

# 交叉耦合滤波器小型化研究

姬五胜<sup>1,2</sup> 彭清斌<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 兰州理工大学计算机与通信学院, 兰州 730050; <sup>2</sup> 兰州城市学院电子信息研究所, 兰州 730070)

qingbin99@gmail.com

**摘要:** 本文分析了同轴阶跃阻抗谐振器, 提出将这一结构同交叉耦合相结合设计小型化滤波器。同时分析了同轴阶跃阻抗谐振器直接耦合实现方法和电路形式。并采用同轴阶跃阻抗谐振器设计中心频率为 2GHz 带宽为 50MHz 的交叉耦合滤波器, 证明了该方法的可行性, 并获得很好的试验结果, 设计的滤波器体积减小了 30%。

**关键词:** 阶跃阻抗谐振器; 交叉耦合; 同轴滤波器

## Research on Miniaturization of Cross-coupling Filter

Ji Wusheng<sup>1,2</sup>, PENG Qingbin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050;

<sup>2</sup> Institute of Electronic Information Science and Technology, Lanzhou City University, Lanzhou, 730070)

**Abstract:** This paper analyzes the coaxial resonator of step-impedance, and proposes the design method of the miniaturization filter using coaxial resonator of step-impedance linked with cross-coupling. Also analyzes the direct coupling form and the circuit form of the coaxial resonator in step-impedance. And designs a cross-coupling filter with center frequency of 2GHz and bandwidth of 50MHz. This design proves the feasibility of the method and obtained very good experimental results. The designed filter reduces the volume of 30%.

**Keywords:** Stepped-impedance resonator, cross-coupling, coaxial filter, general Chebyshev

### 1 前言

随着无线通信系统的快速发展, 无线电频谱变得越来越拥挤, 同时对微波滤波器的要求也越来越高, 尤其是要求更高的带外抑制特性和具有更小的体积。采用广义切比雪夫函数设计的交叉耦合滤波器, 能通过引入有限频率的传输零点来提高通道的选择性。且同直接耦合形式相比, 在相同带外抑制条件下, 交叉耦合滤波器具有更少的阶数, 从而减小了滤波器体积。而采用阶跃阻抗谐振器可以在不减小无载 $Q$ 的情况下可缩短谐振器长度, 从而减小了滤波器尺寸, 且具有良好的滤波性能。本文在分析阶跃阻抗谐振器的基础上, 提出采用交叉耦合结构来实现阶跃阻抗谐振器的, 分析了耦合电路实现方法和电路形式。并设计了同轴交叉耦合滤波器, 获得了很好的试验结果。

### 2 阶跃阻抗谐振器分析

阶跃阻抗谐振器是由两个以上具有不同特性阻抗的传输线组合而成的横向电磁场或准横向电磁场模式的谐振器。图1为包含开路面、短路面、阻抗阶跃面的SIR的基本单元。输入端的阻抗和导

纳分别定义为 $Z_i$ 和 $Y_i$  ( $Y_i = 1/Z_i$ )。如果忽视阶跃非连续性和开路端的边缘电容,  $Z_i$ 的表达式如下[1]:

$$Z_i = jZ_2 \frac{Z_1 \tan \theta_1 + Z_2 \tan \theta_2}{Z_2 - Z_1 \tan \theta_1 \tan \theta_2} \quad (1)$$

设 $Y_i = 0$ , 那么平行谐振条件为:

$$Z_2 - Z_1 \tan \theta_1 \tan \theta_2 = 0$$

这样:  $\tan \theta_1 \tan \theta_2 = Z_2 / Z_1 = R_z$  (2)

SIR 两端之间的总电学长度 $\theta_{TA}$ , 可表示为:

$$\theta_{TA} = \theta_1 + \theta_2 = \theta_1 + \arctan(R_z / \tan \theta_1) \quad (3)$$

相对于对应的UIR点电学长度 $\pi/2$ , 归一化谐振器长度由下式定义:

$$L_{n0} = \theta_{TA} / (\pi/2) = 2\theta_{TA} / \pi \quad (4)$$

从上面的公式, 我们能理解SIR的谐振条件取决于 $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 和阻抗比 $R_z$ 。一般的均匀阻抗谐振器的谐振条件唯一的取决于传输线的长度, 而对SIR则同时要计入电学长度和阻抗比。因此SIR比UIR多了一个设计的自由度。

