

C波段窄带腔体滤波器设计

张 华^{1,2} 孙 健¹ 陶若燕¹

1.南京电子器件研究所 2.单片集成电路与模块国家重点实验室

摘要：本文对同轴腔体滤波器的电磁结构模型进行了理论分析，得出计算谐振腔体间耦合系数的公式，以及谐振单元本征值等关键参数，并应用三维电磁仿真软件进行分析、优化，最后对滤波器实物进行测试，实测与仿真结果吻合。与传统的C波段腔体、波导窄带带通滤波器相比，该同轴腔体滤波器实现了小型化。

关键字：窄带同轴腔体滤波器，全波分析，耦合系数，本征值

Design of a C-band Narrow-band Cavity Filter

Hua Zhang^{1,2} Jian Sun¹ Ruoyan Tao¹

1.Nanjing Electronic Devices Institute 2.National Key Laboratory of Monolithic Integrated Circuits and Modules

Abstract: An electromagnetic model for coaxial cavity filter is theoretically analyzed in this paper. Based on this model, the calculation expressions of cavity coupling factors are derived, and the eigenmode value of each resonator unit is obtained, which are significant parameters to filter design. The 3D electromagnetic simulation software is used to analysis and optimization for the narrow-band cavity filter. Finally, the filter is fabricated and tested. The experiment and simulation results are in coincidence. In comparison with the traditional C-band cavity or waveguide narrow-band band-pass filters, the designed coaxial cavity filter is minimized in size.

Key Words: Narrow-band coaxial cavity filter, Full wave analysis, couple coefficient, Eigenmode value

1 引言

C波段窄带带通滤波器用于接收机前端的预选器，作为第一级，放在低噪声放大器之前。主要用于接收系统抑制外部干扰和噪声，同时还要求其带外抑制特性要对镜像频率、特定频点具有良好的抑制作用。其频带宽度和频率特性影响着滤波作用的好坏，直接关系到接收机的灵敏度、波形失真等重要指标[1]。

微波带通滤波器的结构设计对系统部件的体积、重量有着决定性的影响。为了满足整机系统需要小型化、高Q值窄带预选器的要求，必须克服体积与指标的矛盾，实现体积小、插损低和高选择性的滤波器，使部件最大可能地实现结构最优化。同轴腔体带通滤波器是微波滤波器的传统结构之一，它具有Q值高、易于实现的特点，特别适用于通带窄、带内插损小、带外抑制高的场合。其传统设计方法是：按照响应要求（如切比雪夫响应）查表，推算腔体之间耦合系数，

在此基础上利用近似的计算方法设计相应耦合及输入输出结构。然而，在实际设计过程中发现，要达到所需的技术指标，用传统方法设计的C波段同轴腔体带通滤波器尺寸相对较大，仍然无法满足小型化的需求。针对这一现状，本文对传统同轴腔滤波器结构进行了一些改进；并且从“场”角度出发，提出了一种计算谐振单元本征值以及根据电磁模型计算谐振腔间耦合系数、输入输出结构的方法来设计窄带腔体滤波器；最后，设计出结构更加紧凑的同轴腔窄带带通滤波器。

2 设计原理

A. 同轴腔滤波器基本工作原理

同轴腔滤波器工作于TEM模，其结构原理如图1所示。各谐振单元之间的通过电磁场耦合，但主要是通过磁场耦合[2]。这主要是因为放在两个谐振杆开路端之

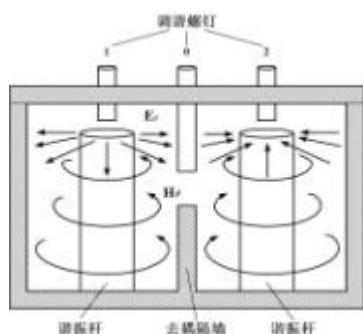


图1 同轴腔滤波器结构原理图

间的调谐螺钉(0)会减小谐振杆之间的电场耦合,因而增加了磁耦合(它等于电磁场耦合总量减去电场耦合量)。同理,两个谐振杆短路面之间的去耦隔墙减少了磁耦合,从而也减小了总耦合量。位于两个谐振杆开路端正中心上方的调谐螺钉(1、2)主要用于调整谐振腔的谐振频率。

