

文章编号 1005-0388(2007)01-0153-05

广义切比雪夫滤波器耦合矩阵的优化提取*

韩世虎 王锡良 樊 勇

(电子科技大学电子工程学院电子系统工程研究所, hanshmail@yahoo.com.cn, 四川 成都 610054)

摘 要 为了提取广义切比雪夫滤波器的耦合矩阵, 通过采用单纯形算法和梯度法相结合, 先用单纯形算法进行初步搜索, 成功则结束。否则将结果值作为梯度法初值, 然后利用梯度法进行二次搜索, 从而提取出耦合矩阵中各个元素值。最后, 对于给定的滤波器拓扑结构, 任意设置有限远处的传输零点位置, 运用混合方法编写出的程序提取出耦合矩阵。这种混合算法未增加算法难度而提高了效能。三个耦合矩阵提取实例证明了这种混合方法的有效性。

关键词 广义切比雪夫, 耦合矩阵, 带通滤波器, 优化方法

中图分类号 TN61

文献标识码 A

Optimization method for extracting coupling matrix of generalized chebyshev filter

HAN Shi-hu WANG Xi-liang FAN Yong

(Institute of Electronic system and Engineering of School of Electronic Engineering, UESTC of China, hanshmail@yahoo.com.cn, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract To extract the coupling matrix of generalized chebyshev filter, a hybrid technology of simplex method and analytic gradients method is presented in this paper. Firstly, the simplex method is used to search elements of coupling matrix roughly, then, the search results are taken as the initial values of analytic gradients method for extracting the elements of coupling matrix. Finally, for given topology of filter, the coupling matrix with arbitrary finite transmission zeros is extracted. Three examples of extraction of coupling matrix show the validity of hybrid methods.

Key words generalized chebyshev, coupling matrix, bandpass filter, optimization methods

1 引 言

现代通信系统的迅猛发展, 对于微波滤波器^[1,2]的选择性和小型化要求越来越高。广义切比雪夫滤波器由于其小体积和高性能正被广泛地应用于各种微波系统中。Atia 和 Williams^[3~5]最早提出对称广义切比雪夫滤波器耦合矩阵的综合, 又采用优化的方法提取了对称和非对称结构的耦合矩阵。

传统的矩阵变换的方法^[6]只适用于特定拓扑结构, 不是每种矩阵都能得到最简单的拓扑结构, 直接综合法^[7~8]又缺乏通用性, 而优化提取方法则不受这个限制。但是, 优化提取方法有时候不能收敛到期望值。于是各种各样的耦合矩阵优化提取方法^[5,9,10]应运而生。

单纯形算法^[11]是一种无约束最优化的直接搜索方法, 它对于初值不敏感, 但是它的精度没有梯度

法高。对于一般简单的拓扑结构,可以提取出耦合矩阵,但对于复杂拓扑结构(如 Cul-de-sac)和高阶滤波器则不行。梯度法收敛很快,但是如果其初值选取不当,当遇到复杂拓扑或高阶滤波器时,经常会收敛到局部最小而非全局最优^[12]。文献[12]采用改良算法目标函数来提高梯度法的有效性,但算法难度增加。本文采用两种优化方法相结合,利用单纯形算法先初步搜索,结果合格就结算。不合格就将其结果值做为梯度法^[10]的初值进行二次搜索,成功提取了较复杂拓扑结构的滤波器耦合矩阵元素值。这种混合方法采用 Matlab 进行编程,未增加算法难度,但提高了算法的有效性。

最后对于给定的滤波器拓扑结构,任意设置有限远处的传输零点位置,运用混合方法编写的程序提取出耦合矩阵,根据低通到带通的频率转换,利用耦合矩阵画出频响图,图形的零点位置和给定值吻合得很好。

2 基本理论

2.1 广义切比雪夫

滤波器传递函数根据其相应的传输零点位置 z_i 和反射极点 p_i 可以写为:

$$S_{11} = \frac{F_N(s)}{E_N(s)} \frac{\prod_{i=1}^N (s - p_i)}{E_N(s)} \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{P_N(s)}{\epsilon E_N(s)} \frac{\prod_{i=1}^N (s - z_i)}{\epsilon E_N(s)} \quad (2)$$

