

# 同轴线型低通滤波器的设计

安照辉, 杨青慧, 张怀武

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

**摘要:**该文介绍了同轴线型低通滤波器的设计原理与方法,并以结构二,即同轴线内导体外直径统一,外导体内直径呈阶梯变换实现了截止频率为4 GHz的同轴线型低通滤波器。结构二相比于结构一,即外导体内直径统一,内导体外直径呈阶梯变化的优势是其设计简单,体积较小且性能更好。测试结果表明,所制作的同轴低通滤波器有良好的性能指标,在整个通带内插入损耗小于0.4 dB,回波损耗大于15 dB,在通带外6 GHz处的抑制约为36 dB,整体满足了设计要求。

**关键词:**同轴线;低通滤波器;内导体;外导体;阶梯变化

**中图分类号:**TN713 **文献标识码:**A

## Design of Coaxial Line Low Pass Filter

AN Zhaohui, YANG Qinghui, ZHANG Huaiwu

(State Key Lab. of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** This paper introduced the design principle and method of the coaxial line low pass filter, and designed a coaxial low pass filter with 4 GHz cut-off frequency, which structure named structure No. 2 is that the inner conductor's diameter is unified and the outer conductor's diameter is varied in stepped variation. The structure No. 2 has the advantages of simpler design, smaller size and better performance over the structure No. 1, which outer conductor's diameter is unified and the inner conductor's diameter is varied in stepped variation. The test results showed that the filter had good performance with the insertion loss of less than 0.4 dB, return loss of more than 15 dB in the whole pass band. At 6 GHz outside the passband, the superession is about 36 dB, which satisfied overall the design requirements.

**Key words:** coaxial line; low pass filter; inner conductor; outer conductor; stepped variation

## 0 引言

微波滤波器在无线通信、雷达、电子对抗、测试系统中起到频率选择的作用,往往用来抑制系统的谐波输出<sup>[1-2]</sup>,其性能好坏直接影响系统能否正常工作。随着无线技术的不断发展,对滤波器的性能要求也越来越苛刻。传统微带线型低通滤波器具有插入损耗高,功率容量小等缺陷。而同轴线型低通滤波器具有结构简单,插入损耗小,阻带宽,功率容量大等优点<sup>[3]</sup>,是各种大功率微波雷达、通讯设备中不可取代的元件。

传统同轴线型低通滤波器为外导体内直径统

一,而内导体外直径呈阶梯变化的结构,这种结构组装简单,且批量生产时样品性能一致性良好,但其体积大,实物测试结果与设计仿真结果存在严重的频率偏移现象。文章主要介绍了内导体外直径统一,外导体内直径呈阶梯式变化的结构,此结构组装复杂,但滤波器设计简单,体积小,且性能良好。

## 1 低通滤波器的设计原理

### 1.1 串联电感与并联电容的实现

在微波频段,可以用高低阻抗传输线来模拟低通滤波器中的串联电感与并联电容。

图1为TEM短截线的等效电路。若图1(a)为

收稿日期:2016-04-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61021061, 51272036, 51002021, 61131005);国际合作基金资助项目(2012DFR 10730, 2013HH0003)

作者简介:安照辉(1990-),男,山东聊城人,硕士生,主要从事微波器件设计的研究。杨青慧(1979-),教授,主要从事液相外延及微波毫米波器件研究。

两端接有低阻抗线的高阻抗线,如图1(c)所示,则高阻抗线的等效并联电纳  $B$  就很小,而与其并联的是电纳很大的低阻抗线,则高阻抗线的  $B$  可忽略,因而图1(c)可等效为只有一个电感;若图1(a)为两端接有高阻抗线的低阻抗线,如图1(b)所示,则低阻抗线的等效串联电抗  $X$  很小,而与其串联的又是电抗很大的高阻抗线,故低阻抗线的  $X$  可忽略,因而图1(b)中可等效为只有一个并联电容<sup>[4]</sup>。这样就完成了集总参数电抗元件用微波结构实现的等效过程。

