

# FM带通滤波器的小型化及宽阻带实现新方法

刘建生 居继龙 潘小丹

(中国传媒大学京隆广播技术研究所, 北京 100024)

ljs651@cuc.edu.cn

**摘要:**本文通过改进传统FM带通滤波器,能使FM带通滤波器的体积缩小,又能把滤波器的第一寄生通带移到离主通带更远的地方,从而实现FM带通滤波器小型化,宽阻带特性。

**关键词:**FM带通滤波器, 寄生通带, 宽阻带, 小体积

## A New Method to Realize FM Band-pass Filter with Smaller Size and Wider Stop-band

LIU Jian-sheng, JU Ji-long, PAN Xiao-dan

(Beijing-Lund Broadcasting Tech Lab, Communication University of China, Beijing 100024)

**Abstract:** This paper presents a new method to realize FM band pass filter with smaller size and wider stop band based on the existing FM band-pass filter. Therefore, the new FM band-pass filter has more compact structure and wider stop-band.

**Keywords:** FM band-pass filter; Spurious pass-band; Wider stop-band; Smaller size

### 1 引言

在FM, VHF, UHF频段, 常用的谐振腔是一端短路, 一端加载的约1/4长的同轴腔, 同轴腔的外导体常采用长方体或圆柱体, 内导体一般采用圆柱体。传统FM带通滤波器的体积一般都很大, 第一寄生通带大约在3f<sub>0</sub>处(f<sub>0</sub>是主通带的中心频率)。采用阶梯阻抗谐振器不仅可以减小FM带通滤波器的体积, 而且还可把滤波器的第一寄生通带移到离主通带更远的地方, 防止在实现多频道合成时, 一个滤波器的寄生通带进入另一个滤波器的主通带而造成串扰。

### 2 阶梯阻抗谐振器的基本原理

传统FM带通滤波器<sup>[2]</sup>采用图1所示的谐振腔, 本文提出的FM带通滤波器采用图2所示的阶梯阻抗谐振腔。图3是阶梯阻抗部分的内导体半径, a<sub>2</sub>是低阻抗Z<sub>2</sub>部分的内导体半径, l<sub>1</sub>是Z<sub>1</sub>部分的长度, l<sub>2</sub>是Z<sub>2</sub>部分的长度。



图1 传统谐振腔



图2 阶梯阻抗谐振腔

在图3中, 从第一个端面看进去的输入阻抗<sup>[4]</sup>Z<sub>in1</sub>是:

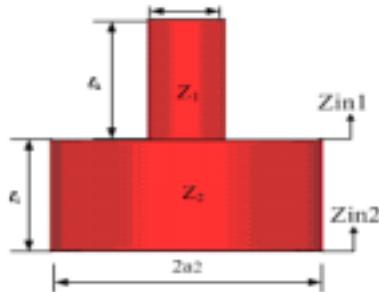


图3 阶梯阻抗谐振腔内导体

谐振腔内导体的结构, 其中a<sub>1</sub>是高阻抗Z<sub>1</sub>

$$Z_{in1} = jZ_1 \tan \beta l_1 \quad (2)$$

从第二个端面看进去的输入阻抗<sup>[4]</sup>Z<sub>in2</sub>是:

$$\begin{aligned} Z_{in2} &= Z_2 \frac{Z_{in1} + jZ_2 \tan \beta l_2}{Z_2 + jZ_{in1} \tan \beta l_2} \\ &= jZ_2 \frac{Z_1 \tan \beta l_1 + Z_2 \tan \beta l_2}{Z_2 - Z_1 \tan \beta l_1 \tan \beta l_2} \end{aligned} \quad (3)$$

为使阶梯阻抗谐振腔谐振, 必须满足Z<sub>in2</sub>~, 因此由(3)式得到谐振条件:

$$\tan \beta l_1 \tan \beta l_2 = Z_2 / Z_1 = R_Z \quad (4)$$

(4)式当l<sub>1</sub>=l<sub>2</sub>时, 能让谐振器的总长度l=l<sub>1</sub>+l<sub>2</sub>最短, 此时谐振条件变为:

$$\tan^2 \beta l_1 = \tan^2 \beta l_2 = Z_2 / Z_1 = R_Z \quad (5)$$

设计阶梯阻抗谐振腔时，要获得准确的谐振频率，还需考虑传输线阻抗不连续的影响<sup>[1]</sup>，一是传输线中阶梯阻抗结合面处不连续性电容 $C_d$ ，二是开路端的边缘电容 $C_f$ 。考虑 $C_d$ ，把(5)式的谐振条件修正为<sup>[5]</sup>：

