dB，在 4.2GHz 处抑制大于 20dB。采用 Rogers4350B 作为基板材料，厚度 $H=0.508\text{mm}$ ， $\epsilon_r=3.66$ ，铜厚 $T=0.018\text{mm}$ ，在 HFSS 中建模仿真并优化，得到一组结构参数： $L_2=2\text{mm}$ ， $L_3=3.7\text{mm}$ ， $L_4=5\text{mm}$ ， $L_5=0.8\text{mm}$ ， $w_3=2.65\text{mm}$ ， $g=0.2\text{mm}$ 。滤波器的 S 参数仿真结果如图 3 所示。

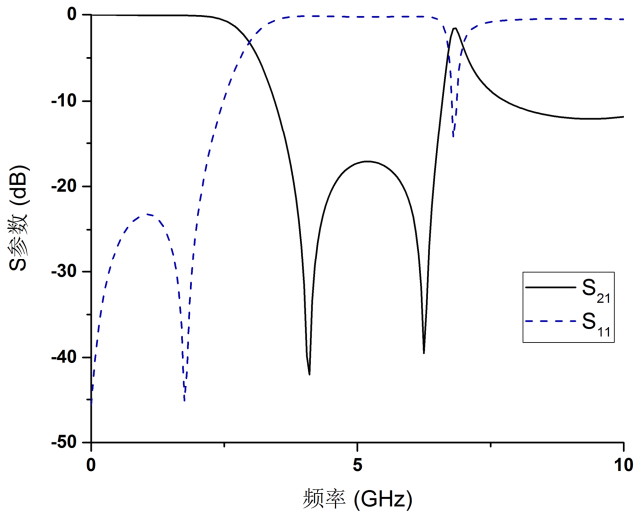


图3 传统的发卡谐振器低通滤波器仿真结果。

从上图中可以看出，在通带 0-2.2GHz 范围内，插入损耗小于 0.3dB，回波损耗优于 20dB，3dB 截止频率为 2.9GHz，在 4.2GHz 处抑制大于 29dB，在 3.8-6.5GHz 内抑制大于 17dB。滤波器截止特性陡峭，但是阻带范围小，寄生通带多，在实际应用中对高频信号抑制不够深，限制了该类型滤波器的使用。因此滤波器需要进一步改进以实现更宽的阻带。

3. T形谐振单元分析

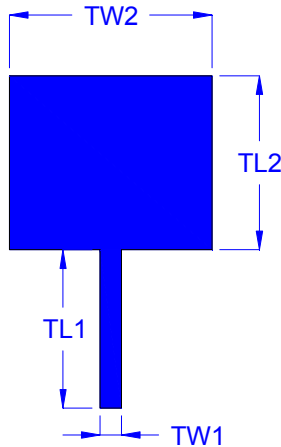


图4 T形谐振单元结构。

图 4 所示的 T 形单元是一种简单的四分之一波长谐振器，在滤波器设计中得到了广泛的使用。它能以很

简单的结构引入传输零点，提高滤波器的带外性能。可以将高阻抗线等效为电感，低阻抗线等效为电容来进行简单的定性分析。整个开路枝节等效为一串联谐振电路，当减小高阻抗线的长度（减小电感值）或减小低阻抗线的宽度（减小电容值）均可使谐振频率变大，传输零点上移。

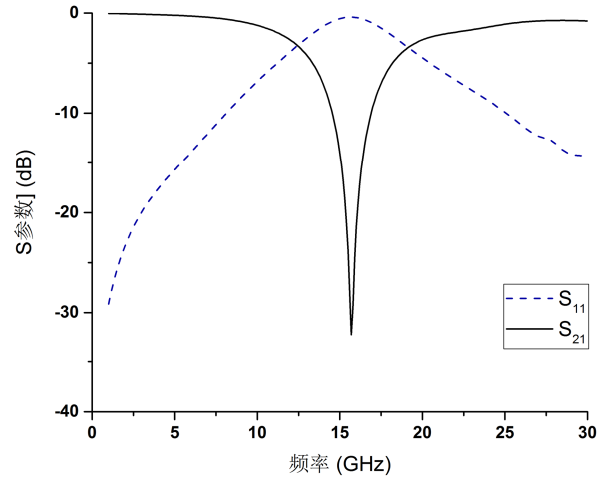


图5 T形谐振单元S参数仿真结果。

谐振频率为 15.7GHz，谐振单元的长度为 1.7mm，小于谐振频率四分之一波导波长 2.4mm，这是因为谐振器采用阶梯阻抗形式，阻抗比小于 1，因此谐振器长度比传统的四分之一波长谐振器长度要短。

