

基于渐进空间映射法的同轴腔体滤波器设计

徐迎虎, 项铁铭

(杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 该文主要介绍了利用渐进空间映射法优化设计同轴腔体交叉耦合滤波器的方法。在 HFSS 和 ADS 软件中分别建立了滤波器的结构模型和等效电路模型, 在 ADS 软件中进行了反映模型参数映射关系的参数提取, 提取的参数精度高并且速度快。整个设计过程仅需进行 5 次精确模型仿真与 5 次粗糙模型仿真, 即可优化得到一个十分接近理想响应的高性能四腔交叉耦合滤波器。从而证明了此优化方法的可行, 高效。

关键词: 渐进空间映射法; 交叉耦合滤波器; 参数提取

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 1001-9146(2011)02-0029-04

0 引言

近年来发展起来的空间映射算法作为一种新型的优化算法, 在微波器件设计中得到了广泛的应用^[1]。它通过在高精度却耗时的精确模型和低精度却快速的粗糙模型建立的映射关系, 将优化工作放在了粗糙模型中进行, 用精确模型验证粗糙模型得出的结果, 通过多次迭代, 便可得到满意的结果, 大大的提高了设计效率。在设计软件中, 以电路为基础的软件 ADS 计算速度快并且很方便优化, 电磁仿真软件如 HFSS 计算时很耗时间, 但是计算精度很高。在运用空间映射算法的文献中, 滤波器的模型多数为一些简单的微带结构^[2,3], 很少有腔体滤波器的文献。文献 4 中设计的同轴腔体滤波器, 参数提取阶段采用了柯西法, 虽然提高了参数提取的速度, 但是提取的参数未必满足设计的拓扑结构, 参数提取后, 仍然需要进行优化。本文在 HFSS 中建立的同轴腔体滤波器模型作为精确模型, 在 ADS 中建立了相应的等效电路模型作为粗糙模型, 参数提取过程在 ADS 软件中进行, 相比文献 4 更具有适用性, 后面的实例证明了该方法的有效性。

1 渐进空间映射算法

渐进空间映射算法, 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:

$$x_c = P(x_f) \quad (1)$$

式中, x_c 表示粗糙模型参量, x_f 表示精确模型参量。使得两空间的响应匹配:

$$R_c(P(x_f)) \approx R_f(x_f) \quad (2)$$

式中, $R_c(P(x_f))$ 表示粗糙模型的响应, $R_f(x_f)$ 表示精确模型的响应。

收稿日期: 2010-05-14

作者简介: 徐迎虎(1986-), 男, 江苏盐城人, 在读研究生, 电磁场与微波技术。

式 1 中的映射 P 的雅可比矩阵为:

$$\mathbf{J}_P = \mathbf{J}_P(\mathbf{x}_f) = \left(\frac{\partial \mathbf{P}^T}{\partial \mathbf{x}_f} \right)^T = \left(\frac{\partial \mathbf{x}_c}{\partial \mathbf{x}_f} \right)^T \quad (3)$$

\mathbf{B} 近似映射 P 的雅可比矩阵, 即 $\mathbf{B} \approx \mathbf{J}_P(\mathbf{x}_f)$ 。从式 2 可知:

$$\mathbf{J}_f = \mathbf{J}_c \mathbf{B} \quad (4)$$

式中, \mathbf{J}_f 和 \mathbf{J}_c 分别为精确模型响应与粗糙模型响应相对于各自设计参量的雅可比矩阵。从式 4 可以获得矩阵 \mathbf{B} 的表达式:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{J}_c^T \mathbf{J}_c)^{-1} \mathbf{J}_c^T \mathbf{J}_f \quad (5)$$

所以 \mathbf{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:

$$\mathbf{f}^{(j)}(\mathbf{x}_f^{(j)}) = \mathbf{P}^{(j)}(\mathbf{x}_f^{(j)}) - \mathbf{x}_c^* \quad (6)$$

式中, \mathbf{x}_c^* 表示粗糙空间中的最优解, 式 6 需要求得 $\mathbf{P}^{(j)}(\mathbf{x}_f^{(j)})$, 可以通过参数抽取过程间接得到, 即用 $\mathbf{x}_c^{(j)}$ 代替。获取精确模型空间的拟牛顿步长 $\mathbf{h}^{(j)}$:

$$\mathbf{h}^{(j)} = -\mathbf{f}^{(j)}(\mathbf{B}^{(j)})^{-1} \quad (7)$$

由式 7 可求得下一阶迭代变量值:

$$\mathbf{x}_f^{(j+1)} = \mathbf{x}_f^{(j)} + \mathbf{h}^{(j)} \quad (8)$$

如果 $\|\mathbf{R}_f(\mathbf{x}_f^{(j+1)}) - \mathbf{R}_c(\mathbf{x}_c^*)\|$ 足够小, 则迭代过程停止, 得到 $\mathbf{x}_f = \mathbf{P}^{-1}(\mathbf{x}_c^*)$ 的近似结果和映射矩阵 \mathbf{B} 。否则, 重复上述迭代过程直到算法收敛。