$$\frac{\tan^2 \beta l_1}{1 - \alpha_0 \tan \beta l_1} = R_z \quad (6)$$

式中  $\alpha_0 = 2\pi f_0 C_d Z_1$ ,  $C_d = L \times C_d'$   $f_0$  是谐振腔的谐振频率， $L$  是传输线横截面的周长， $C_d'$  的值可由曲线图<sup>[1]</sup>查得。考虑 $C_f$  的影响时，则把 $C_f$  转化为低阻抗线 $Z_2$ 附加的一小段  $l$ <sup>[5]</sup> 来补偿， $l$  可由下式得到：

$$\begin{aligned} \Delta l &\approx \frac{C_f}{2\pi\epsilon_0} \ln(b/a_2) \\ &= \frac{b}{2\pi} [2t \ln(1+t) - (t-1) \ln(t^2-1)] \end{aligned} \quad (7)$$

式中， $b$  为谐振腔外导体边长的  $1/2$  倍， $t=1/(1-a_2/b)$ 。因此，最后得到的谐振腔内导体的长度 $l_1$  由(6)式确定，而 $l_2 = l_1 - \Delta l$ 。

### 3 滤波器设计实例与比较验证

假如为苏州音乐广播电台设计 FM 带通滤波器，其主要的技术指标<sup>[2]</sup>有：

中心频率 $f_0$	94.8MHz
3dB 带宽	600KHz
驻波比 VSWR	1.1
插入损耗 ( $f_0$ )	0.25db
插入损耗 ( $f_0 \pm 200$ KHz)	0.3dB
插入损耗 ( $f_0 \pm 1.5$ MHz)	10dB
端口阻抗	50Ω

#### 3.1 传统的设计方法

现有的符合上述指标的 FM 带通滤波器结构如图4所示，滤波器单腔尺寸是  $260\text{mm} \times 260\text{mm} \times 900\text{mm}$ ，外导体由铝板制成，内导体由铜管（半径  $39.7\text{mm}$ ）制成，端口是标准的  $1\frac{5}{8}$ ”端口。

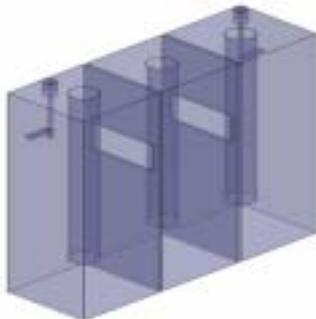


图4 现有的3腔FM带通滤波器

图4所示模型，通过HFSS软件调试<sup>[3]</sup> - 修正内导体长度以及调整腔间耦合窗口的大小和输入输出耦合的位置及大小，得到如图5所示的主通带频率响应，主通带与第一寄生通带的频率间隔如图6所示。

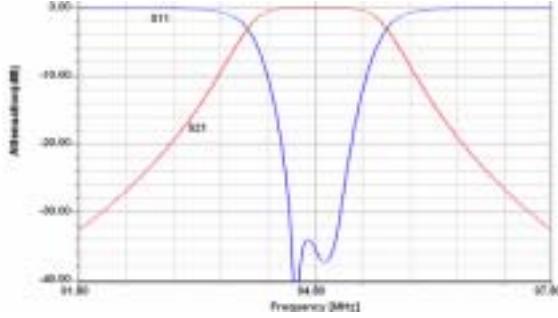


图5 现有 FM 带通滤波器主通带频率响应

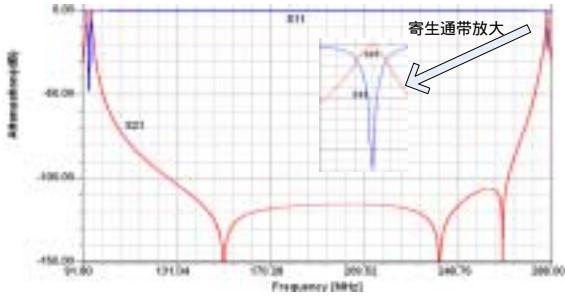


图6 主通带与第一寄生通带位置对比

从图6读得，第一寄生通带的中心频率为  $286\text{MHz}$ ，第一寄生通带大约在  $3f_0$  ( $f_0 = 94.8\text{MHz}$ ) 处。

