2018年10月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2018)05-0840-05

基于枝节加载型 SIR 的可调滤波器

覃丽容,夏 雷,徐锐敏

(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要:基于枝节加载型阶梯阻抗谐振器(SIR)设计了一种加载变容二极管的微带可调带通滤波器。SIR结构利于抑制高次谐波且可实现滤波器的小型化,提出的模型通过在SIR的中心平面加载2个枝节构成多模谐振器。通过奇偶模方法分析了枝节加载型SIR的谐振特性;通过加载变容二极管实现了对滤波器奇偶模谐振频率的独立控制,利用变容二极管容值的变化实现了滤波器的中心频率可调,中心频率随变容二极管偏置电压的增加而增大。该可调滤波器实现了在0.82~1.17 GHz范围内中心频率可调且插入损耗小于5 dB,回波损耗大于10 dB。

关键词:微带滤波器;阶梯阻抗谐振器;枝节加载;变容二极管;可调带通滤波器
中图分类号:TN713
文献标志码:A
doi:10.11805/TKYDA201805.0840

Tunable filter based on stub-loaded SIR

QIN Lirong, XIA Lei, XU Ruimin

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: A microstrip tunable band-pass filter based on stub-loaded Stepped Impedance Resonator (SIR) is designed, which is loaded with varactors. The SIR structure facilitates the suppression of higher harmonics and enables miniaturization of the filter. The model proposed in this paper is a multimode resonator consisting of a SIR and two stubs loaded in the center plane of the SIR. First of all, the resonance characteristics of the stub-loaded SIR is analyzed in the even-odd mode analysis method. Then, the independent control of the odd mode and even mode resonant frequency of the filter is realized by loading varactors. The tunability of the center frequency can be realized by adjusting the capacitance of the varactors. The center frequency increases with the increase of the bias voltage of varactors. The tunable filter shows a center frequency tunable range from 0.82 GHz to 1.17 GHz with less than 5 dB insertion loss and more than 10 dB return loss.

Keywords: microstrip filter; Stepped Impedance Resonator; stub-loaded; varactor; tunable band-pass filter

传统接收机射频前端电路需要采用多个滤波器和开关组合来选择不同频段所需信号,然而,滤波器组的体积 较大,不符合当前接收机前端电路集成化、小型化的要求,因而采用单个可调滤波器来替代滤波器组是必然的趋 势,它广泛应用于宽带、多通带以及调频通信系统,是通信系统前端的重要组件。目前,可调滤波器^[1]的实现方 式越来越成熟,主要包括变容二极管^[2-3]、铁电材料^[4-5]、钇铁石榴石(Yttrium Iron Garnet, YIG)、铁氧体等铁磁 体^[6]和微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)^[7]等。本文采用的调谐方式为变容二极管^[8]调谐,通 过改变变容二极管的反向偏置电压来改变变容管的电容值,从而实现滤波器的中心频率可调。变容二极管调谐滤 波器具有调谐速度快、成本低、体积小并且可实现连续调谐的优点。早在 1982 年, Hunter I C 等通过加载变容 二极管实现了对梳状线滤波器中心频率的调节,并设计了一款调谐范围为 3.2~4.9 GHz 的梳状线可调滤波器^[3]。

本文在枝节中心加载的微带阶梯阻抗谐振器(SIR)的基础上设计了一款变容二极管调谐滤波器。首先利用枝节加载型 SIR 设计了一款三模谐振器;然后在适当位置加载变容二极管,并对此结构进行奇偶模分析,确定变容 二极管对奇偶模谐振频率的影响。最终,通过调节变容二极管的偏压,实现了滤波器中心频率 0.82~1.17 GHz 的 调节,且整个调节范围内插入损耗小于 5 dB,带宽基本保持不变。

1 SIR 的基本特性

SIR 由日本学者 Makimoto M 和 Yamashita S 首次提出^[9],其是由 2 段或 2 段以上不同特征阻抗的传输线组合 而成的横向电磁场或准横向电磁场模式的新型结构。SIR 在结构和设计上比均匀阻抗谐振器(Uniform impedance resonator, UIR)多一个自由度,既可以实现滤波器的小型化,也能够抑制高次谐波,改善阻带内的频率响应。