求解式 6 中的 \mathbf{B} , 需要获得相应点 \mathbf{x}_c 和 \mathbf{x}_f 的雅可比值 \mathbf{J}_c 和 \mathbf{J}_f , 且要求 \mathbf{J}_c 是满秩矩阵, 且行数 $m \geq$ 列数 n 。实际运用时, \mathbf{B} 可用 Broyden 公式更新:

$$\mathbf{B}^{(0)} = \mathbf{I} \quad (9)$$

$$\mathbf{B}^{(j+1)} = \mathbf{B}^{(j)} + \mathbf{h}^{(j)T} \mathbf{f}^{(j+1)} / (\mathbf{h}^{(j)T} \mathbf{h}^{(j)}) \quad (10)$$

2 设计实例

以四腔的交叉耦合滤波器的设计实例来具体介绍此方法, 滤波器的通带频率为 1.92 ~ 1.98 GHz, 带内回波损耗为 20 dB, 偏离中心频率 60 MHz 外衰减大于 30 dB。为了提高选择性, 在 1.89 GHz 处和 2.01 GHz 处添加了传输零点。腔体模型为一个四腔对称结构, 如图 1 所示, 设计参量为 $t_{12}, t_{23}, t_{14}, h, t_{\text{tune1}}, t_{\text{tune2}}$ 。其中, t_{12}, t_{23} 分别代表腔 1 和腔 2、腔 2 和腔 3 间耦合调节螺钉的高度, t_{14} 代表耦合探针的长度, h 是抽头的高度, $t_{\text{tune1}}, t_{\text{tune2}}$ 分别为腔 1 和腔 2 频率调节螺钉的高度。在 ADS 中优化得出的粗糙模型最优参数为: 耦合系数 $M_{12} = M_{34} = 0.0268, M_{23} = 0.0236, M_{14} = -0.0052$, 外部品质因素 $Q = 31.0203$ 。

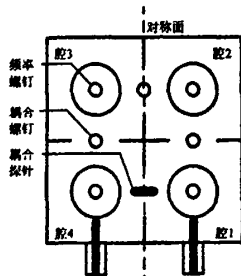


图 1 四腔交叉耦合滤波器的投影图

空间映射算法中, 最重要的一个环节就是参数提取, 参数提取的精度直接影响到算法收敛。电路仿

真软件 ADS 有很好的优化功能,本文在 ADS 软件中建立相应的电路模型作为粗糙模型,整个参数提取过程在 ADS 软件中进行。将 HFSS 中计算出的 S 参数文件导入到 ADS 软件中,利用 ADS 软件的优化、拟合功能,使电路响应曲线不断地逼近电磁仿真的曲线,直到曲线拟合到一起,从而完成了参数提取。对于本文的滤波器设计,设定提取的参数为 $[M_{12}, M_{23}, |M_{14}|, Q, f_1, f_2]$,其中, M_{12} 、 M_{23} 分别代表腔 1 与腔 2、腔 2 与腔 3 之间的耦合系数, $|M_{14}|$ 代表腔 1 与腔 4 的耦合系数的绝对值(M_{14} 耦合系数的极性与 M_{12} 、 M_{23} 相反), Q 代表输入输出的外部品质因素, f_1 、 f_2 分别代表腔 1 与腔 4、腔 2 与腔 3 的谐振频率,等效电路图如图 2 所示。其中,优化的目标函数为:

$$F = \text{abs}(S_{21}^e - S_{21}^f) + \text{abs}(S_{11}^e - S_{11}^f) \quad (9)$$

式中, S_{ij}^e 和 $S_{ij}^f(j=1, i=1,2)$ 分别代表粗糙模型和精确模型的 S 参数的分贝值。经过优化逼近后,得到了提取的参数,运用式 6,7,8,便计算得到下次迭代的精确模型参量。

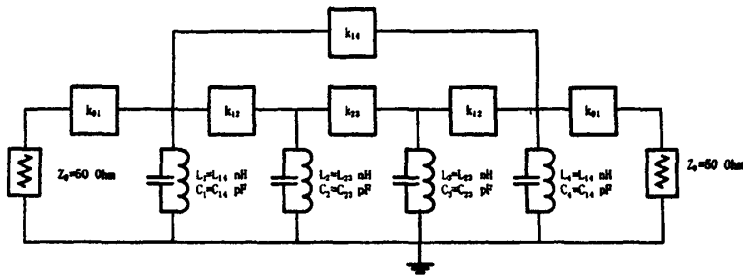


图 2 等效电路模型

根据指标综合出耦合矩阵与 Q 值后^[5],设计的腔体模型初始响应如图 3 所示。图 3 中实线是精确模型的曲线,虚线是在 ADS 中拟合的曲线,可见吻合的情况很好,说明了采用优化的方法进行参数提取是可行的,并且整个优化过程只耗时 130 s。通过第一次迭代,滤波器的响应已经有了很大改善,带内回损在 14dB 以下,但是中心频率仍然有所偏移,如图 4 所示。

