

# 1800MHz 同轴谐振微波介质滤波器的结构设计及其仿真<sup>①</sup>

樊 鹏 周东祥 赵 俊 黄 川

(华中科技大学电子科学与技术系 武汉 430074)

## 摘要

研究 1800MHz 的微波介质滤波器的设计原理和计算方法,同时使用高频结构仿真软件对所设计的滤波器进行了仿真分析。所要求的滤波器的参数指标为:中心频率  $f_0 = 1800\text{MHz}$ , 插入损耗  $\text{IL} < 2.5\text{dB}$ , 3dB 带宽  $\text{BW} = 45\text{MHz}$ , 带内波动  $A_p < 1.5\text{dB}$ , 100MHz 处带外抑制  $A_s > 25\text{dB}$ 。

**关键词:** 介质滤波器 HFSS 仿真

**中图分类号:** TP391.9

## Structure Design and Simulation of a 1800MHz Microwave Dielectric Filter Using Coaxial Resonators

Fan Peng Zhou Dongxiang Zhao Jun Huang Chuan

(Dept. of Electronic Science and Technology, HUST, Wuhan 430074)

**Abstract :** This paper introduces the design principle and calculating method of a 1800MHz microwave dielectric filter consisting of coaxial resonator, and uses High Frequency Structure Simulation (HFSS) software to simulate the design. The required parameters of the microwave bandpass dielectric filter : center frequency  $f_0 = 1800\text{MHz}$ , insertion loss  $\text{IL} > 2.5\text{dB}$ , 3dB band  $\text{BW} = 45\text{MHz}$ , ripple in the band  $A_p < 1.5\text{dB}$ , the attenuation in the stopband  $A_s > 25\text{dB}$ .

**Key word :** dielectric filter, HFSS, simulation

**Class number:** TP391.9

## 1 引言

介质滤波器是由介质谐振器构成的滤波器。而介质谐振器是由于电磁波在介质内部进行反复全反射谐振所形成的。因为电磁波在高介电常数的物质里传播时,其波长可以缩短,正是利用这一特点可以构成小型的微波谐振器。介质滤波器作为高频元器件,在微波通信和移动通信领域已成为不可缺少的电子元器件。

本文主要研究中心频率  $f_0 = 1800\text{MHz}$ , 带宽  $\text{BW} = 45\text{MHz}$ , 插入损耗在  $\text{IL} < 2.5\text{dB}$ , 带内波动  $A_p < 1.5\text{dB}$ , 在  $\pm 100\text{MHz}$  处的带外抑制  $A_s = 25 \sim 45\text{dB}$  的同轴谐振介质滤波器的设计以及使用来进行仿真。

## 2 电路结构设计

### 2.1 滤波器的阶数以及结构图

以现代微波滤波器的设计理论为基础,根据已知的滤波器参数确定滤波器的级数以及等效电路图。

滤波器级数  $n$  是一个重要的参数,它的选择直接影响到滤波器的性能,特别是滤波器的插损和带外抑制特性。下面就研究如何确定滤波器的阶数  $n$ ,按已知条件确定如下<sup>[1]</sup>:

给定条件:(1) 中心频率:  $f_0 = 1800\text{MHz}$

(2) 通带:  $1800\text{MHz} \pm 45\text{MHz}$   $A_p < 1.5\text{dB}$

(3) 阻带:  $f_{s1} < 1700\text{MHz}$ ,  $f_{s2} > 1900\text{MHz}$

$A_s > 25\text{dB}$

① 收到本文时间:2004 年 10 月 18 日

$f_{s1}$  与  $f_{s2}$  的几何对称:

$$f_{s2} = \frac{f_0^2}{f_{s1}} = 1905.9 \text{ MHz},$$

$$f_{s1} = \frac{f_0^2}{f_{s2}} = 1705.3 \text{ MHz}$$

$$(\Delta f_s)_1 = f_{s2} - f_{s1} = 205.9 \text{ MHz}$$

$$(\Delta f_s)_2 = f_{s2} - f_{s1} = 194.7 \text{ MHz}$$

$$\text{取 } \Delta f_s = 194.7 \text{ MHz}$$

$$\text{通带宽 } \Delta f = 90 \text{ MHz}$$

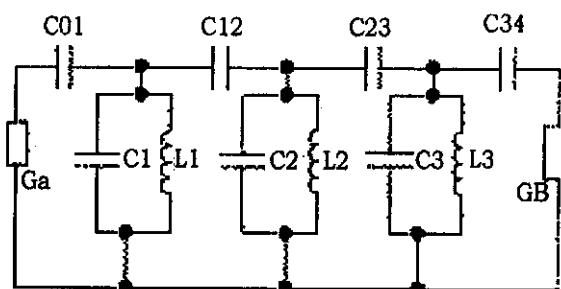
$$\text{归一化频率 } \Omega_s = \frac{\Delta f_s}{\Delta f} = 2.16$$

根据阶数的计算公式有:

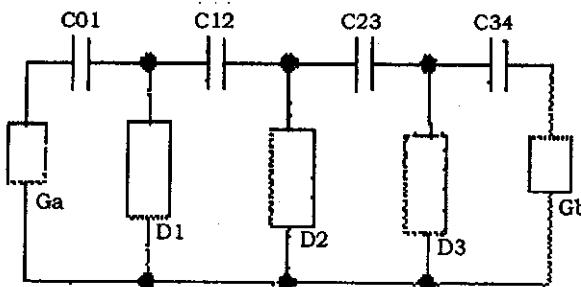
$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \left[ \sqrt{\frac{(10^{0.1A_s} - 1)}{(10^{0.1A_p} - 1)}} \right]}{\cosh^{-1} \Omega_s} = 2.86 \quad (1)$$

n 取整数 3

将低通型滤波器通过频率变换和导纳变换, 转换成为电容耦合型的带通型滤波器<sup>[2]</sup>, 如图 1(a) 所示。



(a) 集中参数电路



(b) 谐振器电路

图 1 滤波器等效电路图

根据微波传输理论,  $1/4$  波长同轴型谐振器可以等效为 LC 并联谐振电路, 图 1(a) 中的并联谐振电路可以由三个同轴谐振器来代替。图 1(b) 中, 耦合电容数值可以通过计算导纳变换器的导纳来确定。介质滤波器的结构图如图 2 所示: 在陶瓷体上形成三个通孔, 相当于三个同轴谐振器, 孔的内表面全部金属化, 除了上表面和端口电极周围区域开路外, 介质块全部镀银。输入输出的耦合强弱可

以通过调节输入输出电容的大小(即调节输入输出电极大小)来控制, 而级间耦合强弱则可以通过调整小孔周围的镀银层面积来确定。

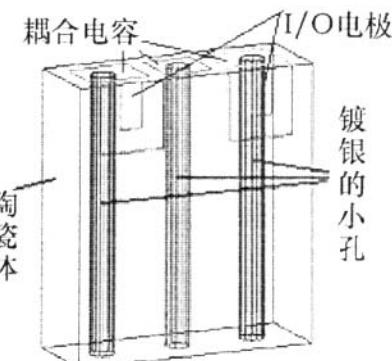


图 2 滤波器结构图

## 2.2 结构参数设计

图 2 所示的块状滤波器的结构尺寸, 即长 L、宽 W 和高 H, 以及谐振孔的孔径 a 的设计。

根据微波传输线的理论, 谐振器长度 L 与谐振频率  $f_0$  和介电常数  $\epsilon_r$  有如下关系<sup>[2]</sup>:

$$L = \frac{C}{4f_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

式中,  $f_0$  为谐振频率,  $\epsilon_r$  为介电常数, C 为光速。

由上面的式子可知在频率  $f_0$  一定的情况下, 要想降低滤波器的尺寸, 就必须高介电常数的电介质材料  $\epsilon_r$ 。本文选择由本实验室研制的介电常数为 81 的 BaO-Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 基微波陶瓷材料, 其品质因数在 1700~1800 左右。根据  $f_0 = 1800 \text{ MHz}$ ,  $\epsilon_r = 81$ , 可以算出谐振器的长度 L 近似为 4.62mm。