其中: $\epsilon = \frac{1}{\sqrt{10^{RL/10} - 1}}$, RL 为回波损耗电平(单位是 dB)。故滤波器优化时的目标函数定义为:

$$U = k_1 \cdot \sum_{i=1}^N |S_{11}(w_{p_i})|^2 + k_2 \cdot \sum_{i=1}^N |S_{21}(w_{z_i})|^2 + (|S_{11}(w = -1)| - 10^{-RL/10})^2 + (|S_{11}(w = 1)| - 10^{-RL/10})^2 \quad (3)$$

其中: $w_{z_i} = -jz_i$, $w_{p_i} = -jp_i$, k_1 和 k_2 为权值,在优化过程中调整合适的权值以取得全局最优。

2.2 单纯形算法

单纯形法是一种无约束最优化的直接方法。所谓单纯形是指 n 维空间 E^n 中具有 $n+1$ 个顶点的凸多面体。比如,一维空间中线段,二维空间中的三角形,三维空间中的四面体等,均为相应空间中的单纯形。若单纯形中 $n+1$ 个顶点中任意两点间的距离都相等,则称此单纯形为正规单纯形。它的基本思想

是:构造 E^n 空间中的一个初始单纯形,求出 $n+1$ 个顶点上的函数值,确定有最大函数值的点(称为最高点)和最小函数值的点(称为最低点),然后通过反射、扩展、压缩等方法求出一个较好点,用它代替最高点,构成新的单纯形,如此循环,直到逼近极小点。

单纯形算法的详细步骤见参考文献[12]。使用 Matlab^[13]优化工具箱编写出搜索程序。

2.3 梯度法

对于全耦合的电路,定义 M 为耦合矩阵,则 M 是对称的。假定一个矩阵 T :

$$\text{当 } M_{ij} \neq 0 \text{ 时, } T_{ij} = 1;$$

$$\text{当 } M_{ij} = 0 \text{ 时, } T_{ij} = 0.$$

$$\text{令 } A = \omega U - jR + M \quad (4)$$

上式中 U 是单位矩阵, R 矩阵中除了 $R_{11} = R_1$ 和 $R_{NN} = R_2$ 其它元素均为零。

则推导出(当 $p \neq q$):

$$\frac{\partial S_{11}}{\partial M_{pq}} = -4jR_1 T_{pq} A_{1p}^{-1} A_{q1}^{-1} \quad (5)$$

$$\frac{\partial S_{21}}{\partial M_{pq}} = 2j \sqrt{R_1 R_2} T_{pq} (A_{Np}^{-1} A_{q1}^{-1} + A_{Nq}^{-1} A_{p1}^{-1}) \quad (6)$$

对于 $p=q$,可以简单的将上两式令 $p=q$,并除以 2 就得:

$$\frac{\partial S_{11}}{\partial M_{pp}} = -2jR_1 T_{pp} A_{1p}^{-1} A_{p1}^{-1} \quad (7)$$

$$\frac{\partial S_{21}}{\partial M_{pp}} = 2j \sqrt{R_1 R_2} T_{pp} A_{Np}^{-1} A_{p1}^{-1} \quad (8)$$

上面(5)到(8)式就是梯度法计算方程。其中 R_1 和 R_2 采用文献[4]的方法提取。

根据上面两种算法的基本原理和推导公式,利用 Matlab 编写出采用混合方法提取广义切比雪夫滤波器耦合矩阵的程序。

3 数值例子和结果

为了验证算法的有效性,通过综合 3 种拓扑结构的广义切比雪夫滤波器,其中包括了对称和非对称的情况。所有的例子中,其回波损耗均设置为 -23 dB。由于矩阵的元素代表一定的物理意义,为使优化值能够在物理结构上实现,故单纯形算法的初值一般设置为 0.5 和 0(直接耦合值的设为 0.5,交叉耦合值设为 0)。当然,所选定的拓扑结构要实现需要的零点数目。算法流程图如图 1 所示。首先给定一个初值,使用单纯形算法进行搜索,合格就结束。否则将其结果值送入梯度法进行搜索,结果正确则结束,结果不对则改变目标函数权值再用梯度法搜索。

