

含有频变耦合系数的交叉耦合滤波器优化设计

张永亮^{1,2,4}, 苏涛³, 吴边³, 周润景⁴

(1. 内蒙古大学交通学院 呼和浩特 010070; 2. 内蒙古大学物理学博士后流动站 呼和浩特 010021;
3. 西安电子科技大学天线与微波重点实验室 西安 710071; 4. 内蒙古大学电子信息工程学院 呼和浩特 010021)

【摘要】交叉耦合滤波器由于其小体积和高性能等优点被广泛应用于各种微波系统中。但阶数固定的交叉耦合滤波器能够实现有限传输零点的个数受限。针对该问题,给出一种含有频变耦合系数的交叉耦合滤波器快速优化综合技术。含有频变耦合系数的交叉耦合滤波器在阶数相同的情况下能够实现更多的有限传输零点。首先利用全局优化算法遗传算法进行初步搜索,若满足指标则停止;否则将其结果作为局部优化算法Solvopt的初值进行搜索即可获得指定拓扑结构的耦合矩阵。通过3个优化综合实例证明了该方法的有效性。

关键词 交叉耦合; 滤波器; 频变耦合; 综合

中图分类号 TN713 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2018.04.007

Optimization Synthesis Technique for Cross-Coupled Filter with Frequency Dependent Couplings

ZHANG Yong-liang^{1,2,4}, SU Tao³, WU Bian³, and ZHOU Run-jing⁴

(1. College of Transportation, Inner Mongolia University Hohhot 010070;
2. Post-Doctoral Research Station of College of Physical Science and Technology, Inner Mongolia University Hohhot 010021;
3. Science and Technology on Antenna and Microwave Laboratory, Xidian University Xi'an 710071;
4. College of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University Hohhot 010021)

Abstract Cross-coupled filters with small volume and the high performance are applied widely in various microwave systems. However, the number of finite transmission zeros for cross-coupled filters is limited. However, a cross-coupled filter with frequency dependent couplings can realize more finite transmission zeros than the traditional cross-coupled filters when the filter order is the same. A novel fast filter synthesis technique with frequency dependent couplings is presented in this paper. The global optimization algorithm Genetic Algorithm (GA) searches the optimal solution. If the solution meets the requirement, stop the optimization. Otherwise, the solution of GA as the initial value for Solvopt optimization to search the optimal solution. Three numerical examples show the validity of the synthesis technique in this paper.

Key words cross coupled; filters; frequency dependent coupling; synthesis

通信系统对滤波器的要求越来越严苛,不仅要响应好而且体积要小型化,这使得滤波器的结构变得愈加复杂,对这类滤波器网络综合的方法是近期微波滤波器件的研究热点。在过去二十年间,涌现出大量交叉耦合滤波器综合的方法,比较有代表性的成果是文献[1-6],认为谐振腔之间的耦合系数是不随频率变化的,这在窄带滤波器情况下是成立的。考虑耦合系数的频变效应将会大大提高宽带滤波器设计的准确性^[7-8]。频变耦合系数可以产生额外的有限传输零点^[9],然而文献[7-9]只是针对个别特

殊滤波器进行综合设计,未能给出频变耦合系数滤波器的一般性综合方法。为解决文献[7-9]中的不足,本文给出了含有频变耦合系数交叉耦合滤波器的一般综合方法。对于给定的拓扑结构,利用遗传算法与Solvopt算法即可获得理想的耦合矩阵。遗传算法是一种有效求解全局最优化问题的算法,而Solvopt算法则是一种求解非线性局部极小值的算法。本文在给定耦合矩阵拓扑结构的前提下,首先利用遗传算法搜索耦合矩阵的最优解,将其结构作为Solvopt算法的初值进一步优化,弥补了遗传算法收敛缓慢

收稿日期: 2016-06-16; 修回日期: 2017-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(61761032, 61271017, 61161001)

