

Design of a Novel Filter with General Cross-Coupling

ZHU Yong-zhong¹, NI Da-ning¹, XIE Yong-jun¹

(1. National Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University Xian 710071, China)

Abstract: A new coupling direct between the source and the load to yield two additional transmission zeros. A general method is presented for synthesizing microwave filter with source-load cross coupling. The equivalent circuit of the low-pass prototype of a general lossless coupled resonator filter is proposed, and the corresponding transfer function $t(s)$ is derived. Then, two novel hexagonal open-loop quasi-elliptic resonator microstrip filters are designed, one symmetric and the other asymmetric, are designed and simulated. Compared with the conventional cross coupling filter, the proposed filter of two pole hexagonal open-loop resonator filter acquires more than 27.5% size reduction and provides an improved selectivity by a relatively small band-width.

Key words: microwave filter ; cross-coupling; transfer function; quasi-elliptic function; hexagon

EEACC: 1270

一种新型广义交叉耦合滤波器的设计

朱永忠¹, 倪大宁¹, 谢拥军¹

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 西安 710071)

摘要:含广义交叉耦合的 N 个谐振器滤波器, 即含源-负载交叉耦合的滤波器能产生 N 个传输零点, 通过给出这种滤波器的等效网络模型和传输函数, 设计了两种新颖六边形结构的含源-负载交叉耦合的微带滤波器, 一种为对称结构, 一种为非对称结构. 对其进行了仿真分析, 仿真结果与理论值吻合较好. 与传统两腔发夹形滤波器相比, 这种两腔六边形结构的滤波器尺寸要缩小 27.5%, 频率选择性更高.

关键词:微波滤波器; 交叉耦合; 传输函数; 准椭圆函数; 六边形

中图分类号: TN713.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2007)01-0129-03

很长时间以来, 对交叉耦合滤波器的研究, 都局限在源与负载分别与一个谐振腔相耦合的拓扑结构上. 这样一个 N 阶交叉耦合滤波器最多只能实现 $N-2$ 个传输零点^[1]. 现代通信系统对滤波器低带内损耗、高带外插损和小型化的要求, 使人们开始考虑广义交叉耦合的滤波器. 亦即含源负载之间的交叉耦合, 对于给定的一种含有 N 个谐振器的拓扑耦合结构, 如果考虑源负载之间的交叉耦合可以实现 N 个传输零点^[4-8]. 文献[6]考虑了源与负载分别与一个相邻谐振腔相耦合的拓扑结构的集总参数解法, 但没有给出这种耦合结构的低通原型等效电路. 而且文献[6,8]给出的都是对称结构的偶数阶广义交

叉耦合的滤波器. 本文对含源与负载交叉耦合滤波器进行了深入研究. 首先给出这种耦合滤波器的低通等效电路模型, 并以此为依据推导了这种结构的传输函数 $t(s)$. 然后, 对椭圆函数进行修正, 作为广义交叉耦合滤波器的逼近函数, 设计了对称与非对称两种结构的六边形广义交叉耦合的微带滤波器, 并对其进行了仿真, 仿真结果与理论曲线吻合得较好. 与传统发夹形滤波器相比, 这种结构的滤波器具有尺寸更小, 选择性更高的优势.

1 理论分析

图 1 给出了考虑广义交叉耦合的带通谐振器滤

收稿日期: 2006-03-20

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-04-0950)

作者简介: 朱永忠(1980-), 男, 安徽枞阳人, 攻读博士学位, 主要研究方向为微波通信、无线小型化技术, bsbs1980@sina.com.

波器的低通原型等效电路：

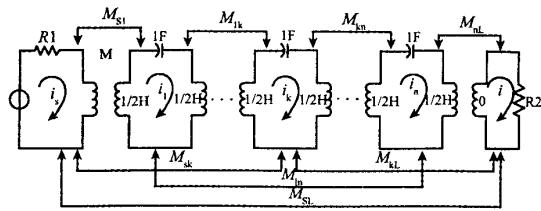


图1 广义交叉耦合滤波器低通原型等效电路

该电路由 N 个电感耦合的谐振腔构成,各个谐振腔之间的耦合系数由 M_i 表示,而源、负载与各腔之间的耦合系数分别用 M_S 、 M_L 表示.值得注意的是,这些耦合系数是不随频率变化的.不失一般性,做如下归一化:

$$\omega_0 = 1, \Delta\omega = 1 \quad (1)$$

这里: ω_0 为中频, $\Delta\omega$ 为相对带宽.则

$$s = j\omega = j\omega + \frac{1}{jW} = j(\omega - \frac{1}{\omega}) \quad (2)$$

那么电路方程可以写为:

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & jM_{S1} & jM_{S2} & \cdots & jM_{SN} & jM_S \\ jM_{S1} & s & jM_{12} & \cdots & jM_{1N} & jM_{1L} \\ jM_{S2} & s & jM_{12} & \cdots & jM_{2N} & jM_{2L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ jM_{SN} & jM_{1N} & \cdots & \cdots & s & jM_{NL} \\ jM_S & jM_{1L} & \cdots & \cdots & jM_{NL} & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_N \\ i_L \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)可写成矩阵方程的形式:

$$E = Z \cdot I = (sU_0 + jM + R)I \quad (4)$$

其中, U_0 是将 $(N+2) \times (N+2)$ 阶单位矩阵中第一个元素和最后一个元素令为 0, 其它元素都保持不变所得的矩阵. M 是耦合矩阵, 它是一个 $(N+2) \times (N+2)$ 的方阵, 形式如下:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{SN} & M_S \\ M_{11} & M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1N} & M_{1L} \\ M_{12} & M_{12} & M_{22} & \cdots & M_{2N} & M_{2L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ M_{SN} & M_{1N} & \cdots & \cdots & M_{NN} & M_{NL} \\ M_S & M_{1L} & \cdots & \cdots & M_{NL} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$t(s) = \frac{-j^2 \sqrt{R_1 R_2} [M_S M_{12}^2 + (M_S M_{12}^2 - M_{S1} M_{12} M_{2L})]}{(M_S^2 + R_1 R_2) S^2 + (R_1 M_{2L}^2 + R_2 M_{S1}^2) s + [R_1 R_2 M_{12}^2 + (M_{S1} M_{2L} - M_S M_{12})^2]} \quad (10)$$

$$|t(s)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 (\frac{s^2 + w_z^2}{s^2 + w_p^2})^2} \quad (11)$$

其中, ϵ 是修正后的波纹系数, w_z 、 w_p 即为上述零、极点.式(11)就是修正后的准椭圆函数.用它作为逼近函数来综合广义交叉耦合的两腔滤波器.

2.1 二阶微带滤波器

设计了一个中心频率为 3.3 GHz, 带宽为 2%,

其中对角线上的元素代表每一个谐振腔回路的自耦合, 它表示每一个谐振腔谐振频率与中心频率之间的偏差.(在同步调谐滤波器中, 认为它们的值都取零.式(3)、(4)已取这种情况).其它元素表示各个谐振腔之间的耦合系数.

R 矩阵是 $(N+2) \times (N+2)$ 阶方阵, 除 $R(1,1) = R_1$, $R(N+2, N+2) = R_2$ 为非零量以外, 其它元素值都等于零.

负载回路的电流为

$$i_n = e_1 \frac{D(\text{cof } Z_{1N+1})}{D(Z)} \quad (6)$$

输出/输入电压比为

$$\frac{e_n}{e_1} = \frac{R_2 D(\text{cof } Z_{1N+1})}{D(Z)} \quad (7)$$

那么这个广义耦合滤波器等效电路的传输函数可以表示为:

$$t(s) = \frac{i_1 R_2}{e_1 / 2} = \frac{2 \sqrt{R_1 R_2} D(\text{cof } Z_{1N} + 1)}{D(Z)} \quad (8)$$

其中, $D(\text{cof } Z_{1N})$ 表示 Z 矩阵第一行、第 N 列元素的代数余子式, $D(Z)$ 表示 Z 矩阵的行列式.

2 设计实例

为更好地实现滤波器的优良性能, 必须对椭圆函数进行修正. 修正后的准椭圆函数可以作为逼近函数来综合广义交叉耦合滤波器的设计. 这里以三阶标准椭圆函数的修正为例, 得出广义交叉耦合两腔滤波器的逼近函数. 三阶标准椭圆函数滤波器响应为:

$$|t(s)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon_0^2 s^2 (\frac{s^2 + w_z^2}{s^2 + w_p^2})^2} \quad (9)$$

其中, ϵ_0 是带内波纹系数, w_z 、 w_p 分别是零、极点. 而由式(8)得到两腔结构的传输函数为式(10). 这里考虑结构的可实现性, 已令 $M_{S2} = M_{1L} = 0$. 观察式(10)可知, 两腔结构广义交叉耦合滤波器的传输函数的分子、分母均为二次多项式. 因此, 将(9)式与(10)式做比较, 可将式(9)做修正, 得到以下形式:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1.3557 & 0 & -0.04 \\ 1.3557 & 0 & 2.1027 & 0 \\ 0 & 2.1027 & 0 & 1.3557 \\ -0.04 & 0 & 1.3557 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

而 $R_1 = R_2 = 1.3557^2$. 采用两腔六边形结构的广义交叉耦合结构, 如图 2 所示. 所用介质基板的介

电常数 $\epsilon_r = 9.8$, 厚度为 0.5 mm, 其长宽为 12.5 mm \times 7.4 mm, 六边形的每条边宽为 1.5 mm, 利用 EM 全波仿真软件进行分析, 所得结果与理论曲线作以比较, 如图 3. 可见两种方法所得的曲线吻合得较好. 证明了这种综合设计方法的有效性. 与文献 [5] 中的发夹形含源-负载交叉耦合滤波器相比, 这种六边形结构尺寸更小(文献[5]中的尺寸为 14.4 mm \times 8 mm), 而且能够获得更好的衰减特性.