改变 T 形谐振单元高阻抗线的长度，分别为 0.4mm，0.3mm，得到的仿真结果如图 6。

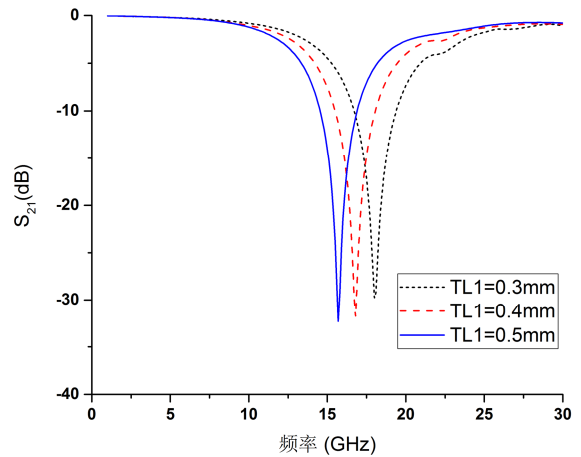


图6 不同高阻抗线长度的T形单元的S参数。

从仿真结果可以看出对应的谐振频率为 16.8GHz 和 18.0GHz，减少 TL1 的长度，谐振频率上移，这与前面的分析是一致的。

4. 阶梯阻抗发卡滤波器加载T形谐振单元

综合以上仿真分析结果，将三个 T 形单元加载在

滤波器的不同位置, 具体结构如图 7 所示:

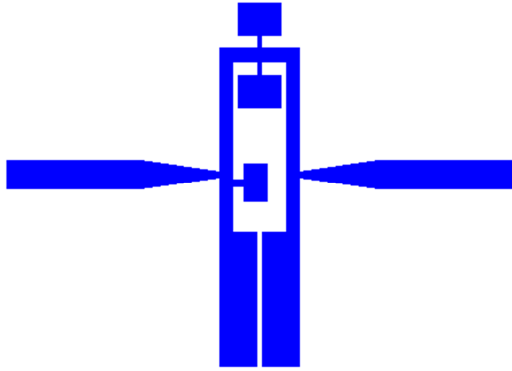


图7 加载T形谐振单元后的滤波器结构。

不同尺寸的 T 形单元对应不同的带外传输零点, 起到拓宽阻带的作用, 并且加载在发卡内部可以节省空间, 减小滤波器体积。发卡滤波器的基本尺寸保持不变。同时采用锥形渐变线馈电, 实现输入阻抗匹配, 改善驻波, 减小反射。图 8 给出了加载三个 T 形单元后滤波器的 HFSS 仿真结果。

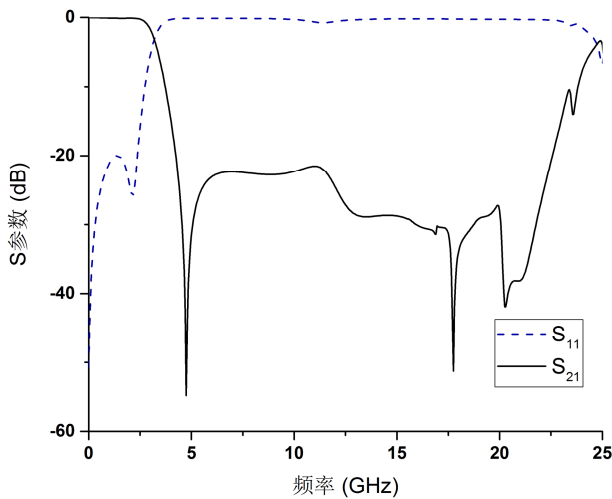


图8 加载三个T形单元后滤波器的S参数仿真结果。

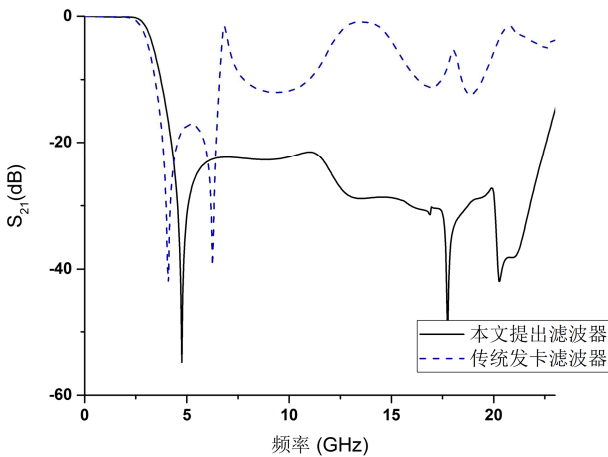


图9 改进前后滤波器 S_{21} 对比。

由图 9 可见, 在通带 0-2.2GHz 内 S_{11} 低于 -15dB, 带内插入损耗小于 0.5dB, 与未加载 T 形单元前基本一致, 3dB 截止频率为 3.2GHz, 在 4.2GHz 处抑制为 19dB, 增加的枝节会使滤波器频带向右偏移。同时在 4.23-22.5GHz 范围内抑制大于 20dB, 滤波器的阻带有了明显拓宽。不考虑馈线长度, 整个滤波器的尺寸为 $0.26\lambda_g \times 0.06\lambda_g$ (12.79mm \times 3mm), 其中 λ_g 是 3dB 截止频率 3.2GHz 对应的导波波长。

