

# 一种高镜像抑制的带通滤波器

刘芬<sup>1</sup>, 郑宏兴<sup>1</sup>, 高凤友<sup>1</sup>

(1 天津工程师范学院天线与微波技术研究所, 天津, 300222; )

**摘要:** 本文介绍了一种具有高镜像抑制能力的微带带通滤波器的设计方法。该方法依靠的是对传输零点的准确定位, 从而选择性地抑制无用的镜像信号, 且对杂散二次谐波信号具有较高的抑制能力。为了说明这一方法, 文中给出了微带带通滤波器的设计实例。仿真结果表明, 所设计的滤波器性能和理论值一致, 能够满足工程设计的要求

**关键词:** 带通滤波器; 传输零点; 镜像抑制; 发夹型滤波器

**中图分类号:** TN713    **文献标识码:** A

**基金资助:** 教育部科学技术研究重点项目(207007)

## Design of High Image-reject Microwave Bandpass Filter

Liu Fen<sup>1</sup>, Zheng Hongxing<sup>1</sup>, Gao Fengyou<sup>1</sup>

(1 Tianjin University of Technology and Institute of Antenna and Microwave Technology, 300222)

**Abstract:** The paper proposed a new method of designing high image-reject bandpass filter. Based on the accurate introduction of transmission zero, undesired image singal and second harmonics are imitated. A bandpass filter is designed by the new method and the simulation results show that it is in accordance with the theoretic results.

**Keywords:** Bandpass filter; Transmission zero; Image-reject; Hairpin-filter

## 1 引言

具有高抑制能力的滤波器在许多射频/微波系统中是非常重要的模块组件, 这些系统需要对无用的镜像信号进行抑制。采用交叉耦合结构<sup>[1]</sup>来制作高抑制滤波器, 能够在不相邻谐振器之间的交叉耦合产生改善幅度衰减的传输零点。但是, 采用这种方法来设计平面滤波器将需要至少四个谐振器<sup>[2]</sup>, 才能达到良好的衰减特性, 且由于有多个谐振器进而产生了高的插损。通过设计传统带通滤波器来实现高镜像抑制和低插损是可能的, 例如交指型<sup>[3][4]</sup>、发夹型<sup>[5][6]</sup>、终端耦合<sup>[7]</sup>以及空腔配置<sup>[8]</sup>等。其中, 空腔滤波器提供了高抑制, 但往往很笨重, 难以与微波集成电路进行集成。终端耦合和发夹型滤波器微波频段最为常用, 但尺寸还是很大, 并且需要越来越多的谐振器。此外, 这些类型带通滤波器表现出不良的二次谐波信号成分。本文给出了一种滤波器设计方法是通过最小的耦合部件利用其谐振器的紧凑结构克服了上述问题。它对传输零点有很好的控制, 从而达到理想的抑制水平。

## 2 传输零点的设置在滤波器设计中的作用

在设计带通滤波器时, 控制好传输零点的位置<sup>[9]</sup>可以使所设计的滤波器更经济有效。图 1(a)所示的三阶带通滤波器, 在直流时串联电感和并联电容没有影响, 故有三个传输零点。而在频率无限大处, 即  $f \rightarrow \infty$  时, 串联电容和并联电感消失, 故也有三个传输零点。其中, 在直流区域传输零点的数量决定了滤波器通

带以下的选择性；而在频率无限大区域的传输零点数目，则决定了通带以上频率段的选择性能。事实上，在直流和频率无限处设计相同数目的传输零点是没有必要的。如果希望在通带以上的频率段衰减的快一些，则可以在无限大频率段多安置一些传输零点。另外，为了改善滤波器性能，除了直流和无限频率处，在其他频率也可引入传输零点，通过增加谐振器可实现这一目的，如图 1(b)所示。图 2 给出了引入传输零点前后所得  $S_{21}$  响应的比较。从图中可以看出，在滤波器传输曲线  $S_{21}$  上产生了两个衰减的极点，分别位于 40MHz 和 100MHz 处，并且由于传输零点的引入滤波器通带内的性能并没有恶化。这就达到了既能改善带外抑制性能，又不影响通带损耗的目的。