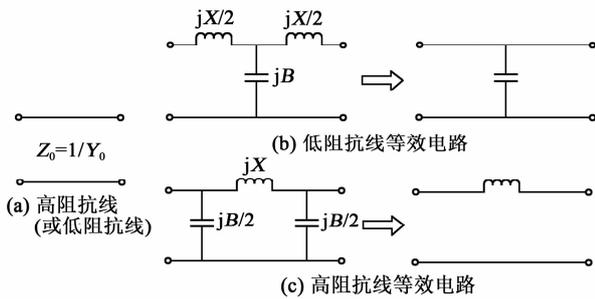


图1 TEM短截线的等效电路

## 1.2 同轴线的不连续性

由于同轴线低通滤波器的外导体内径发生阶跃变化及传输线的不连续性,阶梯处等效一并联电容  $C_d$ ,称为边缘电容<sup>[5]</sup>,如图2所示。其中, $a$ 为内导体外径, $b$ 、 $c$ 为外导体内径。

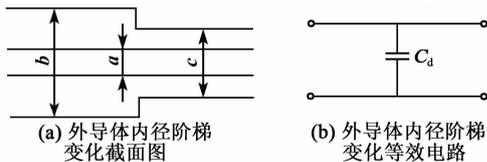


图2 外导体内径阶梯变化剖面图与其等效电路

此等效电路在工作频率低于第一个高次模的截止频率时成立,在同轴低通滤波器中存在两种边缘电容,即高、低阻抗线的不连续性等效边缘电容和端口  $50 \Omega$  阻抗线与低阻抗线之间的等效边缘电容。

## 2 低通滤波器的设计

### 2.1 设计步骤

以网络综合法设计切比雪夫低通滤波器说明如下:

1) 根据低通滤波器的指标,选择切比雪夫归一化低通原型,查找相应图表,得出元件数目与归一化元件值。

2) 反归一化,计算出滤波器的实际元件值。

3) 选定高低阻抗值与内导体的直径,查阅相关

图表,得到高、低阻抗线的外导体内直径。

4) 考虑到相邻阻抗线的不连续性,计算不连续性引入的边缘电容。

5) 根据滤波器的实际元件值与边缘电容值,计算出高、低阻抗线的长度。

6) 修正首尾阻抗线的长度,补偿其与  $50 \Omega$  阻抗线的不连续性<sup>[6]</sup>。

### 2.2 设计实例

1) 滤波器指标,即截止频率( $f_c$ )为  $4 \text{ GHz}$ ,通带衰减  $\leq 0.5 \text{ dB}$ ,带外抑制为  $36 \text{ dB}@6 \text{ GHz}$ ,回波损耗小于  $-15 \text{ dB}$ ,端口阻抗为  $50 \Omega$ 。

2) 计算。

a) 确定低通原型:

$$\left| \frac{\omega}{\omega_c} \right| - 1 = \frac{2\pi \times 6 \times 10^9}{2\pi \times 4 \times 10^9} - 1 = 0.5 \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为带外某频率; $\omega_c$ 为截止频率。

根据归一化频率上的衰减为  $36 \text{ dB}$ ,查表<sup>[7]</sup>可得元件数目  $n=7$ ,归一化元件值  $g_0 = g_8 = 1$ ;  $g_1 = g_7 = 1.737 2$ ;  $g_2 = g_6 = 1.258 3$ ;  $g_3 = g_5 = 2.638 1$ ;  $g_4 = 1.344 4$ ;归一化低通滤波器原型电路如图3所示。

