

基于 Y 参数的快速滤波器设计方法

李 刚

(湖北文理学院 物理与电子工程学院, 湖北 襄阳 441053)

摘 要 针对三维全波仿真提取微波谐振腔耦合系数耗时长和提取结果不易被收敛的问题, 提出了一种基于等效电路 Y 参数的耦合系数提取方法, 并将该方法应用到改进的渐进空间映射算法的参数提取过程中, 提高了滤波器的设计效率。通过一个 4 腔同轴腔体滤波器的设计实例进行了验证, 滤波器的电磁仿真结果与理论综合结果吻合良好, 证实了该方法的有效性。

关键词 耦合谐振腔; 奇偶模; 耦合系数; Y 参数

中图分类号 TN713.5 文献标识码 A 文章编号 1007-7820(2014)11-113-03

Fast Filter Design Method Based on the Y Parameter

LI Gang

(School of Physics and Electronic Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China)

Abstract The 3D full wave simulation of filters for coupling coefficient extraction is time-consuming and it is difficult to converge the extraction result. A method for extracting coupling coefficient based on the Y parameter of equivalent circuit is proposed and used in the extraction of the aggressive space mapping algorithm to improve the efficiency of filter design. A design example of a 4 cavity coaxial cavity filter is provided. Simulation results are in good agreement with the theory of electromagnetic filter synthesis results, confirming the validity of the proposed method.

Keywords coupled resonator; odd even mode; coupling coefficient; the y parameter

微波无源滤波器设计中经常要计算谐振腔之间的耦合系数^[1-2]。传统的方法是通过三维仿真软件分别计算出单个谐振腔的奇偶模频率^[3-4], 然后应用奇偶模频率与耦合系数的关系, 进一步求出谐振腔之间的耦合系数。由于谐振腔是一个高 Q 值的谐振结构, 在进行数值运算时, 收敛时间长甚至经常出现假收敛的情况。尤其对于两个谐振腔各自谐振频率不同的情况, 需要单独提取各个谐振腔对应的奇偶模频率, 数值运算次数至少 4 次以上, 耦合系数提取步骤繁琐, 耗时较长。本文提出一种基于等效电路 Y 参数的耦合系数提取方法, 该方法通过一次仿真能提取耦合系数和谐振频率等多个参数, 并且仿真收敛一致性好, 解决了数值计算过程中收敛缓慢甚至假收敛的问题。

1 基本理论

1.1 Y 参数等效模型

根据电路基础理论, 一个互易的无源二端口网络的 Y 参数定义如下

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{12} & y_{22} \end{bmatrix} [U] = [I] \quad (1)$$

式(1)对应的等效电路, 如图 1 所示。

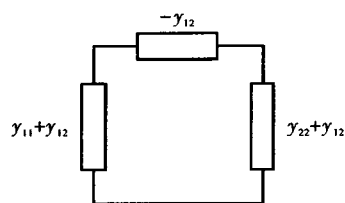


图 1 Y 矩阵对应的等效电路

将图 1 中的电路图进行变形, 得到如图 2 所示的结果。中间 3 个元件的 ABCD 参数求解如下

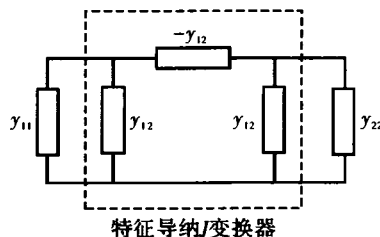


图 2 等效电路电路变形

$$[ABCD] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ y_{12} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1/y_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ y_{12} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/y_{12} \\ y_{12} & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

收稿日期: 2014-04-15

基金项目: 湖北文理学院博士科研基金资助项目(2013B006)

作者简介: 李刚(1983—), 男, 博士, 讲师。研究方向: 微波有源和无源系统设计, 电磁兼容, 嵌入式系统设计。E-mail: anson_ligang@163.com

假设网络中的元件是一个纯的电纳,代入到式(2)中,得到如下关系

$$[ABCD] = \begin{bmatrix} 0 & j \cdot \frac{1}{J} \\ j \cdot J & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)对应的正好为特征导纳为 J 的变换器模型。从上面的推导中可以得出结论,图2中的虚线部分可等效为特征导纳为 J 的变换器。上述推导过程与具体频率无关,能适用于所有频率。可将图2进一步推广到图3的结构。

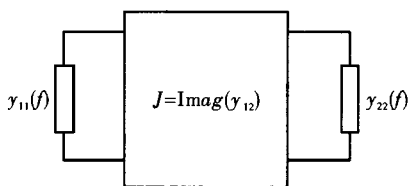


图3 一般的Y参数等效电路

二端口网络两边的导纳推广为频率 f 的函数,中间是特征导纳 $J = \text{imag}(y_{12})$ 的导纳变换器。图3中的模型可对应两个谐振腔耦合的模型。根据耦合谐振腔的耦合系数的定义

$$k_{ij} = \frac{J}{\sqrt{B_i B_j}} \quad (4)$$

将式(4)中的参数用Y参数表示,推导出用Y参数表示的耦合系数的公式

$$k_{ij} = \frac{\text{imag}(y_{i,j})}{\sqrt{\frac{\partial y_{ii}}{\partial f} \cdot \frac{\partial y_{jj}}{\partial f}}} \quad (5)$$