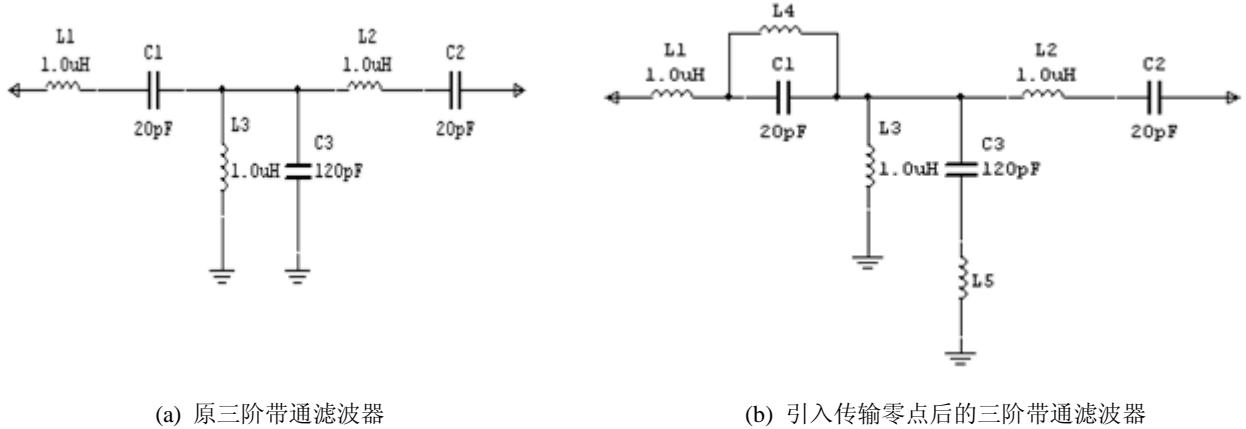


图 1 三阶带通滤波器

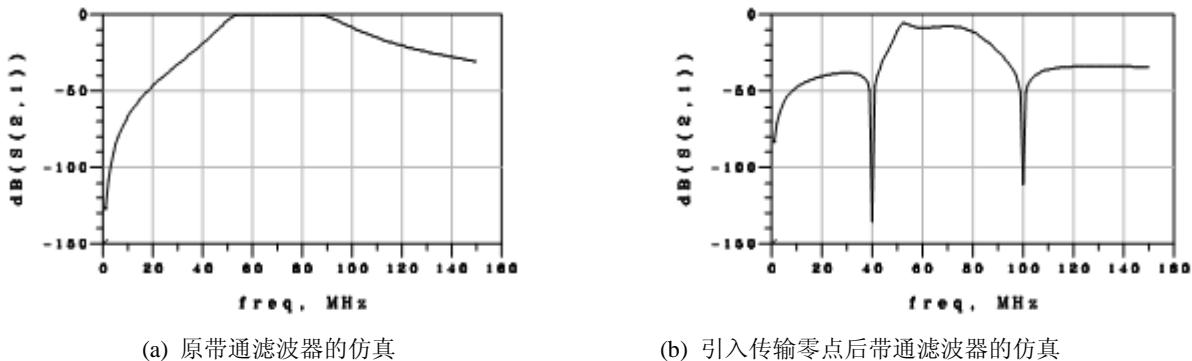


图 2 引入传输零点前后带通滤波器响应比较

### 3 微带带通滤波器的设计原理

这里采用两个面对面的发夹型谐振器来实现平面带通滤波器，其结构如图 3 所示。每个发夹型谐振器<sup>[10]</sup>是半波长耦合微带谐振器的一种变形，是将半波长耦合谐振器折合成“U”字型构成的。谐振器之间的间隙可等效为间隙电容，这样就相当于两条微带线通过一个串联电容  $C_{12}$  而互相耦合起来，同时在两条微带线的截断端与底衬之间也存在一等效电容  $C_1$ ，因此，可以将微带线的间隙等效为  $\pi$  型电路，如图 4 所示。图中  $B_b = \omega_0 C_{12}$ ,  $B_a = \omega_0 C_1$ 。