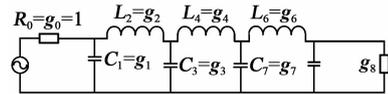


图3 归一化低通滤波器原型电路

b) 实际元件值,即

$$L'_k = \frac{R_0 L_k}{\omega_c} \quad (2)$$

$$C'_k = \frac{C_k}{R_0 \omega_c} \quad (3)$$

式中: $C_k$ 、 $L_k$ 分别为归一化低通滤波器原型电路中的电容、电感值; $R_0$ 为源阻抗; $L'_k$ 、 $C'_k$ 分别为实际低通滤波器的电感、电容值<sup>[8]</sup>。

由式(2),(3)及滤波器的对称性可得  $C_1 = C_7 = 1.382 \text{ pF}$ ;  $L_2 = L_6 = 2.503 \text{ nH}$ ;  $C_3 = C_5 = 2.099 \text{ pF}$ ;  $L_4 = 2.675 \text{ nH}$ 。

选定高阻抗线为  $120 \Omega$ ,低阻抗线为  $10 \Omega$ ,内导体外径为  $\varnothing 1.3 \text{ mm}$ ,低阻抗线内外导体间填充聚四氟乙烯介质套,高阻抗线内外导体间为空气,聚四氟乙烯介电常数  $\epsilon_r$  为  $2.1$ 。

c) 同轴线阻抗计算<sup>[9]</sup>:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r/\mu_r}} \ln \frac{b}{a} = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r/\mu_r}} \log_{10} \frac{b}{a} \quad (4)$$

式中:  $\mu_r$  为相对磁导率(通常为 1);  $a = 1.3 \text{ mm}$ 。根据式(4)可求得  $50 \text{ } \Omega$  阻抗线外导体内径为  $\varnothing 4.35 \text{ mm}$ ,  $120 \text{ } \Omega$  阻抗线外导体内径为  $\varnothing 9.6 \text{ mm}$ ,  $10 \text{ } \Omega$  阻抗线外导体内径为  $\varnothing 1.66 \text{ mm}$ 。

查表<sup>[10]</sup>可得由于相邻阻抗线的不连续性引入的边缘电容,即  $120 \text{ } \Omega$  与  $10 \text{ } \Omega$  阻抗线之间的边缘电容  $C_f = 0.4 \text{ pF}$ ;  $10 \text{ } \Omega$  与  $50 \text{ } \Omega$  阻抗线之间的边缘电容  $C_{f0} = 0.2 \text{ pF}$ 。

d) 各节高低阻抗线的长度计算:

为了计算方便,把各低阻抗线的等效并联电容与两端高阻抗线的等效并联电容合并,同样,把各高阻抗线的等效串联电感与两端低阻抗线的等效串联电感合并,则有

$$\begin{cases} \omega_1 C_1 = \frac{\omega_1 Y_1 l_1}{v_1} + \omega_1 C_f + \omega_1 C_{f0} + \frac{\omega_1 Y_h l_2}{2v_h} \\ \omega_1 C_3 = \frac{\omega_1 Y_1 l_3}{v_1} + 2\omega_1 C_f + \frac{\omega_1 Y_h l_2}{2v_h} + \frac{\omega_1 Y_h l_4}{2v_h} \\ \omega_1 L_2 = Z_h \sin\left(\frac{\omega_1 l_2}{v_h}\right) + \frac{Z_1 l_1 \omega_1}{2v_1} + \frac{Z_1 l_3 \omega_1}{2v_1} \\ \omega_1 L_4 = Z_h \sin\left(\frac{\omega_1 l_4}{v_h}\right) + \frac{Z_1 l_3 \omega_1}{2v_1} + \frac{Z_1 l_5 \omega_1}{2v_1} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\omega_1 = 4 \times 10^9 \text{ Hz}$ ;  $Z_1 = 10 \text{ } \Omega$ ;  $Z_h = 120 \text{ } \Omega$ ;  $Y_1 = 1/Z_1$ ;  $Y_h = 1/Z_h$ ;  $v_h = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $v_1 = c/\sqrt{\epsilon_r} = 2.07 \times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $C_f = 0.4 \text{ pF}$ ;  $C_{f0} = 0.2 \text{ pF}$ ;  $C_1 = 1.382 \text{ pF}$ ;  $C_3 = 2.099 \text{ pF}$ ;  $L_2 = 2.503 \text{ nH}$ ;  $L_4 = 2.674 \text{ nH}$ 。