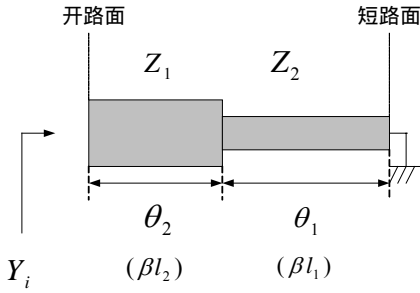


图1 单元 SIR 的电学参数

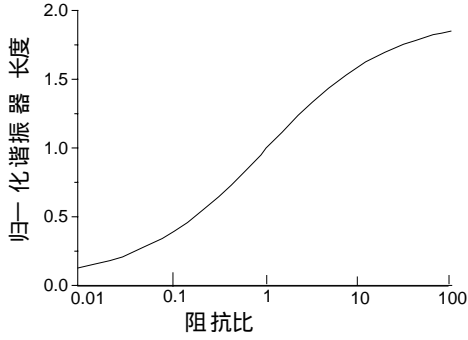


图2 阻抗比和归一化谐振器长度的关系

图2为阻抗比和归一化谐振器长度的关系，可以看出通过采用较小的 $R_z$ 值来极大地缩短SIR谐振器的长度。

### 3 交叉耦合及其实现

具有带外有限传输零点的滤波器，常常采用谐振器多耦合的形式实现[2]。这种形式的特点是在谐振器级联的基础上，非相邻腔之间可以互相耦合即“交叉耦合”，甚至可以采用源于负载的耦合。交叉耦合带通滤波器的等效电路如图3所示。在等效模型中， $R_1$ 、 $R_2$ 分别为电源内阻和负载内阻， $i_k(k=1,2,3,\dots,M)$ 表示各谐振腔的回路电流， $M_{ij}$ 表示第 $i$ 个谐振腔与第 $j$ 个谐振腔之间的互耦合系数( $i,j=1,2,\dots,M$ 且 $i \neq j$ )，而源/负载与各腔之间的耦合系数分别用 $M_{Si}/M_{iL}$ 表示。 $M_{kk}$ 表示各谐振腔之间的自耦合系数。

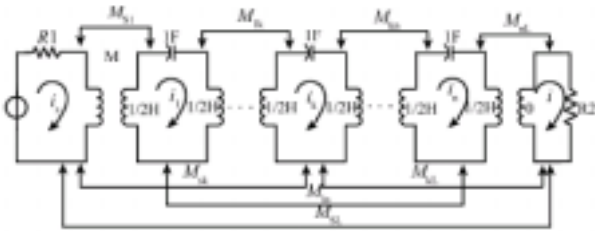


图3 交叉耦合网络

这个电路的回路方程可以写为：

$$\begin{bmatrix} e1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & jM_{s1} & jM_{s2} & \cdots & jM_{sN} & jM_{sL} \\ jM_{s1} & s & jM_{12} & \cdots & jM_{1N} & jM_{1L} \\ jM_{s2} & jM_{12} & s & \cdots & jM_{2N} & jM_{2L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & s & jM_{NL} \\ jM_{sN} & jM_{1N} & \vdots & \vdots & jM_{NL} & R_2 \\ jM_{sL} & jM_{1L} & \vdots & \vdots & jM_{NL} & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ i_N \\ i_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

或者写成矩阵方程的形式：

$$\mathbf{E} = \mathbf{Z}\mathbf{I} = (s\mathbf{U} + j\mathbf{M} + \mathbf{R})\mathbf{I} \quad (6)$$

其中，

$$s = j\omega + \frac{1}{j\omega} = j(\omega - \frac{1}{\omega}) \quad (7)$$

$\mathbf{E}$ 为电压矩阵， $\mathbf{I}$ 为电流矩阵， $\mathbf{Z}$ 为阻抗矩阵； $\mathbf{U}$ 是 $N \times N$ 阶单位矩阵， $\mathbf{M}$ 是耦合矩阵。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & M_{s1} & M_{s2} & \cdots & M_{sN} & M_{sL} \\ M_{s1} & M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1N} & M_{1L} \\ M_{s2} & M_{12} & M_{22} & \cdots & M_{2N} & M_{2L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & s & jM_{NL} \\ M_{sN} & M_{s1} & \vdots & \vdots & M_{NL} & 0 \\ M_{sL} & M_{s1} & \vdots & \vdots & M_{NL} & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中对角线上的元素代表每一个谐振回路的自耦合，表示每一个谐振腔的谐振频率 $f_i$ 与中心频率 $f_0$ 之间的偏差。

### 4 交叉耦合滤波器设计

由于阶跃阻抗谐振器的电磁场分布较均匀阻抗谐振器的复杂，所以采用阶跃阻抗谐振器实现级联耦合和交叉耦合时，需要研究耦合实现形式。由电磁场理论可知，阶跃阻抗谐振器电场主要分布在低阻抗同轴部分和开路端部分，而磁场分量主要集中在同轴短路端。由阶跃阻抗谐振器电场和磁场分布较为集中，可分别采用耦合杆耦合形式和窗口耦合形式来实现级联耦合和交叉耦合。