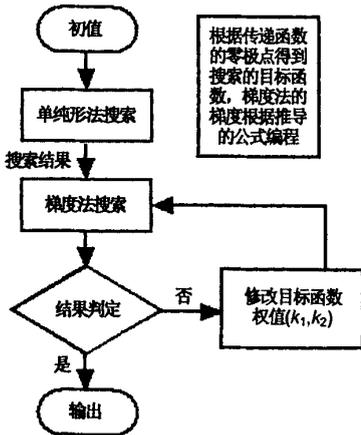


图 1 算法流程图

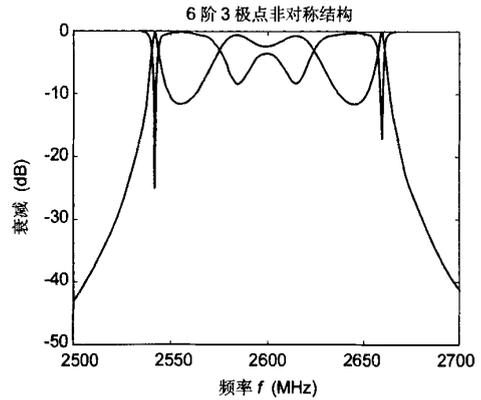


图 3 6 阶 4 零点非对称结构频响图

最后,给定有限远处的传输零点位置(零点位置为低通原型值),将混合方法编写的程序优化提取了以下拓扑结构的对称和非对称的广义切比雪夫滤波器的耦合矩阵。并将提取的耦合矩阵在给定带宽下画出了带通滤波器的频响曲线来进行验证。

单纯形法提取的耦合矩阵如下所示:其中 $R_1 = R_2 = 0.7091$:

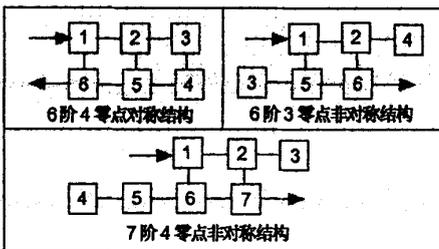


图 2 综合例子的拓扑结构

$$M = \begin{bmatrix} 0.2818 & 0.8380 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0115 & 0.0000 \\ 0.8380 & -0.0658 & 0.0000 & 0.0010 & 0.0000 & 0.8380 \\ 0.0000 & 0.0000 & -0.0457 & 0.0000 & 0.1788 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0010 & 0.0000 & -0.4637 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0115 & 0.0000 & 0.1788 & 0.0000 & -0.2905 & 0.0115 \\ 0.0000 & 0.8380 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0115 & 0.2817 \end{bmatrix}$$

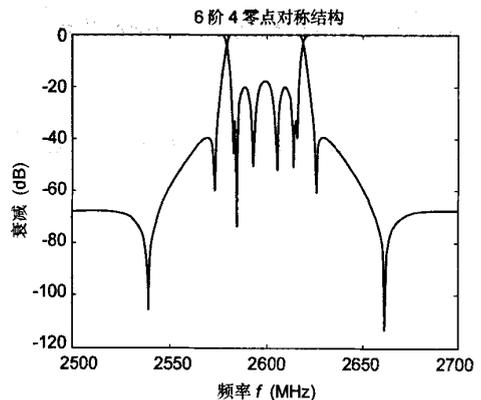


图 4 单纯形算法搜索值的频响图

例 1: 6 阶 4 零点对称结构

零点位置: $z_1 = \pm j1.5, z_2 = \pm j3.5$,

其中 $R_1 = R_2 = 1.1154$,

由于拓扑结构简单,对角线元素全部为零,故只采用单纯形算法就可提取出耦合矩阵的元素值。

$$M = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.8845 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0108 \\ 0.8845 & 0.0000 & 0.5962 & 0.0000 & -0.1684 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.5962 & 0.0000 & 0.7230 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.7230 & 0.0000 & 0.5962 & 0.0000 \\ 0.0000 & -0.1684 & 0.0000 & 0.5962 & 0.0000 & 0.8845 \\ 0.0108 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.8845 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

