

# 耦合系数法设计微波带通滤波器及 CAD 实现

王清芬, 马延爽

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

**摘要:** 介绍了一种直接耦合微波带通滤波器的设计方法, 同时给出了一个滤波器的设计实例和测试结果。运用网络综合法, 根据所需技术指标, 计算出腔间耦合系数和外界  $Q$  值的理论值。采用 CAD 方法进行了仿真, 得到了相应的实际的谐振腔的耦合结构, 然后进行整体仿真优化, 完成整个设计。具有通用性强, 设计准确, 减小研制周期等优点。

**关键词:** 低通原型; 直接耦合带通滤波器; 耦合系数; 谐振腔; HFSS

中图分类号: TN454

文献标识码: A

文章编号: 1003-3114(2008)01-43-2

## Design of Microwave Filter with Coefficient and CAD Realization

WANG Qing-fen, MA Yan-shuang

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang Hebei 050081, China)

**Abstract:** This article introduces a method of designing direct coupled microwave bandpass filter, meanwhile provides an example and the test results. We can work out the ideal coupling coefficient between resonators through network synthesis according to the required specification. Simulating with CAD, we can get the practical coupling structure. Then optimizing the whole filter, we can obtain the final design. Besides the universal applicability and veracity, the method can shorten product manufacturing cycle.

**Key words:** lowpass prototype; direct coupled bandpass filter; coupling coefficient; resonator; HFSS

### 0 引言

微波带通滤波器是一种具有选频特性的部件。随着多种通信方式的飞速发展, 频率拥挤日趋严重, 对频率的分隔要求也越来越高。因此微波带通滤波器的应用也越来越广泛, 对设计也提出了更高的要求。滤波器的实际形式多种多样, 每一种结构形式有各自的一套设计公式和图表, 要掌握这些设计方法十分繁琐和困难, 而且其适用性和准确性也有限。由于微波滤波器的加工周期长, 成本高, 因此对设计的准确性提出了更高的要求。随着各种电磁场仿真软件的商业化发展, 一系列如 HFSS 这样可以达到准确计算的软件不断涌现, 而且先进的计算机技术使得这类计算的速度和时间已经提高到了人们可以接受的程度。耦合系数法, 就是在目前 CAD 发展的基础上开创的一种设计直接耦合微波带通滤波器的通用方法。它可以用来设计波导、同轴、交指、梳状等各种形式的滤波器, 使它们的耦合结构形式能够多种多样, 满足不同需求; 还可用来设计特殊形式的滤波器, 如具有附加耦合的滤波器, 电调滤波器等。

收稿日期: 2007-08-17

作者简介: 王清芬(1979-), 女, 工程师。主要研究方向: 微波散射通信。

### 1 设计原理

#### 1.1 理论分析

网络综合法设计微波带通滤波器首先要从集总参数低通滤波器开始研究, 引入阻抗变换器后可以使其变换成只用一种电抗元件的低通原型, 然后根据频率变换, 转化为集总元件带通滤波器, 一般情况下把阻抗变换器看成耦合器, 形成集总参数带通滤波器。然后考虑在通带频率附近如何用分布参数来实现它, 从而完成整个直接耦合微波带通滤波器的设计。

实际上理想的“矩形响应”的低通滤波器是无法实现的, 只能力图逼近理想曲线。根据所选逼近函数的不同, 会有不同的响应, 经常用到的一种是“Butterworth 响应”, 又称最平坦响应; 另一种是“Tchebycheff 响应”, 又叫做等波纹响应; 还有一种椭圆函数响应。

最平坦响应函数, 在通带内可以得到平坦的幅频响应, 但会牺牲带外抑制度; 而等波纹响应却可以得到比较理想的带外特性, 但带内有波纹; 而椭圆函数虽然响应特性更逼近矩形, 但阻带有波动。一般情况下, 选用 Tchebycheff 响应。