作者简介: 张永亮(1985-),男,博士,主要从事微波无源器件综合设计及计算机辅助调试方面的研究。

的缺陷。

1 基本理论

含有频变耦合系数的广义切比雪夫滤波器与传统广义切比雪夫滤波器一样, 由其特征多项式 $P(s)$ 、 $F(s)$ 和 $E(s)$ 决定:

$$\begin{cases} S_{11}(s) = F(s)/E(s) = \prod_{i=1}^N (s - p_i) / E(s) \\ S_{21}(s) = P(s)/\varepsilon E(s) = \prod_{i=1}^N (s - z_i) / \varepsilon E(s) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\varepsilon = 1/\sqrt{10^{(RL/10)} - 1}$; RL 为回波损耗。

N 阶滤波函数 $C_N(s)$ 可表示为 $F(s)$ 与 $P(s)$ 的比值:

$$C_N(s) = F(s)/P(s) \quad (2)$$

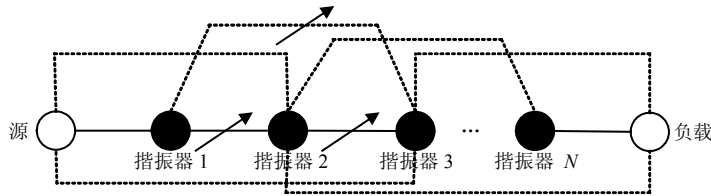


图1 含有频变耦合系数的滤波器低通原型

本文中, 因为含有频变耦合系数, 耦合矩阵分为两部分: M 和 M^1 , M 表示频不变耦合系数矩阵, M^1 表示频变耦合系数矩阵。式(4)修正为:

$$A = -jR + \omega W + \omega M^1 + M \quad (5)$$

式中, R , W , M 与式(4)中定义相同; M^1 为频变耦合矩阵。含有频变耦合系数滤波器低通原型的 S 参数的计算公式仍为式(3)。因此, 优化综合含有频变耦合系数的滤波器的目标函数定义为:

$$\begin{aligned} \text{costfun} = & \sum_{i=1}^N |S_{11}(p_i)|^2 + \sum_{i=1}^{N_z} |S_{21}(z_i)|^2 + \\ & \left(|S_{11}(s_{zi} = -j)| - \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 + \varepsilon^2}} \right)^2 + \\ & \left(|S_{11}(s_{zi} = j)| - \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 + \varepsilon^2}} \right)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $S_{11}(p_i)$ 和 $S_{21}(z_i)$ 是由耦合矩阵 M 和 M^1 利用式(3)计算得到; p_i 是特征多项式的反射零点; z_i 是特征多项式的有限传输零点。

遗传算法是一种全局最优化方法, 本文选用英国Sheffield大学开发的遗传算法工具箱^[11], 遗传算法中相关参数定义如下: 个体数目 $NIND = 100$, 最大遗传代数 $MAXGEN = 200$, 变量二进制位数 $PRECI = 20$, 代沟 $GGAP = 0.9$ 。优化变量初值由遗

$C_N(s)$ 的极点是多项式 $P(s)$ 的根, 零点多项式 $F(s)$ 的根。它具有广义切比雪夫函数的特性。

与传统广义切比雪夫滤波器低通原型电路类似, 含有频变耦合系数的广义切比雪夫滤波器低通原型电路如图1所示。图中实线代表相邻腔之间的耦合, 箭头线代表频变耦合, 虚线代表交叉耦合。

低通原型滤波器的 S 参数由耦合矩阵表示为^[10]:

$$S_{21} = -2[A^{-1}]_{N+2,1} \quad S_{11} = 1 + 2[A^{-1}]_{1,1} \quad (3)$$

$$A = -jR + \omega W + M \quad (4)$$

式中, R 是 $(N+2) \times (N+2)$ 阶矩阵, 除 $R_{11} = R_{N+2, N+2} = 1$ 外, 其他元素均为 0; W 是 $(N+2) \times (N+2)$ 阶类单位矩阵, 但 $W_{11} = W_{N+2, N+2} = 0$; M 是耦合矩阵。