#### 3.2 改进的设计方法一

首先：令  $R_z=0.11$ ，根据阻抗比  $R_z$  与归一化品质因数  $Q$  值关系图<sup>[5]</sup>，从图中得到  $Z_1$  定为  $85\Omega$  时  $Q$  值最大，因此令  $Z_1=85$ ，则  $Z_2=85 \times 0.11 = 9.35$ 。为保持功率容量不下降，新设计的滤波器外导体边长应该和现有滤波器外导体边长一样，为  $260\text{mm} \times 260\text{mm}$ ，因此  $b=260/2=130\text{mm}$ 。由  $Z_1$ 、 $Z_2$  和  $b$ ，利用 Agilent Appcad 软件计算得到谐振腔高、低阻抗线内导体的半径分别为  $a_1 = 34\text{mm}$ 、 $a_2 = 120\text{mm}$ 。

其次：通过查曲线图<sup>[1]</sup>，得到传输线阶梯阻抗结合面处不连续性电容为：

$$C_d = 4 \times 2b \times C_d' = 11.232 \text{ pF} \quad (8)$$

因此， $\alpha_0 = 2\pi f_0 C_d Z_1 = 0.568$ ，把  $\alpha_0$  代入到(6)，得到  $l_1 = 147.6\text{mm}$ 。又由(7)式得到  $l = 11.3\text{mm}$ ，因此  $l_2 = l_1 - l = 136.3\text{mm}$ ，所以内导体总长为  $l = l_1 + l_2 = 283.9\text{mm}$ ，综合考虑可把阶梯阻抗谐振腔的尺寸定为  $260\text{mm} \times 260\text{mm} \times 350\text{mm}$ ，结构见图2。用这

种谐振腔组成的3腔级联式FM带通滤波器的结构如图7所示。

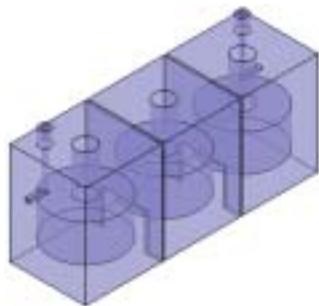


图7 改进的FM带通滤波器(一)

图7所示模型，通过HFSS软件调试<sup>[3]</sup>-修正高、低阻抗线的长度及调整腔间耦合窗口的大小和输入输出耦合的位置及大小，得到如图8所示的主通带频率响应，主通带与第一寄生通带的频率间隔如图9所示。

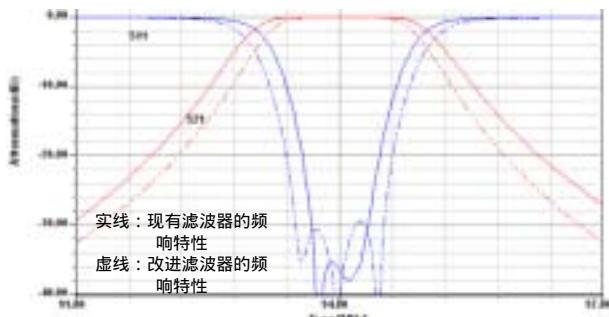


图8 主通带频响对比(一)

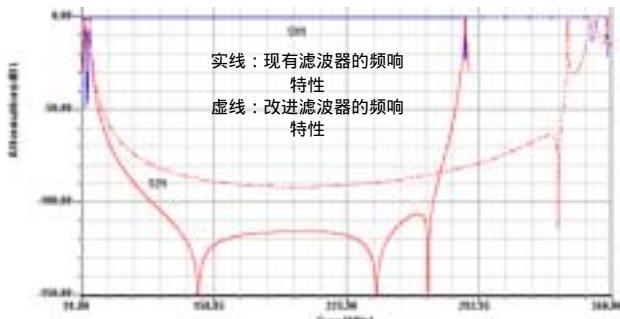


图9 寄生通带频响对比(一)

从图9读得，第一寄生通带的中心频率为350.4MHz，第一寄生通带大约在4f<sub>0</sub>处。这就使滤波器的第一寄生通带由3f<sub>0</sub>处搬移到了4f<sub>0</sub>处，并且单个谐振腔单元的尺寸由原来的260mm×260mm×900mm减小到260mm×260mm×350mm，各项指标也能达到要求，因此能够实现预期的目标。但必须

考虑到，随着谐振器长度缩短，Q值将退化，然而无论理论上还是试验上都证明了<sup>[5]</sup>，阶梯阻抗带通滤波器与加载电容带通滤波器相比，Q值退化要少。为比较Q值的退化情况，对图1所示的谐振腔(260mm×260mm×900mm，外导体由铝制成，内导体由铜制成)用HFSS进行Q值分析，当谐振频率收敛为f<sub>0</sub>=94.8MHz时，谐振腔的无载品质因数为Q<sub>1</sub>=8701。然后对图2所示谐振腔(260mm×260mm×350mm，外导体由铝制成，内导体由铜管制成)用HFSS进行Q值分析，当谐振频率收敛为f<sub>0</sub>=94.8MHz时，谐振腔的无载品质因数为Q<sub>2</sub>=6322，Q<sub>2</sub>/Q<sub>1</sub>=73%，可以满足调频广播的需要。