根据耦合矩阵得到的频响曲线如图 3:

对于复杂拓扑结构,必须采用混合方法才能提取出需要的耦合矩阵。如下:

例 2: 6 阶 3 零点非对称结构

零点位置: $z_1 = j1.5, z_2 = j3, z_3 = j4.5$,

万方数据

最后采用梯度法进行搜索,最终得到如下的耦合矩阵($R_1 = R_2 = 1.1336$)和图 5 的曲线。

$$M = \begin{bmatrix} 0.0336 & 0.6428 & 0.0000 & 0.0000 & 0.6339 & 0.0000 \\ 0.6428 & 0.1572 & 0.0000 & 0.8069 & 0.0000 & 0.6428 \\ 0.0000 & 0.0000 & -0.8960 & 0.0000 & -0.3608 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.8069 & 0.0000 & 0.0795 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.6339 & 0.0000 & 0.3608 & 0.0000 & -0.0740 & -0.6339 \\ 0.0000 & 0.6428 & 0.0000 & 0.0000 & -0.6339 & 0.0336 \end{bmatrix}$$

例 3: 7 阶 4 零点非对称结构

零点位置:

$z_1 = j1.5, z_2 = j2.5, z_3 = -j4, z_4 = -j2.5$

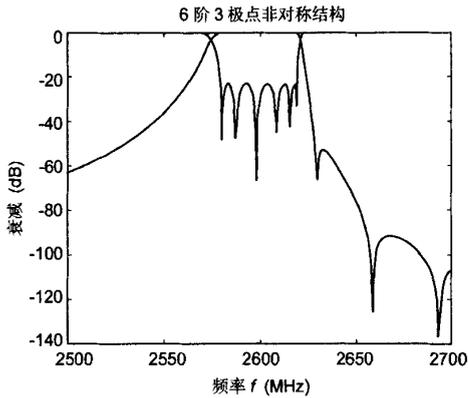


图5 6阶3零点非对称结构频响图

其中 $R_1 = R_2 = 1.1085$, 耦合矩阵如下:

$$M = \begin{bmatrix} 0.0141 & -0.6237 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.6210 & 0.0000 \\ -0.6237 & 0.0377 & -0.6065 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.6237 \\ 0.0000 & -0.6065 & -0.3274 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.6019 & 0.6616 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.6616 & 0.3597 & -0.6213 & 0.0000 \\ 0.6210 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.6213 & -0.0052 & -0.6210 \\ 0.0000 & -0.6237 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.6210 & 0.0141 \end{bmatrix}$$

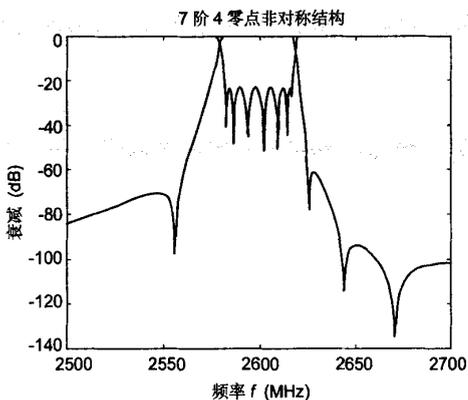


图6 7阶4零点非对称结构频响图

从上面的3个综合结果可以看出,对于任意给定有限远处的传输零点位置,使用混合方法编写的程序提取的耦合矩阵达到了要求,其数值也是物理上可以实现的。

4 结论

采用混合方法优化提取了对称和非对称广义切比雪夫滤波器的耦合矩阵。从文中的例子可以看出,对于给定的拓扑结构,任意设置有限远处的传输零点位置,利用混合方法编写的程序综合出了耦合万方数据

