

## 基于一种新型电路优化方法的滤波器综合

焦 伟, 官伯然

(杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**该文首先介绍了 Cameron 的矩阵变换法, 此为综合带有有限传输零点的广义切比雪夫滤波器的经典方法。其次, 该文提出了一种新型而有效的综合方法, 构建模型并用电路优化的方法进行综合。电路由谐振单元和阻抗变换器组成, 具有结构简单、优化速度快、结果准确可靠的特点。最后, 比较两种方法得到滤波器响应, 证明电路优化方法是可行的, 高效的。

**关键词:**广义切比雪夫滤波器; 电路优化; 交叉耦合

**中图分类号:** TN713<sup>+</sup>.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-9146(2007)01-0013-04

### 0 引 言

随着通信需求的发展, 频谱显得日趋紧张, 因此对信道滤波器性能的要求也是越来越高。带外隔离度高, 带内差损小的滤波器是发展的趋势。交叉耦合技术的引入, 使得带有有限传输零点的广义切比雪夫滤波器响应满足市场的需求。这种滤波器通过增加有限传输零点来实现较高的带外抑止, 其综合技术在国外已有成熟的理论<sup>[1-3]</sup>。本文首先简要介绍了 Cameron 的矩阵变换方法; 其次, 本文提出一种新型滤波器综合方法, 根据要求建立滤波器等效电路模型, 优化电路模型参数, 同样得到所需的滤波器响应; 通过比较得知, 该优化的方法是可行的。

### 1 矩阵变换法

广义切比雪夫函数表达为:

$$C_N(\omega) = \frac{F_N(\omega)}{P_N(\omega)} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\prod_{n=1}^N (a_n + b_n) + \prod_{n=1}^N (a_n - b_n)}{\prod_{n=1}^N \left( 1 - \frac{\omega}{\omega_n} \right)} \right] \quad (1)$$

式中,  $a_n = \omega - \frac{1}{\omega_n}$ ,  $b_n = \omega' \left( 1 - \frac{1}{\omega_n^2} \right)^{1/2}$ ,  $\omega' = (\omega^2 - 1)^{1/2}$ 。由 Cameron 的矩阵变换法<sup>[1-3]</sup>可得反射多项式和传输多项式, 进而为综合耦合矩阵  $M$  提供条件。因为  $M$  是一个实对称矩阵, 而且其本征值也为实数, 则存在一个  $N \times N$  的正交归一化  $T$  矩阵:

$$-M = T \times L \times T^* \quad (2)$$

式中,  $-M$  矩阵的本征向量由  $\Lambda = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N]$  表示,  $\lambda_n$  是矩阵  $-M$  的本征值。  $T^*$  是  $T$  的转置矩阵。已求出的传输多项式和反射多项式带入传输零点位置, 就可得矩阵  $T$  的  $T_{1n}$  和  $T_{Nn}$ , 以及本征值  $\lambda_n$ 。由  $T_{Nn}$  和本征值  $\lambda_n$  可以构造一个  $N+2$  矩阵, 对矩阵进行 Givens 变换, 可以消去  $M$  矩阵中不需要的

收稿日期: 2006-09-11

作者简介: 焦 伟 (1981-), 男, 陕西西安人, 在读研究生, 电磁场与微波技术。

万方数据

元素,重复这样的过程,直到获得需要的结构<sup>[4]</sup>。

## 2 电路优化法

从 N 阶耦合谐振器滤波器的等效电路出发,由电压环路定理得到阻抗矩阵表达式为:

$$[Z] = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} & -j\omega L_{12} & \cdots & -j\omega L_{1n} \\ -j\omega L_{21} & j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} & \cdots & -j\omega L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -j\omega L_{n1} & -j\omega L_{n2} & \cdots & R_n + j\omega L_n + \frac{1}{j\omega C_n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $L_{ij} = L_{ji}$  是谐振器 i 和谐振器 j 之间的互感。  $L_{ij}$  的物理意义为相邻或者非相邻耦合谐振器之间的耦合,在实际优化电路中可以用耦合模块来实现。例如,用阻抗变换器  $K_{ij}$ 、一段四分之一波长的耦合传输线或者理想变压器来等效。将阻抗矩阵  $[Z]$  归一化,则式 3 变为:

$$[\bar{Z}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{Q_e} + p - jm_{11} & -jm_{12} & \cdots & -jm_{1n} \\ -jm_{21} & p - jm_{22} & \cdots & -jm_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -jm_{n1} & -jm_{n2} & \cdots & \frac{1}{Q_e} + p - jm_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $p$  是低通复频率变量;  $Q_e$  是相对的外部品质因数,由于滤波器是对称结构,输入输出端口的外部品质因数认为是相同的,因此都以  $Q_e$  表示;  $m_{ij}$  是归一化耦合系数。