5. 实验结果

根据 HFSS 仿真的具体尺寸加工了滤波器实验样品, 图 10 是其实物照片。利用 Agilent E8363C 型号的矢量网络分析仪进行 S 参数测量, 该设备可以测量的范围从 10MHz 到 40GHz。实测结果与仿真结果的比较如图 11 所示, 通带内插入损耗小于 0.4dB, 带内回波损耗优于 16dB, 3dB 截止频率位于 3.2GHz。在 4.2GHz 处抑制为 17dB, 在 4.3GHz-22.7GHz 的阻带范围内衰减大于 20dB。实测结果与仿真结果一致性较好。



图10 滤波器加工实物图。

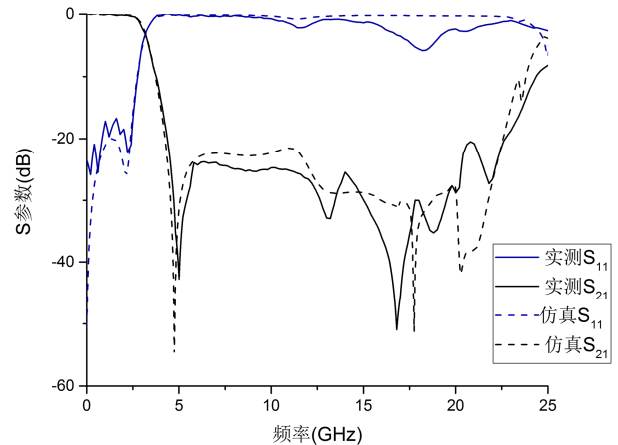


图11 滤波器仿真结果与实测结果对比。

6. 结论

本文在阶梯阻抗发卡滤波器基本结构上, 通过加载 T 形谐振单元, 拓宽了低通滤波器阻带。实测结果表明, 加载三个 T 形单元后, 阻带由 3.8-6.5GHz 展宽到 4.3-22.5GHz, 阻带抑制度均大于 20dB, 部分频点抑制

达到 30dB, 同时对滤波器截止特性影响较小。该改进后的滤波器体积小, 截止特性陡峭, 阻带宽, 具有较高的工程实用价值。

参考文献

- [1] 蔡钟斌. 基于阶梯阻抗发夹谐振器的小型低通滤波器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2007, 5(1):78-80。
- [2] Hsieh L H, Chang K. Compact lowpass filter using stepped impedance hairpin resonator [J]. Electronics Letters, 2001, 37 (14): 899.
- [3] Jiang S, Xu J. Compact microstrip lowpass filter with ultra-wide stopband based on dual-plane structure [J]. Electronics Letters, 2017, 53 (9): 607-609.
- [4] 傅世强, 张佳琦, 房少军. 一种超宽阻带微带低通滤波器的设计[J]. 微波学报, 2018, 34(5):41-43。
- [5] Hsieh L H, Chang K. Compact elliptic-function low-pass filters using microstrip stepped impedance hairpin resonator [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51 (1): 193-199.
- [6] Li Z, Wang G M, Zhang C X, et al. Compact ultra-wide bandpass filter with good out-of-band performance [C] // International Conference on Microwave & Millimeter Wave Technology. IEEE, 2008.
- [7] Li R, Kim D I, Choi C M. Compact Structure With Three Attenuation Poles for Improving Stopband Characteristics [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006, 16 (12): 663-665.
- [8] Yang M H, Xu J. Design of compact, broad-stopband lowpass filter using modified stepped impedance hairpin resonators [J]. Electronics Letters, 2008, 44 (20): 1198-1199.
- [9] Wei X B, Wang P, Liu M Q, et al. Compact wide-stopband lowpass filter using stepped impedance hairpin resonator with radial stubs [J]. Electronics Letters, 2011, 47 (15): 862.
- [10] 毛睿杰, 唐小宏, 王玲. 宽阻带阶跃阻抗发夹线带通滤波器设计[J]. 微波学报, 2007(1):44-46。
- [11] Makimoto, Mitsuo. Microwave Resonators and Filters for Wireless Communication [M]. Springer, 2010, 4: 88-89.