 $1/4\lambda_g$ 型和 $1/2\lambda_g$ 型 SIR 结构分别如图 1~2 所示^[10]。输入端的导纳定义为 Y_{in} , 2 段微带线的特性阻抗及对应的等效电长度分别为 $Z_2, Z_1, \theta_2, \theta_1$ 。阻抗比 $R_Z = Z_2/Z_1$ 。

从开路端看进去, 1/4 波长 SIR 的输入导纳为:

$$Y_{in} = \frac{Z_2 - Z_1 \tan \theta_1 \tan \theta_2}{jZ_2(Z_1 \tan \theta_1 + Z_2 \tan \theta_2)}$$
(1)
由谐振条件 Y_{in} =0,可以得到:

$$\tan \theta_1 \tan \theta_2 = Z_2 / Z_1 = R_Z \tag{2}$$

由式(2)可以看出: $1/4\lambda_g$ 型 SIR 的谐振条件与 θ_1, θ_2 和 阻抗比 R_z 有关。

同样,从开路端看进去,1/2 波长 SIR 的输入导 纳为:



$$Y_{\rm in} = \frac{j2(R_Z \tan \theta_1 + \tan \theta_2)(R_Z - \tan \theta_1 \tan \theta_2)}{Z_2 R_Z (1 - \tan^2 \theta_1)(1 - \tan^2 \theta_2) - 2(1 + R_Z^{-2}) \tan \theta_1 \tan \theta_2}$$
(3)

同理,根据谐振条件Y_m=0,可求得半波长 SIR 相应的谐振频率。

2 可调滤波器设计及理论分析

本文设计了一款基于枝节加载型 SIR 和变容二极管实现的新型电可调微带谐振器,结构如图 3(a)所示,通过 在 SIR 的中心平面加载 2 个开路枝节,构成三模谐振器。2 个开路枝节分别位于 SIR 两侧,分别在 SIR 的 2 个开 路端和 2 个加载枝节的开路端连接变容二极管。由于该谐振器为对称结构,故可利用奇偶模理论对其谐振频率进 行分析,图 3(b)~(c)给出了其对应的奇偶模等效电路。从奇偶模等效电路可以看出:加载的 2 个枝节只影响其偶 模等效电路,而对其奇模等效电路无影响。



根据传输线理论[11]:

$$Y_{\rm in}^{\rm o} = j(Y_2 \frac{Y_2 \tan \theta_1 \tan \theta_2 - Y_1}{Y_2 \tan \theta_1 + Y_1 \tan \theta_2} + \omega C_1)$$
(4)

$$Y_{\rm in}^{\rm e} = j \left\{ Y_2 \frac{Y_1 \left[\frac{Y_L^3 + Y_L^4 + Y_1 \tan \theta_1}{Y_1 - (Y_L^3 + Y_L^4) \tan \theta_1} \right] + Y_2 \tan \theta_2}{Y_2 - Y_1 \left[\frac{Y_L^3 + Y_L^4 + Y_1 \tan \theta_1}{Y_1 - (Y_L^3 + Y_L^4) \tan \theta_1} \right] \tan \theta_2} + \omega C_1 \right\}$$
(5)

其中

$$Y_{L}^{3} = \frac{Y_{3}}{2} \cdot \frac{2\omega C_{2} + Y_{3} \tan \theta_{3}}{Y_{3} - 2\omega C_{2} \tan \theta_{3}}$$
(6)

$$Y_{L}^{4} = \frac{Y_{4}}{2} \cdot \frac{Y_{5}(2\omega C_{3} + Y_{5} \tan \theta_{5}) + Y_{4} \tan \theta_{4}(Y_{5} - 2\omega C_{3} \tan \theta_{5})}{Y_{4}(Y_{5} - 2\omega C_{3} \tan \theta_{5}) - Y_{5}(2\omega C_{3} + Y_{5} \tan \theta_{5}) \tan \theta_{4}}$$
(7)