传算法自带的子函数随机产生, 变量范围为 $[-2 \ 2]$ 。若遗传算法优化结果满足指标, 则停止; 若不满足, 则将遗传算法优化的结果作为Solvopt算法^[12]的初值继续优化, 直到满足结果为止。本文中滤波器优化综合流程图如图2所示。

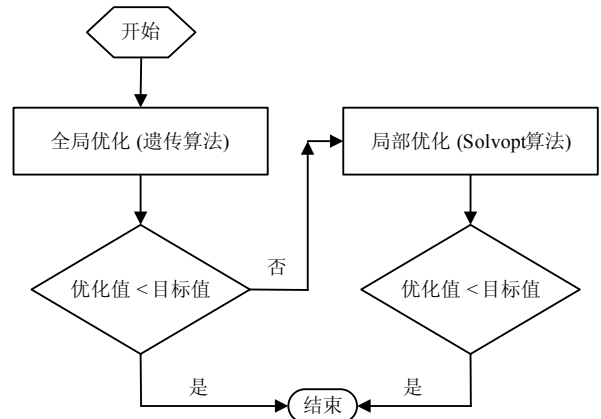


图2 含有频变耦合系数滤波器优化综合流程图

2 数值算例

为验证本文的有效性, 下面对3个数值实例进行综合。

例1: 滤波器的阶数 $n = 4$, 有限传输零点 $\omega_{nz} = [-1.5, 1.5, 4]$, 回波损耗 $RL = 20$ dB, 拓扑结构如图3a中所示。

频不变耦合矩阵 M 中的优化变量为 $M_{12}, M_{24}, M_{34}, M_{35}, M_{45}, M_{25}, M_{56}, M_{22}, M_{33}, M_{44}, M_{55}$, 频变耦合矩阵 M^1 中的优化变量为 M_{25}^1 。将优

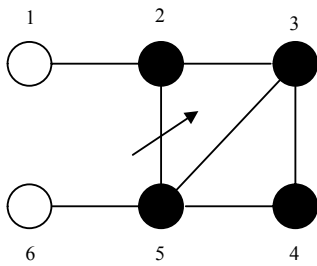
化变量按行向量排列组成优化向量 X , 优化目标函数值设定为 1.0×10^{-9} 。首选采用遗传算法进行优化, 遗传算法优化结果为:

$$M + \omega M^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.894 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.894 0 & -0.613 6 & 0 & -0.592 5 & 1.167 6 - 0.726 9\omega & 0 \\ 0 & 0 & 1.337 3 & -0.111 3 & -0.682 1 & 0 \\ 0 & 0.592 5 & -0.111 3 & 1.053 2 & 0.892 5 & 0 \\ 0 & 1.167 6 - 0.726 9\omega & -0.682 1 & 0.892 5 & -0.223 & -1.026 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.026 5 & 0 \end{bmatrix}$$

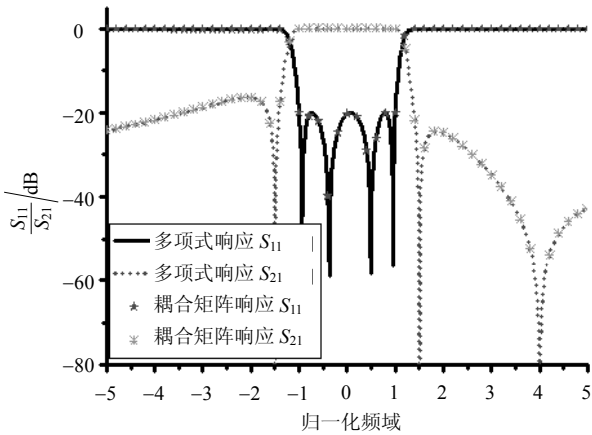
目标函数值 $\text{costfun} = 0.383 2$, 不满足指标, 将