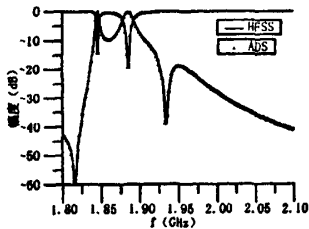


图 3 滤波器初始模型响应

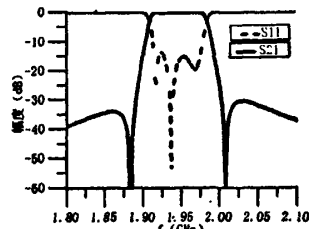


图 4 第一次迭代的响应

第二次迭代的结果如图 5 所示,可见滤波器已经基本符合设计要求。滤波器理想响应(粗糙模型的最优响应)与第四次迭代的响应对比如图 6 所示,可见曲线吻合地很好,滤波器满足设计指标,迭代

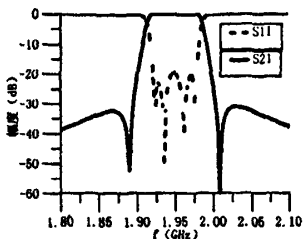


图 5 第二次迭代的响应

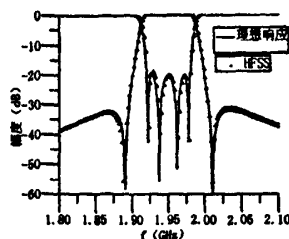


图 6 第四次迭代的响应与理想响应的比较

结束。迭代过程中提取的参数如表 1 所示,滤波器的尺寸变化如表 2 所示。

表 1 迭代过程中提取的数据

迭代次数	M_{12}	M_{23}	$ M_{14} $	Q	f_1 (GHz)	f_2 (GHz)
1	0.026 0	0.246 8	0.005 0	36.552 6	1.927 20	1.874 70
2	0.027 9	0.023 6	0.005 4	29.804 5	1.951 30	1.945 90
3	0.026 2	0.022 8	0.004 9	31.769 3	1.948 40	1.948 80
4	0.026 8	0.023 3	0.005 3	31.020 3	1.949 95	1.949 98

表 2 迭代过程中滤波器的尺寸变化 (mm)

迭代次数	l_{12}	l_{23}	l_{14}	h	t_{tune1}	t_{tune2}
1	16.76	14.78	9.60	4.853 5	6.499	5.763
2	16.44	14.78	9.55	4.745 5	6.515	5.715
3	16.56	14.96	9.65	4.786 0	6.502	5.700
4	16.56	15.16	9.60	4.786 0	6.502	5.700

3 结束语

本文主要介绍了利用渐进空间映射算法设计同轴腔体滤波器的方法,整个设计过程仅需进行 5 次精确模型的仿真与 5 次粗糙模型的仿真。而用 HFSS 软件直接对滤波器的结构进行优化的话,由于参数较多,且结构参数的灵敏度高,很难通过少量的计算就得到好的结果。因此在腔体滤波器的设计过程中,引入渐进空间映射算法,可以极大的减少优化时间,提高效率。该方法也可以应用在其他形式的滤波器设计以及双工器设计中。

参考文献

- [1] Bandler J W, Biernacki R M, Chen S H, etal. Space mapping technique for electromagnetic optimization [J]. IEEE Trans on Microwave Theory Tech, 1994, 42(12): 2 536 - 2 544.
- [2] Chen Q S, Bandler J W, Kiecol S. Combining coarse and fine models for optimal design [J]. IEEE microwave magazine, 2008, 35(10): 79 - 88.
- [3] Koziel S, Bandler J W. Interpolated coarse models for microwave design optimization with space-mapping [J]. IEEE Trans on Microwave Theory Tech, 2007, 55(8): 1 739 - 1 746.
- [4] 李刚. 基于改进渐进空间映射算法的滤波器设计方法[J]. 应用科技, 2009, 36(3): 5 - 7.
- [5] Cameron R J. General coupling matrix synthesis methods for Chebyshev filtering functions [J]. IEEE Trans on Microwave Theory Tech, 1999, 47(4): 433 - 442.

Design of Coaxial Filter Based on Aggressive Space Mapping

XU Ying-hu, XIANG Tie-ming

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

Abstract: This paper introduces the method of using aggressive space mapping technique to optimize the co-axial cavity cross-coupled filter. In the HFSS and ADS software, the structure model and the equivalent circuit model of the filter are established respectively, parameter extraction that reflected the mapping relationship was carried out in the ADS software, the extracted parameters is high accuracy and very fast. Throughout the design process only needed five accurate model simulations and five coarse model simulations, optimization can be very close to the ideal response of a high-performance four order cross-coupled filter. It is proved that this optimization method is feasible and efficient.

Key words: aggressive space mapping; cross coupling filter; parameter extraction

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/>