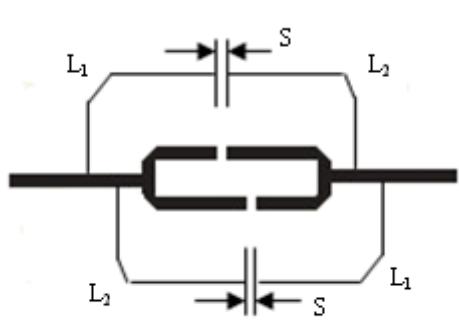


图 3 平面带通滤波器的结构示意图

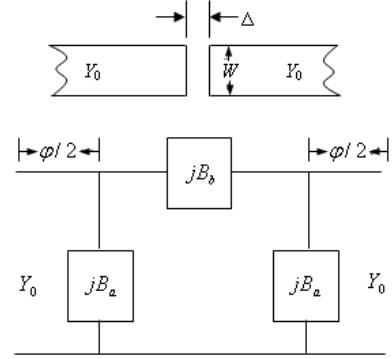


图 4 等效电路

根据微带电路理论, 图 4 的等效电路参数  $B_a$  和  $B_b$  与  $J/Y_0$  的关系为:

$$J/Y_0 = \left| \operatorname{tg}[(\varphi/2) + \operatorname{tg}^{-1}(B_a/Y_0)] \right| \quad (1)$$

式中,

$$\varphi = -\operatorname{tg}^{-1}[(2B_b/Y_0) + (B_a/Y_0)] - \operatorname{tg}^{-1}[(B_a/Y_0)] \quad (2)$$

$\varphi$  为负的电长度。由公式可知, 在间隙等效电路两端加一负电长度后等效为一个电纳为  $J/Y_0$  的电纳倒置转换器。但是, 该电路在实际使用中必须用在其相邻电路具有相同导纳的传输线中, 使其负值电长度加在相邻的传输线上, 从而抵消了负的电长度。根据滤波器理论, 可得到以下公式:

$$J_{01}/Y_0 = \sqrt{\pi W/(2g_0 g_1 \omega'_1)} \quad (3)$$

$$\left. \frac{J_{j,j+1}}{Y_0} \right|_{j=1 \sim n-1} = \frac{\pi W}{2\omega'_1 \sqrt{g_j g_{j+1}}} \quad (4)$$

$$J_{n,n+1}/Y_0 = \sqrt{\pi W/2g_n g_{n+1} \omega'_1} \quad (5)$$

式中  $g_j$  是低通原型滤波器的元件值,  $n$  为滤波器的阶数,  $\omega'_1$  是其归一边带频率;  $W$  是带通滤波器的相对带宽。

对于小电容间隙耦合传输线滤波器, 可近似令  $B_a = 0$ , 即  $C_1 = 0$ , 这时可得下列关系式:

$$B_{b,j,j+1}/Y_0 = \frac{J_{j,j+1}/Y_0}{1 - (J_{j,j+1}/Y_0)^2} \quad (6)$$

$$C_{j,j+1} = B_{b,j,j+1}/\omega_0 \quad (7)$$

$C_{j,j+1}$  是微带间隙的耦合电容。等效电路两边的负电长度  $\varphi/2$  应合并到半波长谐振器的电长度上, 使得半波长谐振器的实际电长度为  $\pi$  减去两个相邻导纳倒置转换器的负电长度  $\varphi/2$ , 即:

$$\theta_j = \pi - [\operatorname{tg}^{-1}(2B_{j-1,j}/Y_0) + \operatorname{tg}^{-1}(2B_{j,j+1}/Y_0)]/2 \quad (8)$$