其代入局部优化算法 Solvopt 继续优化, 优化结果为:

$$M + \omega M^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1.011 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.011 3 & -0.038 0 & 0 & -0.818 4 & 0.347 6 - 0.089 4\omega & 0 \\ 0 & 0 & -0.278 6 & 0.800 1 & 0.788 6 & 0 \\ 0 & -0.818 4 & 0.800 1 & 0.166 5 & 0.218 9 & 0 \\ 0 & 0.347 6 - 0.089 4\omega & 0.788 6 & 0.218 9 & -0.038 0 & -1.011 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.011 3 & 0 \end{bmatrix}$$



a. 例1中滤波器的拓扑结构



b. 例1中滤波器的响应

图3 例1中滤波器拓扑结构与响应

$$M + \omega M^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1.103 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.103 5 & -0.042 4 & 1.552 5 + 0.676\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.552 5 + 0.676\omega & -0.824 2 & 1.775 5 & 1.298 6 + 0.936 2\omega & 0 \\ 0 & 0 & 1.775 5 & -1.406 8 & 0.327 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1.298 6 + 0.936 2\omega & 0.327 2 & 0.720 8 & 1.022 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.022 9 & 0 \end{bmatrix}$$

目标函数值 $\text{costfun} = 1.992 6 \times 10^{-13}$, 满足指标。

耦合矩阵响应如图3b所示, 其与特征多项式响应完全吻合。

由最小路径原理^[13]可知: 如不引进频变耦合系数, 例1中拓扑结构能够实现的有限传输零点个数最大为2, 引入一个频变耦合系数后能够实现的有限传输零点的个数为3。传输零点个数与频变耦合在拓扑结构中的位置有关, 文献[14]给出了传输零点个数与频变耦合的关系, 并给出了其增加有限传输零点的机理。

例2: 滤波器的阶数 $n = 4$, 有限传输零点 $\omega_{nz} = [-3.5, -2, -1.3]$, 回波损耗 $RL = 20$ dB, 拓扑结构如图4a所示。

频不变耦合矩阵 M 中的优化变量为 $M_{12}, M_{23}, M_{34}, M_{45}, M_{56}, M_{35}, M_{22}, M_{33}, M_{44}, M_{55}$, 频变耦合矩阵 M^1 中的优化变量为 M_{23}^1, M_{35}^1 。将优化变量按行向量排列组成优化向量 X , 优化目标函数值设定为 1×10^{-9} 。首选采用遗传算法进行优化, 遗传算法优化结果为:

目标函数值为 $\text{costfun} = 0.169\ 6$, 不满足指标, 将其代入局部优化算法Solvopt继续优化, 优化结果为:

$$M + \omega M^1 = \begin{bmatrix} 0 & -0.936\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.936\ 0 & 0.683\ 6 & -0.931\ 8 + 0.762\ 1\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.931\ 8 + 0.762\ 1\omega & 0.413\ 4 & -0.357\ 8 & 0.610\ 4 - 0.068\ 7\omega & 0 \\ 0 & 0 & -0.357\ 8 & 0.787\ 6 & 0.591\ 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.610\ 4 - 0.068\ 7\omega & 0.591\ 0 & 0.057\ 9 & 1.045\ 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.045\ 5 & 0 \end{bmatrix}$$

目标函数值 $\text{costfun} = 5.392\ 8 \times 10^{-14}$ 。耦合矩阵响应如图4b所示, 其与特征多项式响应完全吻合。

同样由最小路径可知, 如不引进频变耦合系数, 例2中拓扑结构能够实现传输零点的个数最大为1, 但引入两个频变耦合系数后, 能够实现的有限传输零点的个数为3。

例3: 滤波器的阶数 $n = 5$, 有限传输零点 $\omega_{nz} = [-2.2, -1.5, 1.2, 1.8]$, 回波损耗 $RL = 20\ \text{dB}$, 拓扑结构如图5a所示。