根据奇偶模谐振条件 $Y_{in}^{o} = 0$, $Y_{in}^{e} = 0$, 可以得到 3 个基模谐振频率,其中包括一个奇模谐振点(f_{1})和 2 个偶模谐振点(f_{2},f_{3})。图 4 给出了滤波器奇偶模谐振点 f_{1},f_{2},f_{3} 随各电容值 C_{1},C_{2},C_{3} 的变化曲线。由曲线图可以看出:奇模谐振点 f_{1} 随电容 C_{1} 的增大而减小,但随着电容 C_{2},C_{3} 的增大, f_{1} 几乎保持不变;偶模谐振点 f_{2},f_{3} 均随电容 C_{1},C_{2},C_{3} 的增大而减小。所以,电容 C_{1} 的取值对奇偶模谐振频率 f_{1},f_{2},f_{3} 均有影响,而电容 C_{2} 和 C_{3} 的值只影响偶模谐振频率 f_{2},f_{3} ,对奇模谐振频率 f_{1} 没有影响。因此,该滤波器结构可以实现对其奇偶模谐振频率的独立控制。各谐振频率随不同变容管偏压的变化而变化,从而中心频率也随之改变。



图 4 奇偶模谐振点 f1,f2,f3 随电容 C1,C2,C3 的变化曲线

使 f₁=f₂=f₃=f₀(中心频率),通过理论计算出谐振器的初始尺寸,再经过仿真优化得到表 1 的最终设计尺寸。 介质基板厚度 0.635 mm,介电常数 6.15,损耗角正切为 0.002 8 的 Taconic RF-60(tm),基片大小 22.1 mm×22.8 mm。

	表 1 谐振器各部分的几何参数表(mm)										
Table1 Geometric parameters of each part of the resonator(mm)											
	parameter	W_1	L_1	W_2	L_2	W_3	L_3	W_4	L_4	W_5	L_5
	size	0.50	18.00	3.50	4.00	1.00	3.00	1.00	1.95	3.00	2.00

利用电磁仿真软件 HFSS 对本文提出的可调滤波器模型进行仿真,仿真模型如图 5 所示。其中包括一个半波 长 SIR、一个开路阶梯步进枝节、一个开路 UIR 枝节和 3 个变容二极管,其中的 SIR 作弯折处理以减小体积。采 用平行耦合馈电的方式进行输入/输出。通过合理设置耦合长度和耦合间距实现满足要求的外部品质因数。为了 获得更好的驻波,对输入输出处的拐角做适当的切角处理。



Fig.5 Simulation model by HFSS 图 5 HFSS 仿真模型



图 6 可调滤波器版图

3 结果分析

通过对式(4)~(7)和图 4 分析可知:本文提出的可调滤波器结构存在一个奇模谐振点和 2 个偶模谐振点,且 C₁的电容值对奇偶模谐振频率均有影响,而 C₂,C₃的电容值只影响偶模谐振频率。因此,通过控制 C₁,C₂,C₃的取 值可实现不同的奇偶模谐振频率,从而使滤波器实现不同的中心频率。首先使 f₁=f₀,其中的可调电容 C₁用 SKYWORKS 公司的变容二极管 SMV2020 实现,可调电容 C₂和 C₃用变容二极管 SMV1273 实现。考虑到变容二 极管的加电问题,在该滤波器适当的位置加隔直电容,隔直电容的取值应尽可能大,避免造成可调范围减小,但 太大会增大滤波器的插入损耗,故应兼顾可调范围和损耗问题适当取值,这里的隔直电容选用 0402 封装的 120 pF 贴片电容。为了防止射频信号泄露到直流偏置电路上,直流偏置电压均通过 100 kΩ 的电阻加到变容二极管上。 图 6 给出了滤波器的版图设置。滤波器频率响应曲线如图 7 所示,图中给出了 5 个状态下的频率响应曲线,其中, U₁,U₂,U₃分别为加到变容二极管 C₁,C₂,C₃上的偏置电压。