进一步,根据Y参数的物理意义,若谐振腔谐振,则对应的Y参数虚部等于0。可得出各腔体谐振频率的表达式

$$f_{0i} = \text{roots}[\text{imag}(y_{ii}) = 0] \quad (6)$$

至此,已推导出用电路Y参数表示耦合系数和谐振腔频率的公式。从上述公式可看出,只要知道谐振腔电路的Y参数,就能一次计算出耦合系数和谐振频率,上述不仅适用于两个谐振腔情况,同样适用于多个谐振腔情况。由于能一次将耦合系数和各个谐振腔的频率信息提取出来,所以Y参数法提取效率得到大幅提高。

1.2 渐进空间映射算法

传统的初始空间映射算法^[5-6]必须给定多个精确模型设计点,且全部进行精确空间仿真,这些仿真结果被用于参数抽取中提供全阶条件样本,再建立两空间映射关系,而且映射关系被假设为线性的。渐进空间映射算法(ASM)^[7-8]改进了初始空间映射方法的不足,从第一次精确模型仿真开始到最后,每次的精确模型仿真都参与了参数抽取和两空间映射关系的建立,并预测下一个改善的精确模型新设计参量。因此,精

确空间设计参量是自适应步进,逐渐逼近理想模型设计参量。该算法结合了应用古典Broyden公式的拟牛顿迭代法,能够解决非线性映射问题,不用预先假设两空间之间的映射关系。

假设在精确模型和粗糙模型的设计参量空间之间存在映射 P

$$x_c = P(x_f) \quad (7)$$

式中, x_c 表示粗糙模型参量; x_f 表示精确模型参量; 标 c 表示粗糙空间变量; f 表示精细空间变量。根据两空间的响应匹配条件

$$R_c(P(x_f)) = R_f(x_f) \quad (8)$$

式中, R_c 表示粗糙空间响应; R_f 表示精确空间响应。式(1)中映射 P 的雅克比矩阵为

$$J_P = J_P(x_f) = \left(\frac{\partial P^T}{\partial x_f} \right)^T = \left(\frac{\partial x_c^T}{\partial x_f} \right)^T \quad (9)$$

利用同阶的矩阵 B 近似映射 P 的雅克比矩阵,即 $B \approx J_P(x_f)$ 。从式(2)可知

$$J_f = J_c B \quad (10)$$

式中, J_f 和 J_c 分别为精确模型响应与粗糙模型响应相当于各自设计参量的雅克比矩阵。从式(4)可获得矩阵 B 的表达式

$$B = (J_c^T J_c)^{-1} J_c^T J_f \quad (11)$$

所以 B 就是联系粗糙空间设计参量微分位移随精确空间设计参量微分位移变化的矩阵。假设在第 j 次迭代中,误差矢量估算为

$$f^{(j)} = f^{(j)}(x_f^j) = P^{(j)}(x_f^j) - x_c^* \quad (12)$$

式中, x_c^* 表示粗糙空间中的最优解,上式需求得 $P^{(j)}(x_f^j)$,可通过参数抽取过程间接得到,即用 x_c^j 代替。通过下式获取精确模型空间的拟牛顿步长 $h^{(j)}$

$$B^{(j)} h^{(j)} = -f^{(j)} \quad (13)$$

将 $B^{(j)}$ 代入式(7),计算得到下次迭代步长,精确模型新的预测设计参量

$$x_f^{(j+1)} = x_f^{(j)} + h^{(j)} \quad (14)$$

若 $\|f^{(j)}\|$ 足够小,则算法终止,得到 $x_f = P^{-1}(x_c^{(*)})$ 的近似结果和映射矩阵 B ;否则,重复上述迭代过程直到算法收敛。

在上述渐进空间映射算法中有一个重要的过程就是参数抽取,一般采用曲线拟和的方法,这个方法耗时较长,在效率上降低了空间映射算法的优势。本文在参数抽取过程中,引入了前述的Y参数法,加快了参数提取的效率。

2 应用实例

现在用一个如图1所示的4腔的同轴腔滤波器的设计实例来验证上述方法的有效性。滤波器的中心频

率为 1 GHz,相对带宽为 0.021 9,带内的回波损耗为 21 dB。采用切比雪夫响应,采用文献[5~6]中的综合方法得到外部 Q 值和耦合系数分别为 $Q=40.738\ 7$, $M_{12}=M_{34}=0.020\ 5$, $M_{23}=0.015\ 6$,各腔的谐振频率均为 1 GHz。这些参数即为粗糙空间的最优理论值。由于滤波器的结构对称,实际需要调整的参数有 5 个,在图 4 中标出。

