

# 微带 SIR 交叉耦合滤波器的设计

李祥福，王心尘，王亚军  
(厦门大学物理系 厦门 361005)

**摘要：**本文介绍了 SIR 和交叉耦合的基本原理。结合 SIR 与交叉耦合，设计出中心频率在 1.97 GHz 的类椭圆函数滤波器，比起传统的微带交指、平行耦合线等形式滤波器，微带类椭圆函数滤波器具有更好的选择性且体积小。本文通过仿真获得厚度为 0.61 mm 的陶瓷基片的耦合曲线图。通过调整 SIR 的阻抗比，控制二次谐波的中心频率的位置，实现滤波器的小型化，利用交叉耦合引入的衰减极点，改善了滤波器的带外特性。

**关键词：**交叉耦合；SIR；耦合系数；类椭圆函数滤波器

## Design of microstrip cross-coupled filter

Li Xiangfu, Wang Xinchen, Wang Yajun  
(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Theory of microstrip cross-coupled filter is introduced in this paper. Small size and selection of a filter play significant roles in its applications. SIR (stepped-impedance resonators) structure is used to reduce the circuit size and cross-coupled structure which can realize elliptic or quasi-elliptic response to enhance filter performance. Finally, a cross-coupled bandpass filter using SIR was designed and measured. The experimental results show good agreement with theoretical predictions.

**Key words:** cross-coupled; SIR; coupling coefficient; quasi-elliptic filter

## 1 引言

随着现代通信的快速发展，对高选择性、低插入损耗的带通滤波器的需求越来越多。微带滤波器因体积小、结构简单、加工方便、成本低、易于集成化等优点，在微波平面电路中广受欢迎。

本文介绍的交叉耦合滤波器，是近年发展的成熟方法，采用 SIR 结构减小了占用空间，利用交叉耦合的椭圆函数特性产生的极点，改善滤波器的带外特性，提高了滤波器的频率选择性。本文基于 SIR 谐振器结构设计的滤波器，通过控制 SIR 的阻抗比，控制二阶谐波通带的中心频率位置，间接实现抑制二阶谐波的目的。和传统的传输线电容耦合带通滤波器比较，具有体积小和抑制谐波的优点。

随着各种新材料和新技术的不断成熟和应用，这种小型化滤波器的广泛应用将成为现实。

## 2 SIR 谐振器及交叉耦合原理

### 2.1 SIR 谐振器

微带 SIR 谐振器结构如图 1 所示，其谐振条件为  
$$\tan \theta_1 \tan \theta_2 = Z_2 / Z_1 = R_Z \quad (1)$$

其中： $R_Z$  定义为阻抗比，由文献[3]可知  $Z_{2e}/Z_2$  的值越小可以使谐振器越小型化， $Z_{2e}/Z_2$  的值越大，二次谐波的中心频率越高，因此适当选择  $Z_1$ 、 $Z_{2e}$ 、 $Z_2$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ ，可以使谐振器的尺寸与二次谐波的中心频率得到合理的设计。

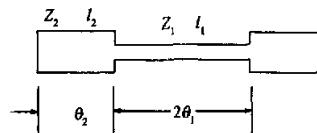


图 1 微带 SIR 谐振器

## 2.2 交叉耦合原理

3种耦合形式的结构示意图见图2,电耦合、磁耦合、混合耦合分别表示在(a)、(b)、(c)中。调整谐振器之间的间隙S可以改变耦合量的大小。

通过仿真软件 MW Office 改变谐振器的间距可以得到相应的  $f_e$ 、 $f_m$ ,由此可得间距 S 与  $f_e$ 、 $f_m$  关系的多组数据,由(2)~(4)式可得间距 S 对应各耦合形式的耦合系数。

$$K_e = (f_m^2 - f_e^2) / (f_m^2 + f_e^2) \quad (2)$$

$$K_m = (f_e^2 - f_m^2) / (f_e^2 + f_m^2) \quad (3)$$

$$K_b = (f_e^2 - f_m^2) / (f_e^2 + f_m^2) \quad (4)$$

仿真得到的多组数据,导入 matlab 可以拟合出图3 在  $\epsilon_r=9.6$ ,  $h=0.61$  mm 的陶瓷基片中 3 种耦合系数与谐振器间距 S 的关系曲线。