低通原型电原理图如图 1 所示。

引入导纳

( $J$ )变换器可将上述低通原型变换成只有一种电抗元件的等效电路,如图2所示。

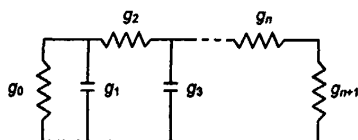


图1 低通原型电原理图

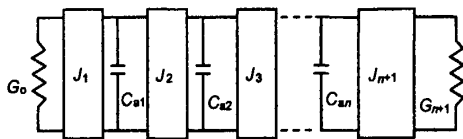


图2 只有一种电抗元件的低通原型

低通原型滤波器可以通过下述频率变换将其转化为带通滤波器,如图3所示。

$$w' = w'_1(w/w_0 - w_0/w)/W, \quad (1)$$

$w'_1$ 为原型低通滤波器的截止频率;

$w'$ 为原型低通滤波器的频率轴;

$W = (w_2 - w_1)/w_0$ 为带通滤波器的相对带宽;

$w_0 = \sqrt{w_1 w_2}$ 为经过频率变换后的带通滤波器通带中心频率;

$w_2$ 为频率变换后带通滤波器上带边频率;

$w_1$ 为频率变换后带通滤波器下带边频率;

$w$ 为频率变换后的带通滤波器频率坐标。

低通原型滤波器中的并联电容 $C_n$ ,其容纳经过式(1)变换到带通滤波器中,变成一个电容和一个电感的并联,如图3所示。

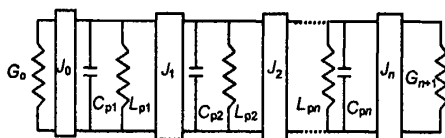


图3 理想带通滤波器电原理图

$$w' C_n = w'_1(w/w_0 - w_0/w) C_n / W = w C_p - 1/w L_p,$$

式中,  $C_p = w'_1 C_n / W w_0$ ;  $L_p = W / w'_1 w_0 C_n$ 。

一般来讲,上述的导纳变换器 $J$ 可以用一个电容或一个电感来实现,在微波结构中就是耦合; $L_p$ 和 $C_p$ 组成的并联谐振器可以用微波谐振腔来等效。这样形成的带通滤波器称为直接耦合微波带通滤波器。

与图2、图3对耦的阻抗( $K$ )变换器、串联谐振腔的滤波器形式不再赘述。

## 1.2 要点分析

用耦合系数法设计直接耦合微波带通滤波器的要点有3个:外界 $Q$ 值,腔间的耦合系数和谐振腔的频率。

① 外界 $Q$ 值的理论值可以用如下公式得到:

$$Q_e = g_0 g_1 / W \text{ 或 } Q_e = g_n g_{n+1} / W;$$

式中, $W$ 是带通滤波器的相对带宽; $g_0$ 、 $g_1$ 、 $g_i$ 、 $g_{i+1}$ 为归一化的低通元件值。

外界 $Q$ 值,可通过HFSS仿真由下式计算,得到相应的结构尺寸:

$$Q_e = f_0 \tau_{\max} / 4.$$

式中, $\tau_{\max}$ 是单端输入,单个谐振腔的群时延的最大峰值; $f_0$ 是 $\tau_{\max}$ 对应的谐振频率。

当仿真值和理论值相等时,就可以得到实际的正确的输入输出耦合结构。

② 腔间的耦合系数:腔间耦合系数的理论值可以用如下公式得到:

$$k_{i,i+1} = W / \sqrt{g_i g_{i+1}}, \quad (2)$$

式中, $W$ 为带通滤波器的相对带宽; $g_i$ 、 $g_{i+1}$ 为归一化的低通元件值( $i = 1, 2, 3 \cdots n$ )。

耦合系数 $k_{i,i+1}$ ,可以通过HFSS仿真,由下式计算,得到合适的结构尺寸:

$$k_{i,i+1} = (f_2^2 - f_1^2) / (f_2^2 + f_1^2), \quad (3)$$

式中, $f_1$ 、 $f_2$ 是双腔本征模仿真时2种模式的频率值(令 $f_2 > f_1$ )。

选定腔体结构,运用本征模仿真,可以得到2个模式的频率值,代入式(3),当得到的值与式(2)的理论值逼近或相等时,便可以认为此结构的大小就是所需要的值。

③ 谐振器的谐振频率:谐振器的结构比较复杂,它的结构初值可以采用耦合系数本征模仿真以及外界 $Q$ 值仿真时的值。如果是窄带调谐滤波器(3%以内),上述值就可以作为设计尺寸。如果带宽在5%以上,要达到免调谐的目的,每个谐振器的准确值,可以通过仿真优化最终确定。