### 3.3 改进的设计方法二

对于一些对滤波器的体积要求较小而Q值要求较高的场合，可在设计方法一的基础上，采用在低阻抗段挖孔的办法来提高Q值。这种谐振腔内导体的结构如图10所示，对它用HFSS进行Q值分析，得到当挖孔的大小为65mm×100mm时，这种结构的谐振腔Q值能提高到Q<sub>3</sub>=7373，Q<sub>3</sub>/Q<sub>1</sub>=84.7%。



图10 挖孔内导体

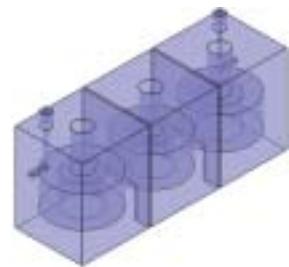


图11 改进的带通滤波器(二)

用图10所示的内导体构成的3腔级联式带通滤波器如图11所示，通过HFSS软件调试<sup>[3]</sup>-修正高、低阻抗线的长度以及调整腔间耦合窗口的大小和输入输出耦合的位置及大小，得到如图12所示的主通带频率响应，主通带与第一寄生通带的频率间隔如图13所示。

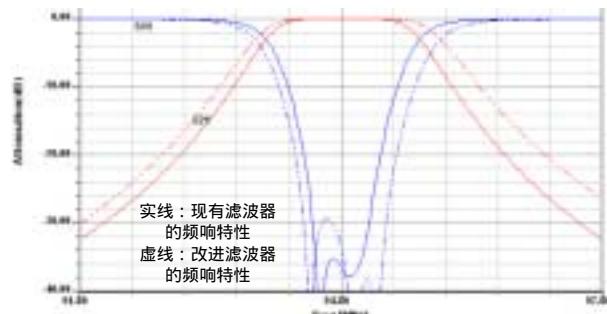


图12 主通带频响对比(二)

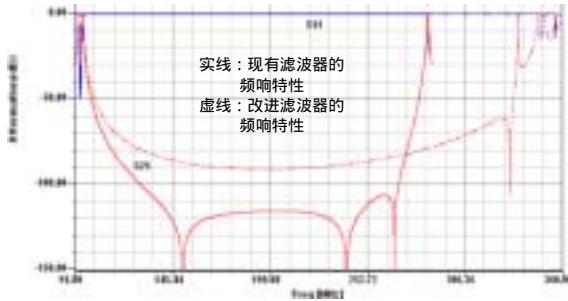


图 13 寄生通带频响对比(二)

从图13读得，第一寄生通带的中心频率为348MHz，第一寄生通带大约在 $4f_0$ 处，同样使滤波器的第一寄生通带由 $3f_0$ 处搬到 $4f_0$ 处，并且单个谐振腔单元的尺寸由原来的 $260\text{mm} \times 260\text{mm} \times 900\text{mm}$ 减小到 $260\text{mm} \times 260\text{mm} \times 350\text{mm}$ ，各项指标也能达到要求，同时还兼顾了Q值，因此很好的实现了预期的目标，具有很大的实用价值。

#### 4 结论

使用阶梯阻抗谐振腔或低阻抗段挖孔的阶梯

作者简介：刘建生，男，中国传媒大学硕士，研究方向为微波与卫星通信；居继龙，男，教授、博士生导师，主要研究领域为射频无源器件等；潘小丹，女，中国传媒大学硕士，研究方向为微波与卫星通信。

阻抗谐振腔，可以使得FM带通滤波器的体积变小，同时把滤波器的第一寄生通带搬到离主通带更远的地方。设计过程中还要考虑Q值的退化问题，应尽量使Q值退化减少。这种方法同样适应于VHF，UHF滤波器的制造。

#### 参考文献

- [1] 甘本祓,吴万春.现代微波滤波器的结构与设计.北京:科学出版社,1973
- [2] 北京飞卡科技有限公司.技术资料与产品手册,第一版,2006
- [3] 马艳军,居继龙.带通滤波器计算机仿真.北京:广播学院学报(自然科学版),2004
- [4] M.Pozar, Microwave Engineering, 3rd ED. , John Wiley & Sons, Inc., 2003
- [5] M.Makimoto, S.Yamashita, Microwave resonators and filters for wireless communication, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 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/>