矩阵,其元素值是物理上可以实现的数值。零点位置和频响图吻合得很好,证明了该方法的有效性。

参考文献

- [1] 张本全,王锡良,阮颖铮. 波导金属插片窄带滤波器的研制[J]. 电波科学学报,2002,17(3): 237-239.
Zhang B Q, Wang X L, Ruan Y Z. Design of narrow-band waveguide filters coupled with metal irises[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(3): 237-239.
- [2] 王学东,李英,姬五胜. 带有耦合电容的多层陶瓷带通滤波器[J]. 电波科学学报,2003,18(5):550-552.
Wang X D, Li Y, Ji W S. Multilayer ceramic bandpass filter with coupling capacitor[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(5):550-552.
- [3] A E Atia and A E Williams. Narrow-bandpass waveguide filters [J]. IEEE Trans-MTT, 1972, 20(4): 258-265.
- [4] A E Atia, A E Williams. Narrow-band multiple coupled cavity synthesis [J]. IEEE Trans-circuits and systems, 1974, 21(5): 649-654.
- [5] Walid A Atia, Kawthar A Zaki and Ali E Atia. Synthesis of general topology multiple coupled resonators filters by optimization [J]. IEEE MTT-S Digest, 1998,2: 821-824.
- [6] Richard J Cameron. General coupling matrix synthesis methods for chebyshev filtering functions [J]. IEEE Trans-MTT, 1999,47(4): 433-442.
- [7] Tim Reeves, Nicholas van Stig. A method for the direct synthesis of cascaded quintuplets [J]. IEEE MTT-S Digest, 2002,3:1441-1444.
- [8] J R Montejo-Garai. 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.
- [9] Smain Amari. Synthesis of cross-coupled resonator filters using an analytical gradient-based optimization technique [J]. IEEE Trans- MTT, 2000,48(9):1559-1563.
- [10] Giuseppe Macchiarella. A powerful tool for the synthesis of prototype filters with arbitrary topology [J]. IEEE MTT-S Digest, 2003,3: 1467-1470.
- [11] Lagarias J C, J A Reeds, M H Wright. Convergence properties of the nelder-Mead simplex method in low dimensions [J]. SIAM Journal of Optimization, 1998, 9(1): 112-147.
- [12] A B Jayyousi, M J Lancaster. A Gradient-based optimization technique employing determinants for the

synthesis of microwave coupled filters [J]. IEEE MTT-S Digest, 2003,3: 1467-1470.

- [13] 郭 晶,赵红梅. Matlab6.5 辅助优化计算与设计 [M]. 北京:电子工业出版社,2003,11-77.



韩世虎 (1976—),男,四川人,电子科技大学博士生,主要从事微波电路 CAD 及电磁场数值计算。

王锡良 (1963—),男,江苏人,电子科技大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为电磁场数值计算及无源器件设计。

樊 勇 (1963—),男,四川人,电子科技大学教授,博士生导师,主要从事电磁场理论和微波毫米波技术领域的研究工作。

(上接第 142 页)

- [9] 甄卫民,陈 丽. 中国电离层闪烁监测和预报[J]. 电波科学学报, 2004,19(Sup.):207-208.
- [10] 陈 丽,甄卫民,马宝田. 我国电离层闪烁初步观测结果[J]. 电波科学学报, 2004,19(Sup.):233-235.
- [11] 萧 佐,谢 红. 声重波激发的赤道 Spread-F 不稳定性[J]. 空间科学学报, 1994,14(3).
- [12] 甄卫民,龙其利,马健敏,等. 磁赤道异常区电离层 F 区不均匀体发展过程中的闪烁谱研究[J]. 空间科学学报,1995,15(2).
- [13] 甄卫民,刘瑞源. 电离层闪烁谱特征分析[J]. 空间科学学报,1992,12(2).
- [14] 甄卫民. 电离层闪烁谱特征分析[D]. 硕士学位论文, 1990年3月.



甄卫民 (1963—),男,河北人,研究员,主要研究方向为电波传播技术应用。现任中国空间学会空间物理专业委员会委员,中国 GPS 协会理事,《全球定位系统》杂志编委等。



冯 健 (1981—),男,山东人,现为西安电子科技大学理学院无线电物理专业硕士生。主要从事电波传播技术应用研究及电磁场数值计算的研究。



陈 丽 (1978—),女,山东人,硕士,工程师,主要研究方向为电波传播技术应用。

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/>