B. 滤波器设计原理

一般,微波滤波器的设计方法是用“路”的理论,即用“网络综合法”,从低通原型开始,经频率变换导出各种电路网络,然后再用微波结构实现。但是,就微波滤波器的基本谐振单元和耦合结构来说,其属于电磁场-即“场”问题。因此,我们设计带通滤波器可以根据工作频率选择已知电磁场解的谐振单元;再根据通带宽度选择耦合结构和级数;然后是设计输入输出的耦合形式;最后综合考虑频率调谐、带宽调谐、响应微调及驻波调整等。

3 设计方法与结构实现

A. 谐振单元的本征模计算

首先,根据滤波器的通带频率选择已知电磁场解的谐振单元。我们构造单腔,与图2所示实际滤波器中单个腔体的尺寸一致;再利用三维全波电磁仿真软件Ansoft HFSS进行本征模分析。本征模式是结构的谐振频率。基于有限元算法的HFSS采用本征模式求解器求出该结构的谐振频率。通常,同轴腔谐振杆长度选择约为 $\lambda_0/4$ (λ_0 为通带中心频率对应的波长),谐振杆的一端开路,另一端短路;由于谐振杆开路面与谐振腔壁之间构成了一个电容负载,因此,谐振杆的长度有所缩短。欲使本征模频率等于通带中心频率 f_0 ,可以优化谐振杆的长度 h (直径 D 固定)。为了求谐振频率,本征模式求解下面的方程[3]:

$$SX + k_0^2 TX = 0 \quad (1)$$

公式(1)中的 S 和 T 是依赖于结构和网格的矩阵;变量 X 是电场解; k_0 是相应电场模式的自由空间波常数。则谐振模式的频率为:

$$f_0 = \frac{k_0 c}{2p} \quad (2)$$

其中, c 为光速。

B. 耦合结构和级数选择

滤波器工作在C波段,要求:相对带宽(-3dB):0.35%;带外抑制: $f_0 \pm 35\text{MHz} > 20\text{dBc}$ 、 $f_0 \pm 350\text{MHz} > 60\text{dBc}$ 。要实现这样窄带宽、高选择性的带通滤波器,谐振腔之间的耦合是关键。一般,滤波器的带宽越窄,级数就越多;但是受整机体积的限制,我们只能设计两腔的同轴滤波器,其结构如图2所示。谐振腔之间通过非对称感性膜片耦合,为使该处边壁不致太厚,将两谐振腔边壁的中间部分削平,膜片壁厚0.5mm;通过开窗 W 大小来调节腔体之间的耦合,谐振腔间的耦合系数对滤波器带宽有决定性的影响,腔间耦合越小,滤波器带宽越窄(同时带内插损也相应增大);反之亦然。这种腔体滤波器可以用图3所示的等效电路来表示。其中,一对并联的电感 L_i 和电容 C_i ($i=1 \sim N$)代表谐振器单元;谐振器间的串联电感 L_{ci} ($i=1 \sim N-1$)代表谐振器之间的耦合-主要是磁耦合[4]。这种集总参数元件组成的等效电路可以有效地表达具有复杂场分布的三维电磁结构。