介质谐振器的插入损耗由下面的式子来计算:

$$B_0 = \frac{4.343f}{BWQ_u} \sum g_i \quad (4)$$

式中: BW 是 3dB 带宽(MHz);

$g_i$  是滤波器的低通原型参数;

$Q_u$  是单谐振器的品质因数。

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_c} \quad (5)$$

式中:  $Q_0$  是微波陶瓷介质的品质因数;

$Q_c$  是谐振器表面金属膜的 Q 值, 其值可以通过下面的式子计算得到<sup>[2]</sup>:

$$Q_c = \delta_s \cdot \left[ \frac{\left( \frac{1}{a} + \frac{\pi}{2W} \right)}{\ln \left( \frac{2aW}{\pi} \right)} + \frac{1}{L} \right] \quad (6)$$

$$\delta_s = \sqrt{\frac{2}{\omega_0 \mu_0 \sigma_c}} \quad (7)$$

式中: $\delta_s$  为趋肤深度;  $\omega_0$  为角频率;  $\sigma_c$  为金属的电导率;  $\mu_0$  为谐振子表面金属膜的磁导率;  $a$  为谐振子内圆半径;  $W$  为正方形谐振子的边长;  $L$  为谐振子长度。

滤波器的插入损耗  $IL \propto nB_0$

$n$  为滤波器的级数,  $B_0$  为谐振器的插入损耗。

故要降低插入损耗  $IL$ , 就需要降低  $B_0$ , 由(4)式, 就要增大单谐振器的品质因数  $Q_u$ 。由(5)式知, 就要求介质材料和表面金属膜的  $Q$  值要大。

有介质填充的同轴线的特性阻抗可以表示为<sup>[2]</sup>:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \quad (8)$$

式中,  $a$  为同轴谐振器内半径,  $b$  为方形谐振子边长的一半,  $\epsilon_r$  为介电常数。 $\frac{b}{a}$  的选取应该兼顾到有最大功率容量的条件:

$$\frac{b}{a} = 1.65$$

和最小衰减的条件<sup>[2]</sup>,

$$\frac{b}{a} = 3.592$$

同时考虑以上的条件, 故选择  $\frac{b}{a} = 2 \sim 3$ 。

同轴谐振器的截面如图 3 所示, 选定  $a = 0.25$  mm,  $\frac{b}{a} = 3$ ,  $b = 0.75$  mm。

而由图 2, 滤波器由三个谐振器并排而成, 可以得到  $H = 1.5$  mm,  $W = 4.5$  mm, 而谐振孔的半径为 0.25 mm。

至此, 滤波器模型的尺寸已经设计出来, 接下来使用高频结构仿真的软件 HFSS 来进行滤波器的仿真, 看所设计是否达到要求。

### 3 高频结构仿真软件 HFSS 的仿真

HFSS 设置微波元件的几何尺寸和材料性质方便, 能够根据器件的实际应用环境作出合适的边界条件设置, 同时, HFSS 还能够方便的对所设计器件的参数图和场分布等进行分析。

根据前面设计的滤波器的尺寸在 HFSS 中建

立滤波器的仿真模型, 步骤如下:

(1) 在 HFSS 中使用 3D Modeler 创建该滤波器的几何模型, 即画出设计的滤波器的尺寸模型。

(2) 设置材料。对画好的滤波器模型进行材料特性设置。系统的材料库有很多通用的材料供选取, 对材料库中没有的材料, 用户可以按要求自己设置新材料, 实验中我们设置了介电常数为 81, 无载品质因数为 1700 的材料。

(3) 设置端口和边界。设置完材料属性后, 必须定义端口和边界条件, 也就是确定输入结构的激励信号、模型不同表面上的电磁场特性以及特定表面的特性。在定义一个对称面时, 我们必须决定应该使用那一种对称面, perfect E 还是 perfect H。通常按下面的原则决定该使用哪一种对称面:

所谓的边界条件在电磁计算中实际上就是一个面上的微分方程, 如果是电场垂直于对称面, 金属表面一般都可以按照理想电壁来处理, 设置 perfect E 对称面, 这个微分方程就是切向电场为零, 如果是电场平行于对称面或者法向电场为零, 设置 perfect H 对称面, 微分方程当然就是切向磁场为零, 对于开孔端面也设置为 perfect H 对称面。