求解式(5)可得  $l_1 = l_7 = 1.43 \text{ mm}$ ,  $l_2 = l_6 = 6.32 \text{ mm}$ ,  $l_3 = l_5 = 2.31 \text{ mm}$ ,  $l_4 = 6.76 \text{ mm}$ 。

根据前面求得的每节高低阻抗同轴线的各尺寸,在 HFSS 中建立低通滤波器的三维模型,如图 4 所示。

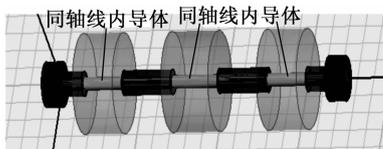


图 4 同轴低通滤波器 HFSS 模型

图 4 中,同轴线内导体的两端为  $50 \text{ } \Omega$  端口,奇数节为低阻抗线,偶数节为高阻抗线,低阻抗线的内、外导体间为聚四氟乙烯介质,高阻抗线的内、外导体间为空气。

仿真过程中,修正首尾阻抗线的长度,弥补其与  $50 \text{ } \Omega$  阻抗线的不连续性,统一修正每节阻抗线的长度,改善频率的偏移。优化后,仿真结果如图 5

所示。

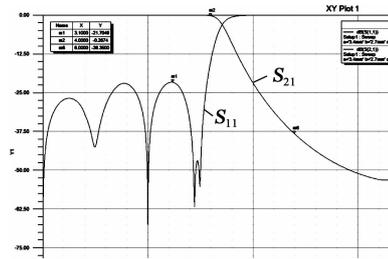


图 5 S 参数仿真结果

由图 5 可知,在整个通带内,回波损耗在  $-20 \text{ dB}$  以下,频率在  $6 \text{ GHz}$  处,抑制为  $38.35 \text{ dB}$ ,满足设计指标要求。

### 3 加工组装与测试

在设计机械加工结构时,低阻抗线节介质套外再套一个空心导体圆环,内径为内导体直径与介质套直径之和,外径为高阻抗的外导体内径加  $1 \text{ mm}$ ;同样,高阻抗线节外套一层空心导体圆环,内径为同轴线外导体内径,外径为同轴线外导体内径加  $1 \text{ mm}$ 。这些圆环起到固定各节位置的作用。

将加工好的同轴低通滤波器各个节按照顺序装配好,此滤波器共 7 个节,装配完成后使用 Agilent 矢量网络分析仪对滤波器的 S 参数指标进行测试。

加工好的实物图如图 6 所示,整个滤波器尺寸为  $4.5 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  (不计入两端的 N 型连接器),结构采用外导体完全包围内导体的方式,而不是传统的外导体做成上、下盖板的形式,这样有利于防止电磁波的泄露,降低能量的损耗。



图 6 实物图

测试图如图 7 所示。由图可知,  $S_{11}$  在  $-15 \text{ dB}$  以下,而图 5 所示的  $S_{11}$  在  $-20 \text{ dB}$  以下,测试结果没有仿真结果理想,原因是机械加工的精度不高导致每节阻抗线的尺寸与设计尺寸有一定的误差,另外相邻阻抗线之间有一定的缝隙,对测试结果会产生一定的影响。在频率为  $6 \text{ GHz}$  时,带外抑制为  $36.137 \text{ dB}$ ,综上所述,整个滤波器的性能指标满足

