

# 具有一对传输零点的开路环谐振微带滤波器

屈晓松，史小卫，郭玉春  
西安电子科技大学电子工程学院

**摘要：**在微带开路环谐振滤波器中不相邻谐振子之间引入交叉耦合，可产生一对传输零点，从而改善滤波器传输波形的矩形系数，进而提高滤波器选择性。本文介绍了这种滤波器的基本理论和微带实现的设计流程，实际制作了一个六节滤波器，并给出软件仿真和实测结果。与传统chebyshev滤波器进行比较，可以看出这种滤波器可以很好地提高滤波器的选择性，改善性能。

**关键字：**开环谐振子，交叉耦合，传输零点，耦合系数，外部品质因数

# Filter Of Microstrip Square Open-Loop Resonator With One Pair Transmission Zero

Xiaosong Qu, Xiaowei Shi, Yunchun Guo  
National key lab of antennas and microwave technology, Xidian University, Xi'an 710071, China

**Abstract:** A type of cross-coupled planar microwave filter using coupled microstrip square open-loop resonators is proposed. The filter of this type can reduce a pair of transmission zero, so it give sharper filter skirt and higher selectivity. This paper gives the synthesis theory of this type filter and the process of the realization of microstrip square open-loop resonators emulating by CAD. A six-pole elliptic function filter of this type is designed. Compare to traditional chebyshev filter, we can see this type can improve filter skirt and behave higher selectivity.

**Key Words:** open-loop resonators, cross-couple, transmission zero, coupling coefficients, external quality factors

## 1 引言

在现代通信系统，特别是卫星通信和移动通信系统，对滤波器的性能指标提出越来越高的要求，如高选择性，小尺寸，通带内低插入损耗，宽带线性群时延。传统滤波器综合，最为关心的是频率选择性和通带内损耗，因此最化的滤波器响应在带内和带外应同时具有等波纹特性，也即椭圆函数滤波器特性。在传统的chebyshev滤波器中引入交叉耦合可以获得类似的传输特性（准椭圆函数特性）。不相邻振子之间的交叉耦合可以在输入和输出端口间引入多径效应。基于信号相位的不同，多径效应可以产生有限频率点衰减极点或者平坦的群时延，或者两者同时得到。交叉耦合滤波器在波导滤波器和介质滤波器中有大量应用，微带结构由于衰减相比较很大，应用不多。近年来为

了减小尺寸和重量，便于集成，平面微带结构的滤波器由此得到广泛研究和应用。

交叉耦合滤波器的一个难点是确定和控制不相邻的谐振子之间的电磁耦合。文献<sup>[1],[2]</sup>中给出一系列新型的面结构滤波器，包括微带双模滤波器，双面混合耦合线滤波器和微带开环平面滤波器。交叉耦合的滤波器相比较于双模滤波器，开环滤波器具有更小的尺寸；相比于双面混合耦合滤波器，其具有结构简单的优点，因其并不需用共地和耦合开孔。此外平面开环谐振滤波器可方便地实现如同腔体滤波器的耦合结构。

具有一对传输零点的交叉耦合滤波器，它的零点可以放置在实频率点或虚频率点上。根据电耦合或磁耦合的性质的不同，引入的交叉耦合可以分为正的或者负的。负耦合产生实频率传输零点，而正耦合产生

实轴零点。前一种可给出好的选择性能，后一种将产生良好的带内时延特性<sup>[3]</sup>。

本文将重点讨论前一种滤波器，即具有负的交叉耦合滤波器，介绍其基本理论和微带实现方法。设计一个六节的滤波器，对其性能进行仿真。

## 2 具有一对传输零点滤波器理论综合

在有限频率点引入一对传输零点<sup>[3]</sup>可提高传统chebyshev滤波器的选择性，使其频率响应具有准椭圆函数的特性。此种滤波器较之椭圆函数滤波器更容易实现，性能介于chebyshev和椭圆函数响应之间<sup>[4]</sup>。具体传输函数为：

$$\begin{aligned} |S_{21}(W)|^2 &= \frac{1}{1 + e^2 F_n^2(W)} \\ e &= \sqrt{10^{-\frac{L_R}{10}} - 1} \\ F_n(W) &= \cosh \left\{ (n-2) \cosh^{-1}(W) \right. \\ &\quad \left. + \cosh^{-1} \frac{\Omega_a W - 1}{\Omega_a W + W_0} + \cosh^{-1} \frac{\Omega_a W + 1}{\Omega_a W + W_0} \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