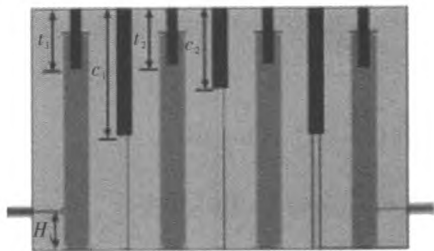


图 4 滤波器的结构示意图

图 5 给出了滤波器的初始响应,且对比了用 HFSS 仿真得到的响应和用 Y 参数法抽取参数后仿真得到的响应。从图中曲线可看出,两者吻合良好,说明 Y 参数法用于参数抽取是准确的,但是滤波器的响应与理论设计的响应差距较大。

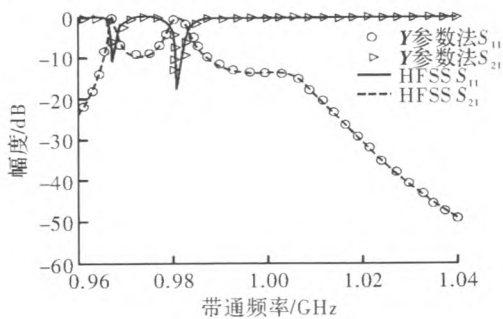


图 5 滤波器响应

图 6 所示为经 4 次迭代后滤波器尺寸对应的最终响应与理论设计响应可看出,现在的滤波器响应已接近理论模型的响应。迭代过程中抽取的粗糙空间参数见表 1,迭代过程中 HFSS 中滤波器实际调整尺寸如表 2 所示。

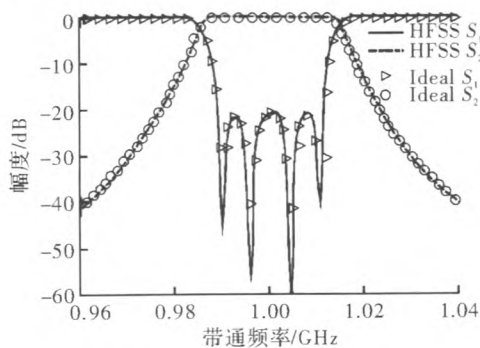


图 6 最终尺寸对应的 HFSS 仿真结果

表 1 迭代过程中 Y 参数法提取出来的数据

Q	M_{12}	M_{23}	f_1	f_2
38.521 9	0.020 1	0.015 4	1.002 3	0.977 3
44.383 4	0.021 1	0.015 9	0.998 7	1.001 7
41.117 9	0.020 2	0.015 3	1.001 6	1.000 4
40.881 7	0.020 4	0.015 5	0.999 7	0.999 3
40.152 3	0.020 6	0.015 7	1.000 5	1.000 5
40.738 7	0.020 5	0.015 6	1.000 0	1.000 0

注:最后一行是粗糙空间最优值

表 2 迭代过程中滤波器实际调整尺寸

H_1	C_1	C_2	t_1	t_2
7.758 9	26.275 1	16.653 2	12.328 6	12.336 0
7.482 2	26.865 2	16.926 4	12.407 8	11.485 5
7.877 4	25.806 9	16.059 6	12.364 5	11.550 9
7.921 8	26.254 8	16.630 0	12.420 9	11.567 1
7.938 6	26.398 5	16.642 0	12.411 7	11.544 8

3 结束语

通过将等效电路 Y 参数的耦合系数提取方法应用到渐进空间映射算法的参数提取过程中,提高了滤波器的设计效率。用一个 4 腔同轴滤波器的实例进行了验证,仿真结果验证了文中方法的正确性和有效性。该方法还可以应用到交叉耦合同轴腔滤波器等其他形式的滤波器设计中。

参考文献

[1] CAMERON R J. General coupling matrix synthesis methods for Chebyshev filtering functions [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 1999, 47(4): 433-442.

[2] MENG Wei, WU Keli. Analytical diagnosis and tuning of narrowband multicoupled resonator filters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 2006, 54(10): 3765-3771.

[3] MACCHIARELLA G, TRAINA D. A formulation of the Cauchy method suitable for the synthesis of lossless circuit models of microwave filters from lossy measurements [J]. IEEE Microw Wireless Compon Letter, 2006, 16(5): 243-245.

[4] LI Gang, DAI Xiwang, LIANG Changhong. Fast synthesis of coupled resonator filters [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2008, 22(5): 705-714.

[5] KOZIEL S, BANDLER J W, MADSEN K. A space mapping frame work for engineering optimization: theory and implementation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 2007, 54(10): 3721-3730.

[6] BANDLER J W, CHENG Q S, DAKROURY S A. et al. Space mapping: the state of the art [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 2004, 52(10): 337-361.

[7] KOZIEL S, BANDLER J W. Interpolated coarse models for microwave design optimization with space map - ping [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 2007, 55(8): 1739-1746.

[8] KOZIEL S, BANDLER J W. Space mapping with multiple coarse models for optimization of microwave components [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 2008, 18(1): 1-3.

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/>