HFSS 默认的边界背景是金属, 对于没有明确设置 port 和 boundary 的面将被自动设置为 perfect E 边界。

(4) 然后设置仿真范围, 实验中设计的是中心频率为 1800 MHz 滤波器, 因此设定仿真频率范围 1.5 GHz ~ 2.1 GHz。

(5) 仿真后的结果, 要进行修正调整, 直到满足设计所需求。修正时所依据的规律是, 滤波器的长度  $L$  越小, 则中心频率越高; 谐振孔直径与边长的比值在 2~3 范围内, 比值大则插入损耗低。最终结果  $L = 4.2$  mm,  $W = 4.5$  mm,  $H = 1.5$  mm 的滤波器。

仿真结果曲线如图 4 所示:

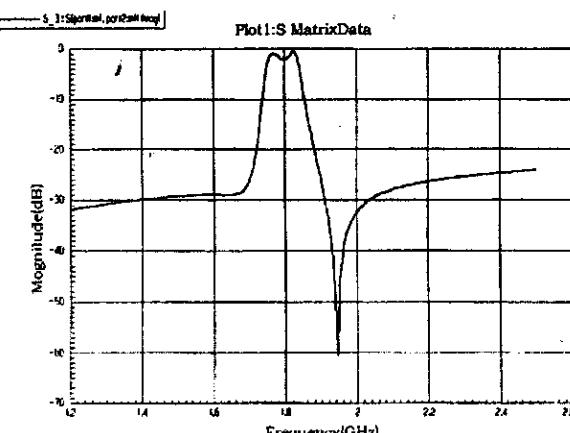


图 4 滤波器仿真结果图

图 3 谐振器截面图

式中:  $\delta_s$  为趋肤深度;  $\omega_0$  为角频率;  $\sigma_c$  为金属的电导率;  $\mu_0$  为谐振子表面金属膜的磁导率;  $a$  为谐振子内圆半径;  $W$  为正方形谐振子的边长;  $L$  为谐振子长度。

滤波器的插入损耗  $IL \propto nB_0$

$n$  为滤波器的级数,  $B_0$  为谐振器的插入损耗。

故要降低插入损耗  $IL$ , 就需要降低  $B_0$ , 由(4)式, 就要增大单谐振器的品质因数  $Q_u$ 。由(5)式知, 就要求介质材料和表面金属膜的  $Q$  值要大。

有介质填充的同轴线的特性阻抗可以表示为<sup>[2]</sup>:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \quad (8)$$

式中,  $a$  为同轴谐振器内半径,  $b$  为方形谐振子边长的一半,  $\epsilon_r$  为介电常数。 $\frac{b}{a}$  的选取应该兼顾到有最大功率容量的条件:

$$\frac{b}{a} = 1.65$$

和最小衰减的条件<sup>[2]</sup>,

$$\frac{b}{a} = 3.592$$

同时考虑以上的条件, 故选择  $\frac{b}{a} = 2 \sim 3$ 。

同轴谐振器的截面如图 3 所示, 选定  $a = 0.25$  mm,  $\frac{b}{a} = 3$ ,  $b = 0.75$  mm。

而由图 2, 滤波器由三个谐振器并排而成, 可以得到  $H = 1.5$  mm,  $W = 4.5$  mm, 而谐振孔的半径为 0.25 mm。

至此, 滤波器模型的尺寸已经设计出来, 接下来使用高频结构仿真的软件 HFSS 来进行滤波器的仿真, 看所设计是否达到要求。

### 3 高频结构仿真软件 HFSS 的仿真

HFSS 设置微波元件的几何尺寸和材料性质方便, 能够根据器件的实际应用环境作出合适的边界条件设置, 同时, HFSS 还能够方便的对所设计器件的参数图和场分布等进行分析。