其中， $\Omega$  为频率变量且对过渡带截止频率归一。 $e$  为等波纹系数，与带内回波损耗有关。从(1)可知当  $\Omega_a = \Omega$  时，将产生一对传输零点，位于  $\Omega_a$  处。传输零点可以通过一对不相邻谐振子之间的交叉耦合来实现。Levy<sup>[3]</sup>以chebyshev低通原型为起点综合出一套近似理论。如图1所示为滤波器综合中的原型图：

$$\begin{aligned} g_1 &= 2 \sin \left( \frac{p}{2n} \right) / g \\ g_i g_{i+1} &= \frac{4 \sin \frac{(2n-1)p}{2n} \sin \frac{(2n-3)}{2n}}{g^2 + \sin^2 \frac{(i-1)p}{n}} \quad (2) \\ g &= \sinh \frac{\pi i}{g n} \sinh^{-1} \frac{1}{e \bar{\theta}} \\ S &= (\sqrt{1 + e^2} + e)^2 \\ J_m &= \cos^{-1} s^{-\frac{1}{2}} \quad J_{m-1} = 0 \end{aligned}$$

其中， $g_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ )  $m=n/2$  为chebyshev滤波器的低通原型中归一元件值。在  $\Omega=\Omega_a$  处产生传输零点，需要：

$$J_{m-1} = \frac{-J_m \phi_m}{(W_a g_m)^2 - J_m^2} \quad (3)$$

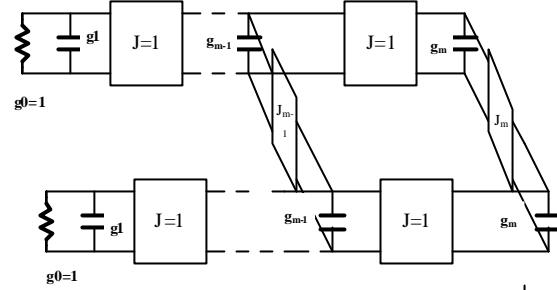


图1 低通原型滤波器结构图

这时  $J_{m-1}$  与电路并不匹配，需对  $J_m$  值进行微调：

$$J_m \phi = \frac{J_m}{1 + J_m J_{m-1}} \quad (4)$$

$J_m \phi$  为代换后的  $J_m$ ，(3)、(4) 中  $J_m, J_{m-1}$  的初值由(2) 给出。在近似过程中，低通原型中其他的元件值并没有改变。

由求得的交叉耦合滤波器低通原型元件归一值，滤波器的耦合系数和外界品质因数可以通过(5) 获得：

$$\begin{aligned} Q_{ei} = Q_{eo} &= \frac{g_1}{FBW} \\ M_{i,i+1} = M_{n-i,n-i+1} &= \frac{FBW}{g_i g_{i+1}} \quad (5) \\ M_{m,m+1} &= \frac{FBW \times J_m}{g_m} \\ M_{m-1,m+2} &= \frac{FBW \times J_{m-1}}{g_{m-1}} \end{aligned}$$

其中  $i=1, 2, \dots, m-1, m=n/2$ 。

## 3 实验方法确定耦合系数和外部品质因数

如下图2所示四种耦合结构 a为电耦合 b为磁耦合，c，d为均为电磁混合耦合。它们为实现滤波器的基本结构。用实验方法实现滤波器，首先确定单元振子，即为在中心频率点上仿真得到单元结构的基本尺寸。然后再把这四种结构分别放入CAD软件中进行full wave 仿真。