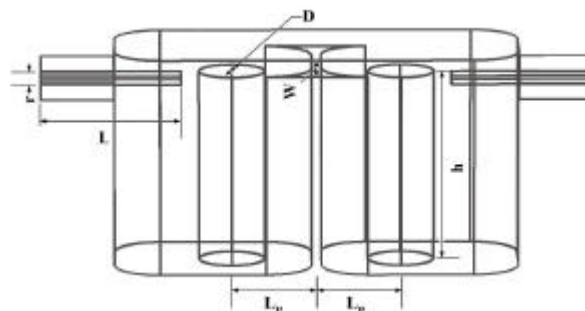


图2 C波段同轴腔体滤波器结构示意图

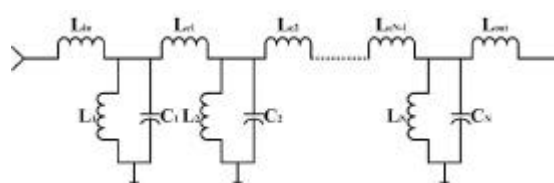


图3 同轴腔体滤波器的等效电路图

电感耦合膜片的归一化电纳值为[5]:

$$\frac{B}{Y_0} \approx -\frac{I_g}{a} (1 + \csc^2 \frac{pw}{2a}) \cot g^2 \frac{pw}{2a} \quad (3)$$

(3)中, I_g 为通带中心频率处的波长, a 为谐振腔高度, W 为耦合窗的大小。

谐振腔之间的耦合系数为:

$$k_{i,i+1} \big|_{i=1 \sim n-1} = \frac{(B_{i,i+1})_m f_0}{\sqrt{\lambda_i \lambda_{i+1}} (f_0)_m} \quad (4)$$

其中, $B_{i,i+1}$ 为(3)给出的电感耦合膜片的电纳值; f_0 是滤波器任一给定的调谐频率, $(f_0)_m$ 是调谐范围的中心频率; 而 λ 是谐振器的电纳斜率参数[6]:

$$\lambda = \frac{w_0}{2} \frac{dB}{dW} \big|_{w_0} \quad (5)$$

(5)中, w_0 是谐振器的谐振频率, B 为谐振器的电纳。

将(3)、(5)分别代入(4), 就可以根据不同 W 值计算出谐振腔间耦合系数的大小, 从而确立耦合窗宽度 W 与耦合量之间的对应关系, 这样就可以根据所需指标选择合适的耦合窗宽度 W 的初值。

C. 输入输出结构

正如图2所示, 输入输出采用探针耦合方式, 探针耦合是将输入输出同轴线的内导体直接延伸到谐振腔中电场最强的位置, 并与电力线相并行, 这是一种电耦合。设输入输出线半径 r 固定, 其长度 L 的改变 (即改变耦合点的位置) 可使回波损耗最佳。

D. 调谐机构

如图1所示, 正对于谐振杆开路端中心的腔体上盖板处设置调谐螺钉, 来实现加载调谐电容, 用于调试时调谐通带中心频率。而腔间感性窗处的螺钉调节带宽及带内波动。

E. 结构实现

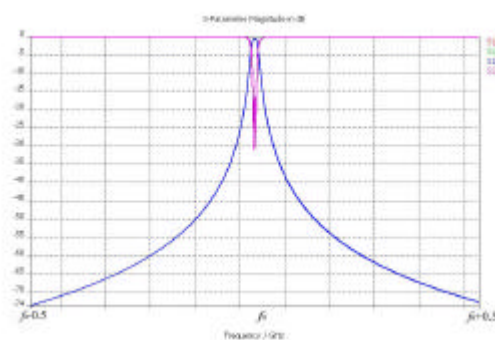
根据系统对滤波器尺寸的要求, 我们确定相应的总体结构尺寸。谐振杆的外径与腔宽的比值可近似按截面为内圆外方的同轴腔标准选择[7], 两腔对称地放置于膜片两侧。结构设计参数主要有耦合窗 W 的大小、输入输出线的长度 L 、谐振杆的长度 h 及固定于腔体底面的位置 L_P (谐振杆与膜片壁的中心距离)。应用三维电磁软件分析腔体结构参数对滤波器性能的影响, 并对这些参数进行优化, 以达到所需指标。

利用上述方法, 设计制作了同轴腔体带通滤波器, 腔体、调谐螺钉材料为黄铜, 谐振杆和输入输出同轴线内导体采用殷钢, 各加工件表面均镀银。由于窄带滤波器对 Q 值较敏感, 因此对内腔表面的光洁度要求较高, 以保证滤波器有较高 Q 值和较低插损。为此,