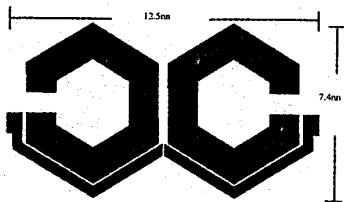


图 2 两腔广义交叉耦合的滤波器平面图



图 3 传输与反射特性曲线图

2.2 三阶微带滤波器

设计了一个中心频率为 920 MHz, 带宽为 55 MHz, 回波损耗为 20 dB, 带外最小衰减为 25 dB 的滤波器, 得到传输零点分别在 $f_1 = 770$ MHz, $f_2 = 870$ MHz, 和 $f_3 = 1.11$ GHz, 经过综合变换所得矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & -1.1657 & 0 & 0.0202 & -0.0263 \\ -1.1657 & 0.2321 & -1.0202 & 0.6771 & 0.0202 \\ 0 & -1.0202 & -0.5199 & -1.0202 & 0 \\ 0.0202 & 0.6771 & -1.0202 & 0.2850 & -1.1657 \\ -0.0263 & 0.0202 & 0 & -1.1657 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

而 $R_1 = R_2 = 1.16572$. 采用三腔六边形结构的广义交叉耦合结构, 如图 4 所示. 所用介质基板的介电常数 $\epsilon_r = 10.8$, 厚度为 1.27 mm, 其长宽为 42 mm \times 41 mm, 六边形的每条边宽为 1.4 mm. 仿真结果与理论曲线作以比较见图 5, 可见两种方法所得的曲线吻合的较好.

3 结语

与传统的耦合方式相比较, 广义交叉耦合模型不仅在馈源与负载端存在交叉耦合, 源、负载也可以

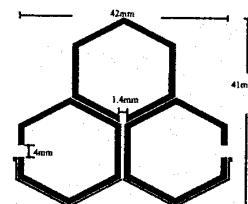


图 4 三腔广义交叉耦合的滤波器平面图

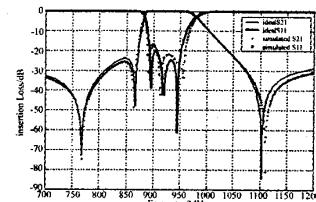


图 5 传输与反射特性曲线图

耦合不止一个谐振器. 这样能够使滤波器响应在阻带内产生衰减极大值, 利于形成优良的滤波特性曲线. 本文以两种新形结构的微带滤波器设计为例证明了等效电路的正确性, 为今后设计更好性能的滤波器提供了依据.

参考文献:

- [1] Cameron R J. General Coupling Matrix Synthesis Methods for Chebyshev Filtering Function[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1999, 47(4): 433-442.
- [2] Atia A E and Williams A E. Narrow-Bandpass Waveguide Filters[J]. IEEE Transactions on MTT, 1972, 20(4): 258-265.
- [3] Smain Amari. Synthesis of Cross-Coupled Resonator Filters Using an Analytical Gradient-Based Optimization Technique [J]. IEEE Trans. MTT, 2000, 48 (9): 1559-1564.
- [4] Smain Amari, Jens Bornemann. Maximum Number of Finite Transmission Zeros of Coupling Resonator Filters With Source/Load Multi-resonator Coupling and a Given Topology [C]// Microwave Conference, 2000 AP 3-6: 1175-1177.
- [5] Kolmakov, Ya. A, Savino, A. M, Vendik, I. B. Quasi-Elliptic Two Pole Microstrip Filter [C]// Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2004. MIKON-2004. 15th International Conference 2004, 1(17-19): 159-161.
- [6] Montejo-Garai J R, Synthesis of N-Even Order Symmetric Filters with N Transmission Zeros by Means of Source-Load Cross Coupling[J]. Electronics Letters, 2000, 36(3): 232-233.
- [7] Smain Amari, Uwe Rosenberg. Adaptive Synthesis and Design of Resonator Filter with Source/Load Multi-Resonator Coupling[J]. IEEE Transactions on MTT, 2002, 50(8): 1969-1978.
- [8] Smain Amari, Direct Synthesis of Folded Symmetric Resonator Filters with Source-Load Coupling[J], IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 2001, 49(6): 264-266.

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>