在 Ansoft Designer 中构建电路优化模型,如图 1 所示。图 1 中,并联  $L_i C_i$  回路等效耦合谐振器;并联  $R_i$  为每个谐振器的损耗电阻,  $Q_u$  是无载品质因数,  $R_i$  由输入输出谐振器的品质因数决定;阻抗变换器  $K_{ij}$  等效相邻以及非相邻耦合谐振器之间的耦合。

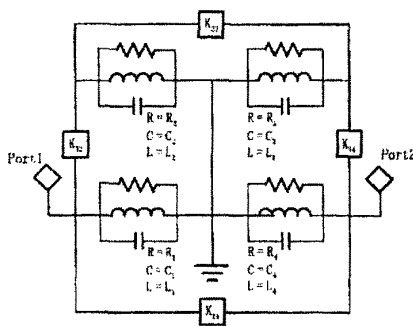


图 1 Ansoft Designer 中建立的 4 阶电路优化模型

电路中各变量表达式为:

$$\begin{cases} C_i(\omega) = \frac{Q_e}{\omega Z_0}, & L_i(\omega) = \frac{Z_0}{\omega Q_e} \\ R_i = \frac{Z_0 Q_u}{Q_e}, & K_{ij} = \frac{Z_0}{Q_e m_{ij}} \end{cases} \quad (5)$$

模型建立之后,添加  $R_i$ ;  $L_i$ ;  $C_i$  等变量,并以目标函数  $S_{21}$  和  $S_{11}$  构成泛函,耦合矩阵元素  $m_{ij}$  为优化变量。确定初值之后依次对  $m_{ij}$  进行优化,结合使用软件包中的和优化算法,迭代后则可以达到最优的滤

波器特性和耦合矩阵。

这种等效电路模型优化方法的优点是:明显减少了中间变量的数目,使分析和优化的速度加快;优化目标为滤波器设计指标  $S_{11}$  和  $S_{21}$ ,优化的直接变量是耦合系数  $m_{ij}$ ,使优化目标与变量之间关系更加直接、明确。最终结果为满足指标要求的耦合矩阵  $M$ ,从而提高了优化效率。

3 应用实例

首先,给出一个 4 阶交叉耦合谐振滤波器实例<sup>[5]</sup>。滤波器设计指标:中心频率为 1.94GHz,带宽为 80MHz,回波损耗为 22dB,要求在 2.4–2.5GHz 处衰减为 85dB,异步调谐。由矩阵变换法可以得到耦合矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 0.001 & 0.044 & 0.004 & 0.000 \\ 0.044 & -0.005 & 0.034 & 0.000 \\ 0.004 & 0.034 & 0.001 & 0.045 \\ 0.000 & 0.000 & 0.045 & 0.001 \end{bmatrix}$$

(6)