频不变耦合矩阵 M 中的优化变量为 $M_{12}, M_{23}, M_{34}, M_{45}, M_{56}, M_{67}, M_{26}, M_{35}, M_{22}, M_{33}, M_{44}, M_{55}, M_{66}$, 频变耦合矩阵 M^1 中的优化变量为 M_{26}^1, M_{35}^1 。将优化变量按行向量排列组成优化向量 X , 优化目标函数值设定为 1×10^{-9} 。首选采用遗传算法进行优化, 遗传算法优化结果为:

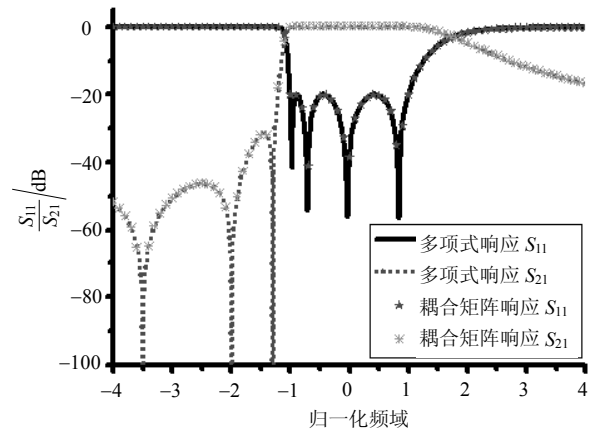
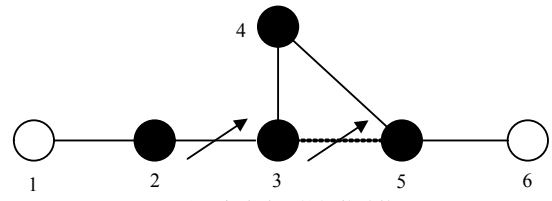


图4 例2中滤波器拓扑结构与响应

$$M + \omega M^1 =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -0.896\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.896\ 1 & 0.201\ 4 & -0.625\ 0 & 0 & 0 & 1.553\ 8 + 0.217\ 9\omega & 0 \\ 0 & -0.625\ 0 & -1.203\ 2 & -0.799\ 9 & -0.0090 - 0.209\ 1\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.799\ 9 & -0.655\ 4 & 1.436\ 9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.009\ 0 - 0.209\ 1\omega & 1.436\ 9 & 0.597\ 9 & -1.731\ 6 & 0 \\ 0 & 1.553\ 8 + 0.217\ 9\omega & 0 & 0 & -1.731\ 6 & 1.9847 & 1.688\ 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.688\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

目标函数值为 $\text{costfun} = 0.233\ 0$, 不满足指标, 将其代入局部优化算法Solvopt继续优化, 优化结果为:

$$M + \omega M^1 =$$

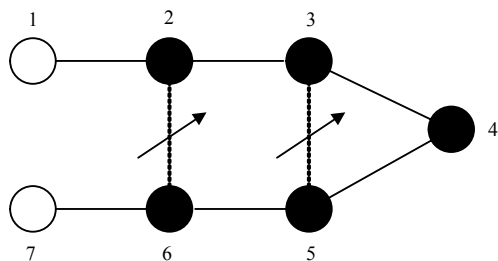
$$\begin{bmatrix} 0 & -0.994\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.994\ 6 & -0.020\ 3 & -0.751\ 7 & 0 & 0 & 0.070\ 9 + 0.074\ 8\omega & 0 \\ 0 & -0.751\ 7 & 0.209\ 9 & -0.770\ 0 & -0.314\ 8 - 0.463\ 2\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.770\ 0 & -0.411\ 0 & 0.770\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.314\ 8 - 0.463\ 2\omega & 0.770\ 0 & 0.209\ 9 & -0.751\ 7 & 0 \\ 0 & 0.070\ 9 + 0.074\ 8\omega & 0 & 0 & -0.751\ 7 & 0.020\ 3 & 0.994\ 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.994\ 6 & 0 \end{bmatrix}$$