求出  $C_{j,j+1}$  和  $\theta_j$  之后, 半波长谐振器的实际长度  $l_j$  可通过下式得到:

$$l_j = \lambda\theta_j / (2\pi\sqrt{\epsilon_e}) \quad (9)$$

其中  $\epsilon_e$  为有效介电常数。结合具体电路参数，比如微带电路的相对介电常数，厚度等，通过计算机优化设计可得到间隙间隔宽度  $\Delta$ 。

## 4 设计举例

### 4.1 关键参数计算

设计一个通带为 4.52GHz 到 4.65GHz 的带通滤波器，所用印制板的介电常数为 10.2，板材厚度为 0.65mm，铜箔厚度为 0.035mm。选用通带波纹为 0.1 的 Chebyshev 低通原型滤波器。通过(6)-(9)式可求得发夹谐振器的臂长为 12.5mm，且  $L_1=6.7\text{mm}$ ,  $L_2=5.8\text{mm}$ 。由抽头所在位置  $L_1$ 、 $L_2$  可确定引入传输零点所在的频率。即：

$$f_1 = c / (4L_1\sqrt{\epsilon_e}) = 4.3 \text{ GHz}$$

$$f_2 = c / (4L_2\sqrt{\epsilon_e}) = 4.92 \text{ GHz}$$

### 4.2 仿真结果

图 5 仿真结果表明，在 4.3GHz 和 4.92GHz 间所要求频率上有超过 45dB 的优良带外抑制，并且在较低频率上有优于 30dB 的抑制。滤波器的回波损耗优于 15dB，且具有低于 10dB 的二次谐波。

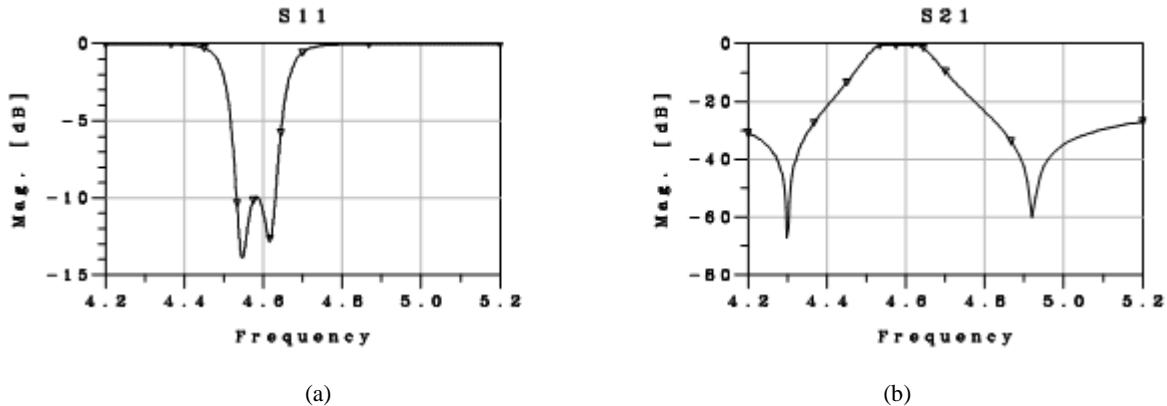


图 5 仿真结果

由仿真可知，改变抽头位置可改变传输零点的位置，进而影响滤波器的选择性，但这可能导致过耦合。除了由抽头位置造成的耦合效应外，耦合间隙  $S$  也影响了两个谐振器之间的耦合。从图 6 的仿真，可以看到耦合间隙的增加导致了更好的品质因数  $Q$ 。因此，为避免过耦合条件，应慎重选择抽头位置和间隙大小。一旦确定了抽头位置，对所要求的滤波器响应，耦合间隙  $S$  应得以优化。