设计要求。

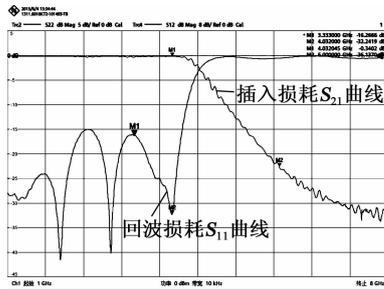


图7 S参数测试图

#### 4 结束语

文章介绍了一种不同于传统同轴线型低通滤波器结构的滤波器,并经过设计、仿真、加工、装配、测试过程,实现了一个4 GHz的同轴线型低通滤波器,测试结果完全符合预期设计指标,满足设计需求。

#### 参考文献:

- [1] MATTHAEI G L, YOUNG L, JONES E M T. Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures[M]. US: Artech House, 1980: 255-353.
- [2] POZAR D M. Microwave engineering [M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1998: 474-485.
- [3] 相海露. 基于 TEM 模传输线的滤波器设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [4] 甘本祯, 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: 132-133.
- [5] 黄小英. 切比雪夫微波低通滤波器的设计及研究[J]. 中国科技信息, 2010, 25(8): 101-102.
- [6] 黄学, 曾斌. 同轴线型低通滤波器的设计. 见(In): 2001 年全国微波毫米波会议论文集[C]//成都: 信息产业部电子第 29 研究所, 2001: 350-351.
- [7] POZAR D M. 微波工程[M]. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006: 339-340.
- [8] 吕绪敬. 宽阻带微带低通滤波器的设计与研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [9] 周学军, 董军堂, 雷文礼, 等. 微波低通滤波器的分析与设计[J]. 通信技术, 2010, 43(3): 183-184.
- [10] 甘本祯, 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: 91-92.
- [10] EMANETOGLU W, MUTHUKUMAR S, WU Pan.  $Mg_x Zn_{1-x} O$ : A new piezoelectric material[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2003, 50(5): 537-543.
- [11] 王然龙, 阮海波. 柔性 ZnO 基透明导电薄膜的研究进展[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2015(5): 33-40.
- [12] WANG Ranlong, RUAN Haibo. Progress of ZnO-based transparent conductive films deposited on flexible substrate[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2015(5): 33-40.
- [12] SHEN Y, LIU Y J, YANG H L, et al. Influence of the surface roughness of MgZnO piezoelectric thin films on characteristics of the SMR [J]. Micronanoelectronic Technology, 2014, 51(12): 776-784.
- [13] LEE J J, KIM Y B, YOON Y S. Deposition and structure of piezoelectric ZnO epitaxial film on p-InP(100) substrate for FBAR[J]. Applied Surface Science, 2005, 244(1/4): 365-368.
- [14] RUBY R, PARKER R, FELD D. Method of extracting unloaded Q applied across different resonator technologies[C]//Beijing: 2008 IEEE Ultrasonics Symposium, 2008: 1815-1818.

(上接第 14 页)

- [4] 张亚非, 陈达. 薄膜体声波谐振器的原理, 设计和应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011: 1-20.
- [5] FLEWITT A J, LUO J K, FU Y Q, et al. ZnO based SAW and FBAR devices for bio-sensing applications [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2014, 222: 209-216.
- [6] YOKOYAMA T, IWAZAKI Y, ONDA Y, et al. Highly piezoelectric Co-doped AlN thin films for wideband FBAR applications[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2015, 62(6): 1007-1015.
- [7] LIU Gang, ZHU Jia, WANG Sai, et al. Progress in materials used for solid mounted film bulk acoustic resonators[J]. Journal of Inorganic Materials, 2010, 25(12): 1233-1241.
- [8] CHEN Da, WANG Jingjing, LI Dehua. Solidly mounted resonators operated in thickness shear mode based on c-axis oriented AlN films[J]. Sensors and Actuators A, 2011, 165(2): 379-384.
- [9] CHOI N K, KIM K B, KIM Y I, et al. Effect of design parameters on thin film bulk acoustic resonator performance[J]. Journal of Electroceramics, 2014, 33(1): 17-24.