本文设计了中心频率为2GHz，带宽为50MHz，回波损耗为-22dB的五阶滤波器，经过综合变换得到耦合矩阵为：

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0.9037 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9037 & -0.0001 & 0.6488 & -0.0004 & -0.0251 \\ 0 & 0.6488 & 0.0006 & 0.6671 & 0 \\ 0 & -0.0004 & 0.6671 & -0.0001 & 0.9034 \\ 0 & -0.0251 & 0 & 0.9034 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

采用阶跃阻抗同轴腔模型实现谐振腔，如图4

所示。取 $R_z=0.36$ ，则 $l_1=13\text{mm}$ ， $l_2=10.1\text{mm}$ 。由于开路端采用低阻抗同轴结构，考虑开路端电容值远大于均匀阻抗谐振器开路端的分布电容值，及阻抗不连续性引起的电容分布，最终得 $l_1=11\text{mm}$ ， $l_2=9\text{mm}$ 。

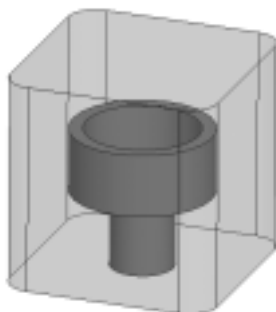


图4 阶跃阻抗同轴腔实现谐振腔示意图

由(9)可知，级联耦合系数值较大，本文采用调节耦合杆实现双腔级联耦合，如图5所示。采用HFSS仿真可得耦合杆长度与耦合系数的关系，如图6所示。可以看出，随着耦合杆长度的变大，级联耦合系数也变大。最终确定耦合杆长度分别为： $l_{12}=11.63\text{mm}$ ； $l_{23}=10.17\text{mm}$ ； $l_{34}=10.46\text{mm}$ ； $l_{45}=11.63\text{mm}$ ；

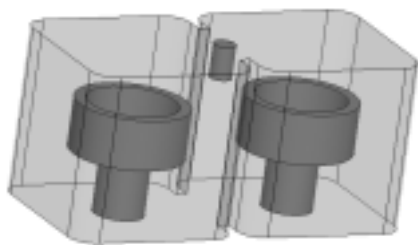


图5 通过耦合杆实现两个耦合腔之间的耦合

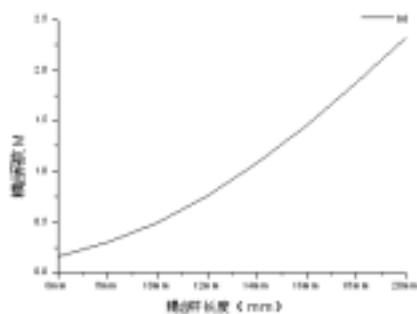


图6 耦合杆长度变化与耦合系数的关系

交叉耦合采用窗口形式实现，由交叉耦合滤波器传输零点独立性[3]，可通过微调交叉耦合窗口来调节传输零点位置。交叉耦合滤波器最终结构如图7所示。图8为图7所示结构滤波器 $S$ 参量仿真值。从图8和图7可以看出，采用阶跃阻抗形式实现的交叉耦合滤波器能够达到与交叉耦合滤波器相同的传输特性，而在体积上比交叉耦合滤波器减小30%。

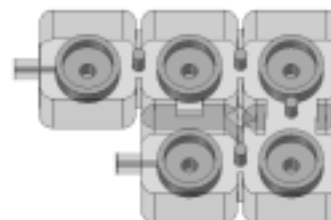


图7 交叉耦合滤波器结构图

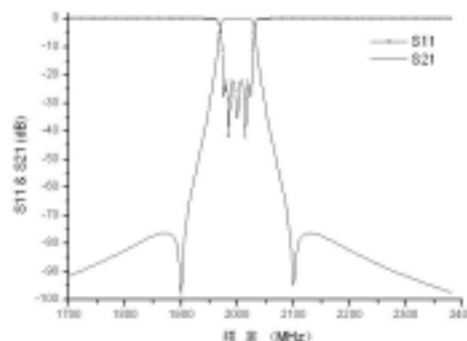


图8 交叉耦合滤波器 $S$ 参量仿真图

## 5 结论

本文分析了阶跃阻抗谐振器在滤波器小型化设计中的原理，提出将阶跃阻抗谐振器通过交叉耦合形式实现来设计小型化滤波器，通过滤波器设计证明了这一设计方法的可行性。并且阶跃阻抗谐振器同交叉耦合的结合极大的简化了设计过程，减少了调试强度，具有广泛的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] M.Sagawa, M.Makimoto and S.Yamashita, Geometrical structures and fundamental characteristics of microwave stepped impedance resonators, IEEE Trans. On MTT, 1997, 45 (7): 1078-1085
- [2] Richard J. Cameron, General Coupling Matrix Synthesis Methods for Chebyshev Filtering Function, IEEE Trans. On MTT, 1999, 47 (4): 433-442
- [3] 程兴，苏涛，梁昌洪，交叉耦合滤波器设计与传输零点的独立性分析，微波学报，2006，01，34-38

## 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/>