目标函数值 $\text{costfun} = 2.705\ 2 \times 10^{-14}$, 满足指标。

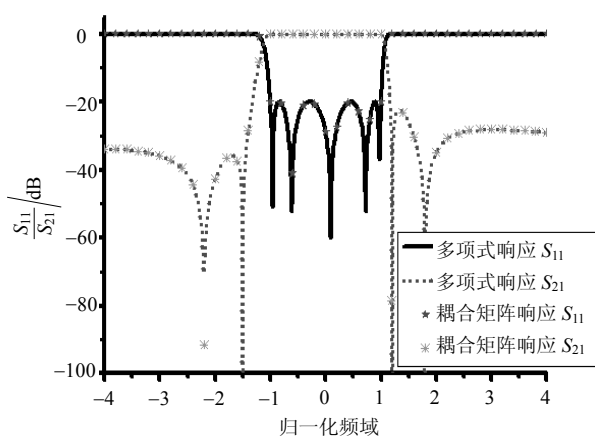
耦合矩阵响应如图5b所示, 其与特征多项式响

应完全吻合。

同样由最小路径可知,如不引进频变耦合系数,例3中拓扑结构能够实现传输零点的个数最大为3,但引入两个频变耦合系数后,可实现的有限传输零点个数为4。



a. 例3中滤波器的拓扑结构



b. 例3中滤波器响应

图5 例3中滤波器的拓扑结构及其响应

3 结束语

针对传统广义切比雪夫滤波器可实现有限传输零点个数受限的问题,本文提出了一种含有频变耦合系数滤波器优化综合方法,在相同阶数的情况下,含有频变耦合系数的广义切比雪夫滤波器能够实现的有限传输零点个数比传统广义切比雪夫滤波器更多。利用全局优化算法GA进行优化,然后将其优化结果代入局部优化算法Solvopt算法进行优化,所得耦合矩阵响应与滤波器特征多项式响应完全吻合,证明了该方法的有效性。

参 考 文 献

[1] ATIA A, WILLIAMS A. Narrow-bandpass waveguide filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1972, 20(4): 258-265.

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

[3] AMARI S. Synthesis of cross-coupled resonator filters using an analytical gradient-based optimization technique[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(9): 1559-1564.

[4] LAMECKI A, KOZAKOWSKI P, MROZOWSKI M. Fast synthesis of coupled-resonator filters[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2004, 14(4): 174-176.

[5] MACCHIARELLA G, OLDONI M, TAMIAZZO S. Narrow band microwave filters with mixed topology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(12): 3980-3987.

[6] SZYDŁOWSKI L, LESZCZYŃSKA N, MROZOWSKI M. A linear phase filter in quadruplet topology with frequency-dependent couplings[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014, 24(1): 32-34.

[7] MENG W, LEE H M, ZAKI K, et al. Synthesis of wideband multicoupled resonators filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(3): 593-603.

[8] AMARI S, SEYFERT F, BEKHEIT M. Theory of coupled resonator microwave bandpass filters of arbitrary bandwidth[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(8): 2188-2203.

[9] AMARI S, BORNEMANN J. Using frequency-dependent coupling to generate finite attenuation poles in direct-coupled resonator bandpass filters[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1999, 9(10): 404-406.

[10] AMARI S, ROSENBERG U, BORNEMANN J. Adaptive synthesis and design of resonator filters with source/load-multi-resonator coupling[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(8): 1969-1978.

[11] GA Toolbox[EB/OL]. [2016-03-16]. <http://codem.group.shef.ac.uk/index.php/ga-toolbox>.

[12] SolvOpt manual and SolvOpt Toolbox for matlab[EB/OL]. [2016-03-16]. <http://www.kfunigraz.ac.at/imawww/kuntsevich/solvopt/index.html>.

[13] AMARI S. On the maximum number of finite transmission zeros of coupled resonator filters with a given topology[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1999, 9(9): 354-356.

[14] 陈凤军. 小型化有耗和频变耦合滤波器研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.

CHEN Feng-jun. Investigation on miniaturized lossy and frequency-dependent coupled filters[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.