根据前面设计的滤波器的尺寸在 HFSS 中建

上图中各个参数指标为：中心频率在 1790MHz 处，带内波动为 1.5dB，3dB 带宽为 45MHz，插入损耗为 0.39dB，带外抑制为 27.4dB。

## 4 器件制作

根据以上设计原理，拟用凝胶注模成型的方法来制作器件。以分析纯 BaTiO<sub>3</sub>，Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，TiO<sub>2</sub> 为原料，按摩尔比 1 : 0.5 : 0.5 : 1 进行配料，在模具中凝胶注模成型后，从模具中取出，烧结，经过打磨加工，然后镀上银电极。实验中加工数个滤波器，经测试，得到一合适的滤波器，尺寸为：L=4.3 mm，W=4.5 mm，H=1.6 mm，孔径 0.26 mm，相应的滤波器的性能指标测试的结果如下：中心频率在 1780MHz 处，带内波动为 1.6 dB，3dB 带宽为 40MHz，插入损耗为 0.42 dB，带外抑制为 29.4 dB，满足所要求的性能。

## 5 总结

介质带通滤波器的设计与制作主要由以下几个步骤来实现：

(1) 根据给定的滤波器的参数指标以及网络综合的理论<sup>[1]</sup>，来设计滤波器的级数，以及电容耦合电路。

(2) 将并联的 LC 回路视为介质谐振器块，根

(上接第 91 页)

套件列表中给出所希望的新值；若是服务器发起，只需正常开始握手即可，刷新先前的 session\_id 对应缓存信息，重新选择加密套件。

可以看出，对于客户端，关键是控制加密套件列表的内容；对于服务器来说，只需根据需要选择加密套件。这在已有的 SSL 实现之上是很容易做到。同时丝毫不影响 SSL 协议的安全性。由于是在应用层之下，这种分级加密方法可以很好地与各种应用层资源分级策略结合起来，轻松实现分级加密的自动化，具有很强的实用性。有许多免费的 SSL 实现可以利用，如 C 语言环境下的 OpenSSL 以及 Java 环境下的 PureTLS 等。

## 5 结束语

通过灵活利用 SSL 的会话恢复以及再握手机

据中心频率来设计滤波器的长度 L，同时选择  $\frac{b}{a}$ ，以此来确定谐振孔的孔径，滤波器的宽度 W 和高度 H。

(3) 用 HFSS 软件进行仿真，首先画出设计的滤波器的三维几何模型，依次进行材料设置和端口边界的设置。最后在选定的中心频率处进行仿真。

(4) 根据仿真的结果，进行结构上的调整。

(5) 选择凝胶注模工艺，按所设计的尺寸成型。

### 参 考 文 献

- [1] 黄席椿, 高顺泉. 滤波器综合法设计原理 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1977
- [2] 甘本祓, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与设计 [M]. 北京: 科学出版社, 1973
- [3] Kunda A C, Endou K. TEM—Mode planar dielectric waveguide resonator BPF for W—CDMA. 2000 IEEE MTT—S Digest. 191~194
- [4] S. B. Cohn. Parallel Coupled Transmission Line Resonator Filters [C], IRE Trans, 1958, MTT6(4):223~231
- [5] Konishi Yoshihiro. Novel dielectric waveguide components—microwave applications of new ceramic materials [J]. Proceedings of The IEEE, 1991, 79(6):726~740
- [6] 胡云香. BaTiO<sub>3</sub> 基半导体陶瓷凝胶注模成型技术研究 [D]. 华中科技大学

制，在 SSL 之上实现分密级加密。这种方法，可以根据具体应用需要，对不同资源采用不同强度的加密措施，在保证信息安全的基础上，大大提高使用 SSL 协议保护连接的服务器的效率，节约的资源既可以让服务器为更多的客户提供服务，也可以为真正的秘密提供更安全的保护，让秘密更加安全。

### 参 考 文 献

- [1] RFC 2246. The TLS Protocol Version 1.0(TLS)[S]
- [2] Eric Rescorla, 崔凯. SSL 与 TLS. [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002
- [3] 范红, 冯登国. 安全协议理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [4] Douglas E Comer. 计算机网络与 Internet—网络应用 (第三版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [5] 中国 IT 认证实验室. VPN 技术专题 [EB/OL]. <http://www.chinaitlab.com/www/special/vpn.asp>

## 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>