设计时使偶模谐振频率小于奇模谐振频率(f₂<f₁=f₀<f₃),根据固有传输零点始终位于靠近偶模阻带的理论,可 使下阻带和上阻带分别产生一个传输零点。图7的频率响应曲线图也表明了该滤波器在高阻带和低阻带分别存在 一个传输零点,可以改善滤波器在低频段的带外抑制,提高滤波器的频率选择性。反之,若使奇模谐振频率小于 偶模谐振频率,则上阻带存在传输零点。谐振频率随变容二极管偏置电压的增大而增大,因此滤波器的中心频率 也随变容二极管偏置电压的增大而增大。滤波器的中心频率实现了在 0.82~1.17 GHz 范围内可调,在整个调节范 围内插入损耗小于 5 dB,回波损耗优于 10 dB,且改变中心频率时,滤波器的带宽基本保持不变。

4 结论

本文基于枝节加载型 SIR 设计了一款微带可调滤波器,利用奇偶模方法对其谐振原理进行分析,并通过加载 变容二极管实现了滤波器的中心频率可调,最终设计了一款 0.82~1.17 GHz 中心频率可调的微带带通滤波器。在 整个可调范围内其插入损耗小于 5 dB,回波损耗大于 10 dB。基于该设计还可以结合低温共烧陶瓷(Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC)等技术实现可调滤波器的小型化,在无线通信系统中有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] HONG Jiasheng. Microstrip filters for RF/microwave applications[M]. New York:Wiley, 2011.
- [2] BROWN A R,REBEIZ G M. A varactor-tuned RF filter[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000,48(7):1157-1160.
- [3] HUNTER I C,RHODES J D. Electronically tunable microwave bandpass filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1982,30(9):1354-1360.
- [4] MOECKLY B H,ZHANG Y. Strontium titanate thin films for tunable YBa₂Cu3O₇ microwave filters[J]. Applied Superconductivity Conference, 2001,11(1):450-453.
- [5] TOMBAK A,AYGUAVIVES F T,MARIA J P,et al. Tunable RF filters using thin film barium strontium titanate based capacitors[J]. International Microwave Symposium Digest IEEE MTT-S 2001, 2001(3):1453-1456.
- [6] TSUTSUMI M,OKUBO K. On the YIG film filters[J]. International Microwave Symposium Digest Part Albuquerque, 1992,3(3):1397-1400.
- [7] ABBASPOUR A-TAMIJANI A, DUSSOPT L, REBEIZ G M. Miniature and tunable filters using MEMS capacitors[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003,51(7):1878-1885
- [8] 喻梦霞,李桂萍. 微波固态电路[M]. 成都:电子科技大学出版社, 2008. (YU Mengxia, LI Guiping. Microwave solid state circuit[M]. Chengdu, China: UESTC Press, 2008:159-161.)
- [9] MAKIMOTO M, YAMASHITA S. 无线通信中的微波谐振器与滤波器[M]. 赵宏锦,译. 北京:国防工业出版社, 2002. (MAKIMOTO M, YAMASHITA S. Microwave resonators and filters in wireless communications[M]. Translated by ZHAO Hongjin. Beijing:National Defense Industry Press, 2002.)
- [10] 邓宏伟.高性能平面微波滤波器及双工器的研究[D].南京:南京航空航天大学, 2014. (DENG Hongwei. Study on high performance planar microwave filter and diplexer[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.)
- [11] 徐锐敏,唐璞. 微波技术基础[M]. 北京:科学出版社, 2009. (XU Ruimin, TANG Pu. Foundation of microwave technology[M]. Beijing: Science Press, 2009.)

作者简介:



覃丽容(1992-),女,广西壮族自治区贵港 市人,在读硕士研究生,主要研究方向为微波 毫米波电路与系统.email:815818954@qq.com. 夏 雷(1976-),男,山东省人,副研究员,主 要研究领域为微波毫米波混合电路、微波电路建 模、微波毫米波 LTCC 电路封装集成.

徐锐敏(1958-),男,四川省乐山市人,教授, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统.