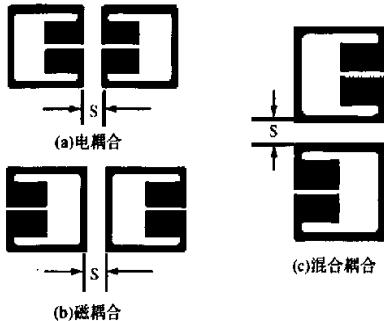


图 2 交叉耦合的 3 种基本耦合形式

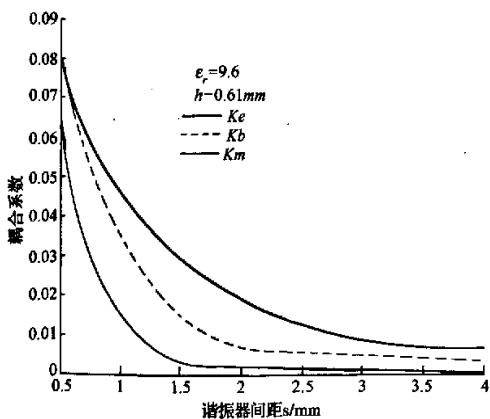


图 3  $\epsilon_r=9.6$  基片中 3 种耦合系数与谐振器间距 S 的关系

## 3 交叉耦合滤波器设计参数合成

交叉耦合滤波器的低通原型如图4所示,其设计参数与其低通原型转换关系:

$$Q_a = Q_o = g_1 / FBW \quad (5)$$

$$M_{n,n+1} = M_{N-n,N-n+1} = (FBW) / (\sqrt{g_n g_{n+1}}) \quad (6)$$

$$M_{m,m+1} = (FBW * J_m) / g_m \quad (m=N/2) \quad (7)$$

$$M_{m-1,m+2} = (FBW * J_{m-1}) / g_{m-1} \quad (m=N/2) \quad (8)$$

其中:FBW 为滤波器的相对带宽; n 从 1 到 N/2; N 为滤波器的阶数;  $Q_a$ 、 $Q_o$  为谐振腔带载输入输出 Q 值; M 为耦合系数; J 为特性导纳系数。

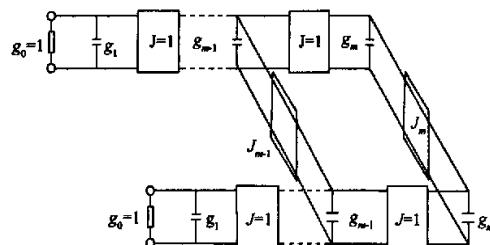


图 4 交叉耦合低通原型

## 4 SIR 谐振器及交叉耦合原理

设计中心频率为 1.97 GHz, FBW 为 2.5% 的带通滤波器,选取 N=4,对中心频率的相对频率取  $\Omega_a=1.8$ ,回波损耗为 -20 dB,对应的低通原型参数为:

$$g_1 = 0.95974; g_2 = 1.42129; J_1 = -0.21083; J_2 = 1.11769$$

则由式(5)~(8)可得外部 Q 值和耦合矩阵 M 分别为:

$$Q=22.32,$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.03682 & 0 & -0.0075 \\ 0.03682 & 0 & 0.03382 & 0 \\ 0 & 0.03382 & 0 & 0.03682 \\ -0.0075 & 0 & 0.03682 & 0 \end{bmatrix}$$