由耦合矩阵得到滤波器响应,如图 2(a)所示,其中横坐标为归一化频率。同样,优化后再仿真得到滤波器响应,如图 2(b)所示。

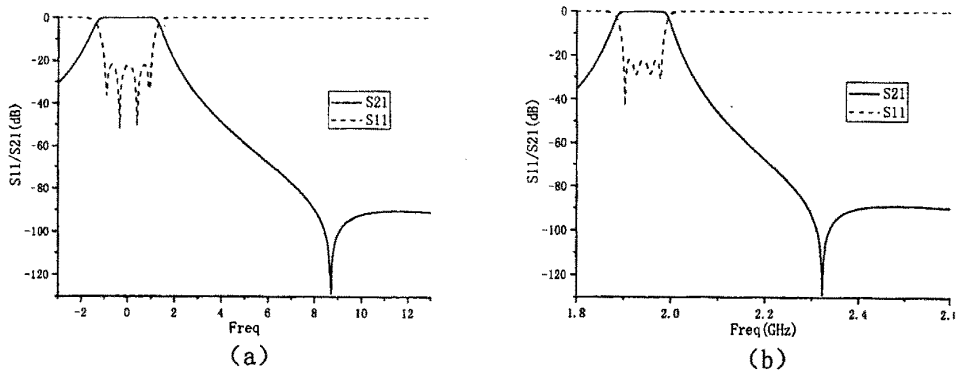


图 2 4 阶异步调谐交叉耦合谐振滤波器响应比较

同步调谐的滤波器实例。滤波器设计指标:中心频率为 934.5MHz,带宽为 51MHz,回波损耗为 22dB,要求在低于 880MHz 和高于 990MHz 处带外抑制小于 -50dB。其耦合矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 0.000 & 0.830 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.019 \\ 0.830 & 0.000 & 0.579 & 0.000 & -0.166 & 0.000 \\ 0.000 & 0.579 & 0.000 & 0.706 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.706 & 0.000 & 0.579 & 0.000 \\ 0.000 & -0.166 & 0.000 & 0.579 & 0.000 & 0.830 \\ 0.019 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.830 & 0.000 \end{bmatrix}$$

(7)

耦合矩阵得到滤波器响应,如图 3(a)所示。优化后再仿真得到滤波器响应,如图 3(b)所示。

4 结 论

通过对比可以清楚地得出结论,电路优化法建立的模型结构简单,通用性强,无论是同步调谐情况还是异步调谐情况都是适用的,优化速度快效率高,结果是准确可靠的。然而,在优化算法的选取上有许多地方值得深入研究。

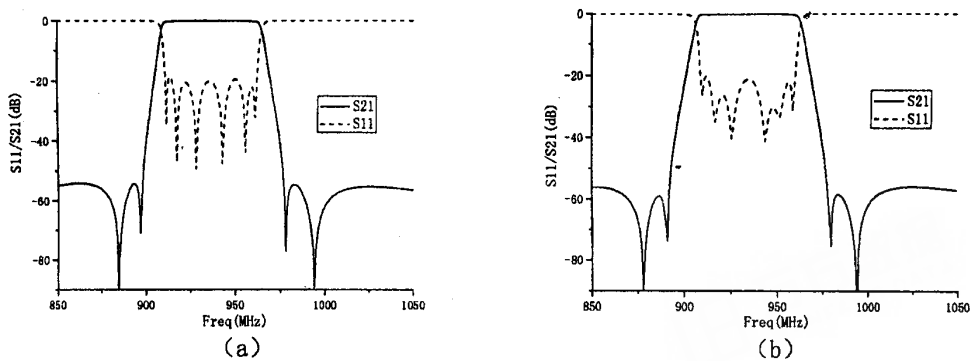


图3 6阶同步调谐交叉耦合谐振滤波器响应比较

## 参考文献

- [1] Cameron R J. General coupling matrix synthesis methods for Chebyshev filtering functions[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(4): 433 - 442.
- [2] Cameron R J. Synthesis of advanced microwave filters without diagonal cross - coupling[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(12): 2862 - 2871.
- [3] Cameron R J. Advanced Coupling Matrix Synthesis Techniques for Microwave Filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(1): 1 - 10.
- [4] Thomas J Brian. Cross - Coupling in Coaxial Cavity Filter - A Tutorial Overview[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(4): 1368 - 1376.
- [5] Ye Rong, Chu Qing - xin. Extraction of finite transmission zeros of general Chebyshev filters[C]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings, 2004: 272 - 274.

# Synthesis of General Chebyshev Filters by a Novel Optimization

JIAO Wei, GUAN Bo-ran

(School of Electronics Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

**Abstract:** An efficient recursive method is used to generate the Chebyshev transfer and reflection polynomials, it's a classical method in synthesis of general Chebyshev filters by Mr. Cameron. Then, a novel simple optimal method is introduced by using model and optimized circuit. The circuit is composed of resonators and impedance converters. The circuit's characteristic is simple configuration, less time consuming, and exact results. Last, compare the results with two methods, the validation and efficiency of the new method has been shown.

**Key words:** general Chebyshev filters; optimized circuit; cross - coupling

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、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/>