由文献<sup>[4]</sup>可知耦合结构的两个自然谐振频率既为实际中电场和磁场的耦合谐振频率 ( $f_e, f_m$ )，根据(6) 可以计算得到耦合系数：

$$k = \frac{f_m^2 - f_e^2}{f_m^2 + f_e^2} \quad (6)$$

下图3所示为采用抽头线馈电时单端品质因数的仿真测试的模型图。

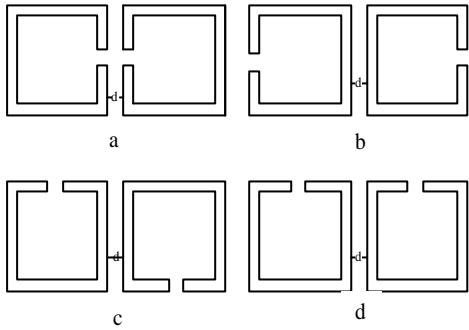


图2 四种不同耦合结构

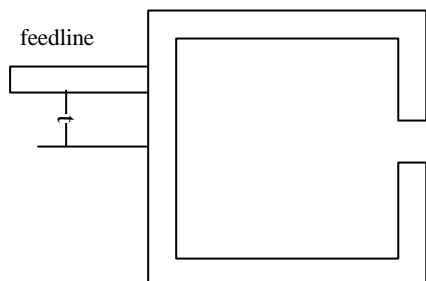


图3 品质因数仿真结构

在hfss中仿真可以得到此结构的相位特性为：

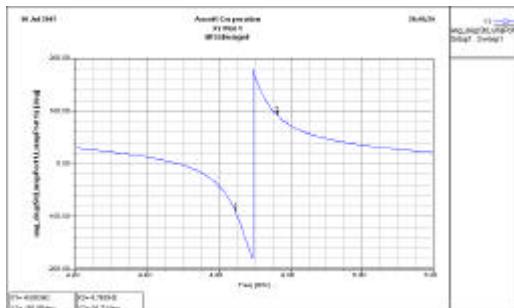


图4 品质因数仿真的单端结构的相位特性

由文献<sup>[4]</sup>中方法可用(7)计算得到外部品质因数：

$$Q_e = \frac{w_0}{D w_{\pm 90^\circ}} \quad (7)$$

#### 4 一个六阶滤波器实例

工程中我们制作一个六节的微带交叉耦合滤波器。中心频率为4.70GHz，带宽为4.4~5.0GHz(12.8%)，选取介电常数4.4，FR4的双面覆铜板为基板，软件仿真的到基本单元尺寸为6mm×6mm，中间的开口间隙为0.8mm。运用full wave分析，可得a，b，c三种耦合结构的耦合系数和间距d的关系曲线。如图5所示：

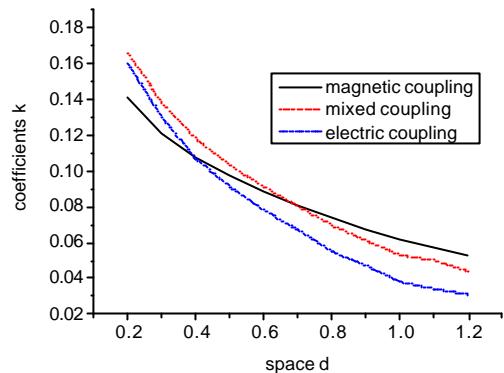


图5 耦合系数k和间距s曲线图

由上图5得知，当间距变大时，耦合结构的耦合变小。零点放置在 $\Omega_a=1.2$ 处，根据(2),(5)计算可以得到：

$$\begin{aligned} Q_{ei} &= Q_{eo} = 7.96 \\ M_{1,2} &= M_{5,6} = 0.1052 \\ M_{2,3} &= M_{4,5} = 0.067 \\ M_{3,4} &= 0.1011 \\ M_{2,5} &= -0.0346 \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中， $M_{1,2}$ ， $M_{5,6}$ ， $M_{3,4}$ 用b结构实现， $M_{2,3}$ ， $M_{4,5}$ 用c结构实现； $M_{2,5}$ 耦合的系数为负数，可以认为其与 $M_{3,4}$ 具有相反的耦合性质，电，磁耦合产生反相信号， $M_{3,4}$ 用b(磁耦合)实现，故 $M_{2,5}$ 需用a结构(电耦合)实现；抽头线馈电，实现较大带宽。在软件建模，结构如下图6所示：