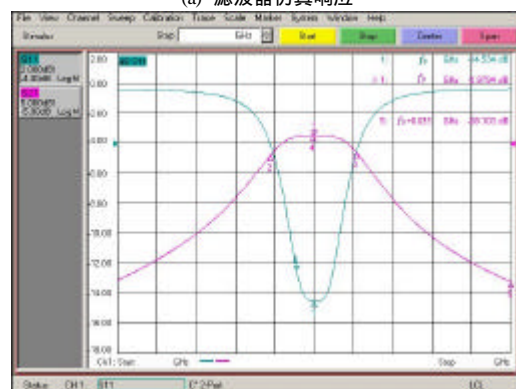
我们采用数控铣床对滤波器腔体进行加工, 两个空腔的四个拐角分别被铣成半径为2.5mm的圆角。

4 仿真与测试结果

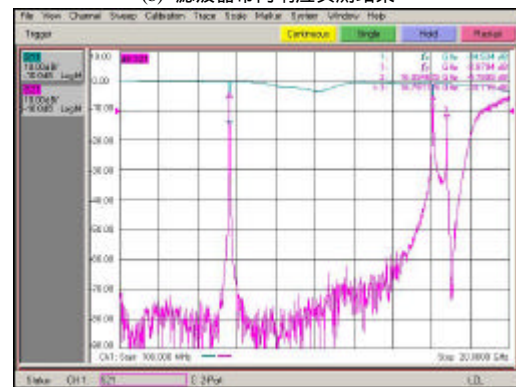
用Agilent N5230A PNA 矢网对滤波器进行测试, 实测结果中, 包含了测试架的插损和反射损耗 (未扣除)。图4给出了全波电磁软件的仿真与测试数据, 实测结果是带内插损: $< 3\text{dB}$, 反射损耗: $< -14.5\text{dB}$, -3dB 带宽: 16.3MHz , 带外抑制: $f_0 \pm 35\text{MHz} > 25\text{dBc}$ 、 $f_0 \pm 350\text{MHz} > 65\text{dBc}$; 理论仿真与实测结果较吻合。滤波器总体尺寸: $30 \times 11 \times 16\text{mm}$ 。其设计完全达到了所需指标和尺寸要求。



(a) 滤波器仿真响应



(b) 滤波器带内响应实测结果



(c) 滤波器带外响应实测结果

图4 同轴腔体滤波器的仿真与测试结果

5 结论

本文从“场”的角度出发,根据滤波器的电磁结构模型,对同轴腔体带通滤波器进行理论分析,得到腔体之间耦合系数的计算公式、谐振单元本征值以及输入输出结构等关键参数,并应用三维电磁仿真软件进行分析、优化,设计滤波器结构尺寸参数;然后按照设计参数加工实物并进行测试。从实验结果来看,除带内插损稍大以外,其余指标均与仿真结果一致。与传统的C波段腔体、波导窄带带通滤波器相比,该滤波器体积更小,达到了系统对滤波器尺寸的要求。

参考文献

- [1] 弋稳,雷达接收机技术,北京:电子工业出版社,2005.4.
- [2] R.W.Rhea, HF Filter Design and Computer Simulation. Atlanta, G.A:Noble, 1994, pp. 321.
- [3] Matthew N.O. Sadiku, Numerical Techniques in Electromagnetics. New York, CRC Press,2001.
- [4] R.Wenzel, "Synthesis of combline and capacitively loaded interdigital bandpass filters of arbitrary bandwidth," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.MTT-19,pp.678-686, Aug.1971.
- [5] R.F. 哈林登, 孟侃译, 正弦电磁场, 上海: 上海科学技术出版社, 1964.4.
- [6] 科技情报通讯编译室, 微波滤波器阻抗匹配网络与耦合结构, 上海: 1972.2.
- [7] 微波工程手册编译组, 微波工程手册, 1972.

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(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/>