采用介电常数为 9.6,厚度为 0.61 mm 的陶瓷基片制作,根据耦合矩阵 M 结合图3 曲线可确定各个谐振器之间的间距。输入/输出耦合采用抽头形式,它的位置可以根据文献[4]介绍的方法来计算。

根据文献[3]提供的方法为了得到较高的二次谐波的中心频率和实现滤波器的小型化,选择 SIR 电路参数如下:

$Z_1 = 52 \Omega$ ;  $Z_{2o} = 18 \Omega$ ;  $Z_{2i} = 30 \Omega$ ;  $l_1 = 17.93$  mm;  $l_2 = 3.07$  mm 制作出来的滤波器如图5 所示; 图6、图7 是通过 HP85047A 测得的曲线; 图8 是该滤波器频率响应的 EM 仿真结果。如图6 所示其通带中心频率在 1.97 GHz,与理论计算的中心频率吻合。插入损耗为 -4.768 dB,介质的性质、抽头位置及镀金的厚度都会影响插入损耗,使用高温超导材料充当介质可以有效

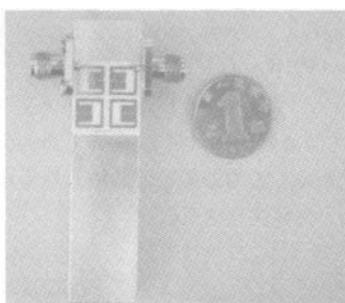


图5 滤波器实物图

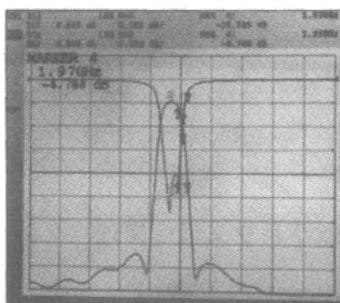


图6 滤波器实测曲线(1)

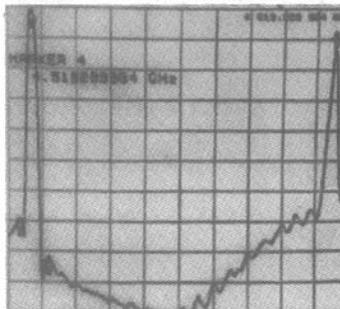


图7 滤波器实测曲线(2)

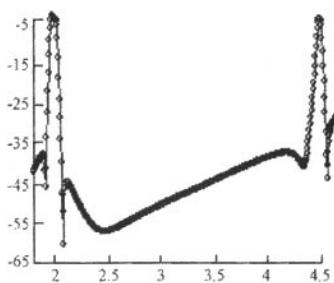


图8 滤波器的EM仿真结果

解决插入损耗大的问题。通带低端的带外抑制约为 $-35$  dB,通带高端的带外抑制为 $-28$  dB。由图7可以看出该滤波器的二次谐波的中心频率 $4.52$  GHz,约为主带中心频率的2.3倍,由此可见通过调整SIR的阻抗比,可以偏移寄生通带,从而达到抑制寄生通带的目的。图7与图8的仿真曲线是很吻合的。

## 5 结 论

本文结合交叉耦合技术和SIR谐振器实现了滤波器的高选择性及小型化,在文章的最后给出了设计实例以及仿真结果,结果表明通过调整SIR谐振器的阻抗比值,可以控制二阶谐波通带中心频率的位置,并且其中心频率的仿真结果和理论计算十分一致。随着新技术和新材料(如高温超导材料)研究的不断深入,这种滤波器的前景诱人。

## 参考文献

- [1] HONG J S, LANCASTER M J. Microstrip filters for RF/Microwave applications[Z]. John Wiley & Sons Inc, 2001.
- [2] 李先胜,吴须大.微带类椭圆函数滤波器[J].空间电子技术,2001,(3).
- [3] LEE S Y. New cross-coupled filter design using improved hairpin resonators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(12): 2482-2490.
- [4] WONG J S. Microstrip Tapped-Line Filter Design [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1979, 27:44-50.

## 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/>