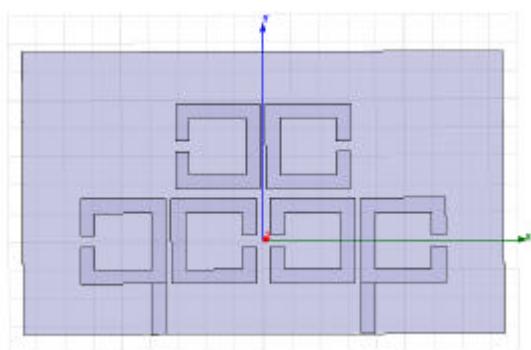


图6 六节滤波器建模结构图

如图7所示为仿真结果和实测结果比较结果：

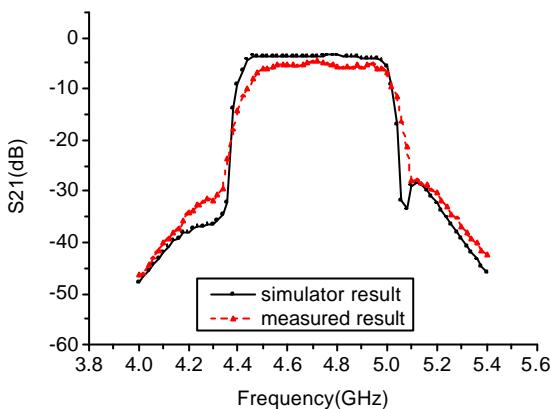


图7 仿真与实测结果 $S_{21}$

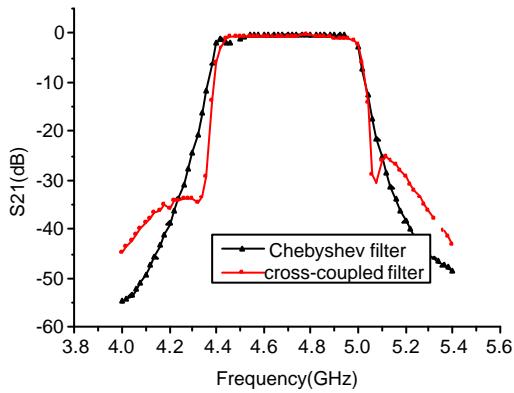


图8 六节chebyshev和六节交差耦合滤波器的响应

## 5 结论

本文介绍了具有一对插入零点的开环平面谐振滤波器的理论，并且对其具体的微带结构实现方法进行

了研究。在软件中仿真并比较了六节发夹式chebyshev滤波器和六节交叉耦合滤波器，结果如图8所示。可以得出，在节数相同情况下，后者在具有更小的矩形系数，过渡带衰减迅速，提高选择性，改善带内传输特性。具有一对交叉零点的改进型chebyshev滤波器，可在带外产生一对传输零点，改善梯形系数，优化了性能。

## 参考文献

- [1] J. A. Curits and S. J. Fiedziuszko, "Miniature dual mode microstrip filters," in *IEEE MTT-S, Dig.*, 1991, pp. 443-446.
- [2] J. S. Hong and M. J. Lancaster, "Realization of quasielliptic functionfilter using dual-mode microstrip square loop resonators," *Elec. Lett.*, vol. 31, pp. 2085-2086, 1995 vol. 47, pp. 433-442, Apr. 1999
- [3] Ralph Levy,fellow,IEEE,"Filter with single transmission zeros at real or imaginary frequencies" *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, Vol.MTT-24,NO.4. APRIL 1976
- [4] Jia-sheng hong and Michael,"Microstrip filters for RF/Microwave Applications"
- [5] Jia-sheng hong and Michael,"couplings of miacrostrip aquare open-loop resonators for cross-coupled planar microwave filters" *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol.44.NO.12,December.1996
- [6] R. J. Cameron, "General coupling matrix synthesis methods for Chebyshev filtering functions," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*

## 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，致力于专注于微波、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/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

**易迪拓培训**

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>