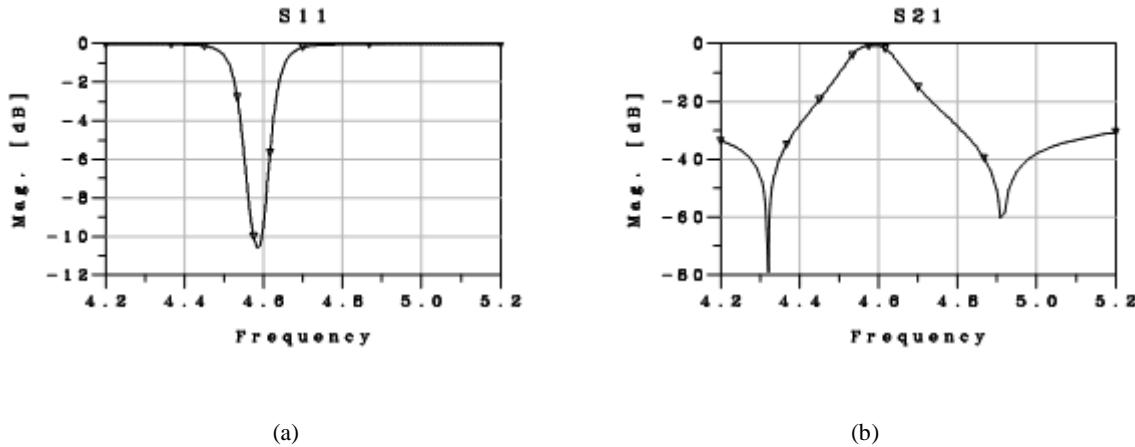


图 6 增大耦合间隙后的仿真结果

## 5 结语

本文给出了高镜像抑制平面滤波器的设计原理和整个设计过程。可以看出，所设计的滤波器通过控制传输零点实现了较高的镜像抑制且没有不良耦合，适用于乘法器或其他要求对镜像信号抑制的器件中。该设计方法还提供了用于放大器和频率源的优良二次谐波抑制。在设计过程中，以小电容间隙耦合间隔作为优化目标参数来寻求最优解，从而在保证设计精度的同时提高了设计效率。

## 参考文献

- [1] Hong Jiasheng, Lancaster M J. Couplings of microstrip square openloop resonators for cross-coupled planar microwave filters[J]. IEEE MTT, 1996, 44(12): 2099-2108.
- [2] 赵亮, 李平辉, 崔志富. 一种带有新型寄生通带抑制结构交叉耦合滤波器设计[J]. 军事通信技术, 2007, 28(4): 84-86.
- [3] MATI'HAEI G L, YOUNG L, JONES E M T. Microwave Filters, Impedance Matching Network, and Coupling Structure[M]. Norwood: Artech House, 1980.
- [4] 王义, 楚光辉. 一种微带交指型滤波器的改良型设计[J]. 电磁场与微波, 2007, 37(12): 34-36.
- [5] 邓哲, 程崇虎, 吕文俊等. 微带发夹型谐振器滤波器的实验研究[J]. 微波学报, 2005, 21(4): 122-126.
- [6] 高媛, 邓中亮. 微带发夹型带通滤波器设计[J]. 电磁场与微波, 2008, 38(4): 40-42.
- [7] J.S Hong and M.J.Lancaster, Microstrip Filter for RF/Microwave Applications[M], New York: Wiley, 2001.
- [8] 邓贤进, 李家胤, 张健. 微波腔体滤波器的快速设计及仿真[J]. 微波学报, 2006, 22(4): 53-56.
- [9] 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[J]. 微波学报, 2006, 22(1): 34-38.
- [10] 李明洋, 郭陈江. 微带抽头线发夹型滤波器设计[J]. 电子工程师, 2003, 29(9): 57-60.

## 作者简介:

刘 芬 女, 1979 年 6 月出生, 天津工程师范学院讲师, 主要从事数字信号处理、微波电路等方面的研究。

## 联系方式与通信地址:

刘芬 联系电话: 022-88287532 或 13821032764 通信地址: 天津工程师范学院电子系 邮编: 300222 Email:yjs750818@tom.com

## 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>