## 2 设计实例

本实例采用六腔同轴形式,腔间耦合结构采用模片加单销钉的混和结构,通带中心频率为2 102 MHz,相对带宽1%,插入损耗 $L_0 < 1$  dB,回波损耗 $< -17.8$  dB。

(下转第55页)

明显下降。基于高阶统计量的双谱法在声源信号为非高斯分布,噪声为高斯分布情况下可以彻底地消除噪声的影响,具有较高的时延估计精度,但当噪声为非高斯分布且不对称时,其影响较为明显,且该方法计算量较大。LMS 自适应滤波器法能够自动调节自身结构和参数并实现最优。与前 3 种方法相比,该方法主要优点是不依赖于输入信号和噪声的先验知识,可用于统计特性变化的时变环境,但其计算量也是很大的。

本文只涉及了单个声源信号存在的情况,在实际生活中,可能面临着实际声源与多个干扰源同时存在的情况。如何在这种较复杂的环境中利用传声器阵列更好地进行时延估计并给出实际声源精确的定位将是进一步需要解决的问题。

(上接第 44 页)

其耦合系数和外界  $Q$  值的理论值为:

$$Q_e = 27.9,$$

$$k_{12} = 0.009\ 462\ 416\ 7 = k_{56},$$

$$k_{23} = 0.006\ 117\ 982\ 8 = k_{45},$$

$$k_{34} = 0.005\ 685\ 061\ 8.$$

通过 HFSS 仿真,可以得到:全部耦合窗厚度选 1 mm,开窗高度 10 mm;销钉直径 3.5 mm,销钉位置关于中心对称,从外到里销钉偏离中心位置分别为 6.8 mm、4.2 mm、3.8 mm。腔体初值选择  $30 \times 30 \times 25.86\text{ mm}^3$ ;内导体直径 9 mm,第 1、6 腔内导体高度 23.67 mm,其他腔内导体高度 23.55 mm。输入输出采用抽头形式,抽头直径 1 mm,抽头高度 4.86 mm。

其结构形式如图 4 所示。

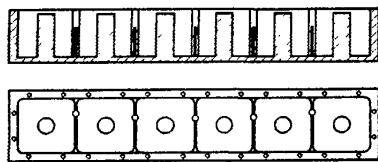


图 4 同轴滤波器结构示意图

仿真曲线如图 5 所示。

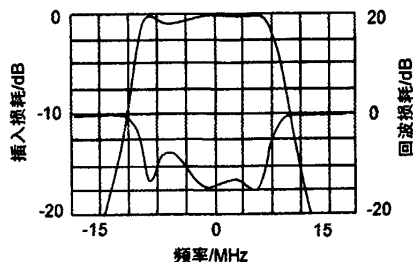


图 5 HFSS 仿真曲线

实际的测试曲线如图 6 所示。

CH1 S11 LOG 10dB/REF 0 dB  
CH2 S21 LOG 10dB/REF 0 dB

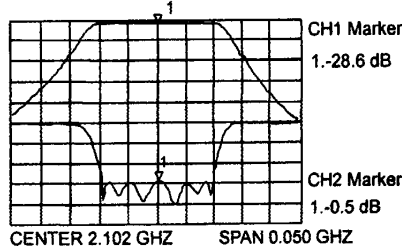


图 6 实际测试曲线

### 3 结束语

通过设计实例可以看出,用耦合系数法设计的同轴带通滤波器的实际曲线与仿真曲线的带宽和驻波一致。并且其耦合结构可以选择多种形式,如设计实例中模片销钉混和结构,使滤波器的设计具有了更大的灵活性,满足不同的需要。并且使用 HFSS 的优化功能,可以得到更加精确的设计,带宽 5% 以上时,甚至可以做到免调谐。经过工程的实际验证,用耦合系数法设计的其他多种形式的滤波器,也取得了很好的效果,从而解决了设计微波滤波器的关键问题之一。相对于其他的设计方法,有很好的通用性,具有很大应用空间。

### 参考文献

- [1] 甘本被,吴万春.现代微波滤波器的结构与[M].北京:科学出版社,1973.
- [2] HONG Jia-sheng, LANCASTER M J. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications[M]. USA: John Wiley & Sons, Inc, 2001.

## 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/>