

## 基于半波长槽线的宽带带通滤波器设计

程巍,章腾辉,吴佳佳,杨俊秀,李霖

(浙江理工大学信息学院,杭州 310018)

**摘要:**提出了一种基于半波长槽线的宽带带通滤波器的设计方案。首先给出该种滤波器的物理结构和对应的等效传输线模型;其次依据电路模型进行理论分析,从预先确定的电路响应特性推导出带通滤波器的电参数;最后通过建立电磁仿真和电路板制作验证方案的可行性。采用以上方法设计了一个中心频率为3 GHz、频带宽为100%的宽带带通滤波器。传输线模型、电磁仿真与实物测量结果表明:该方案准确快速,可显著缩短滤波器的设计周期,并实现滤波器的宽带宽和低插入损耗特性。

**关键词:**槽线;宽带;带通滤波器

**中图分类号:** TN713<sup>+</sup>.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2017)05-0687-04

### 0 引言

无线通信技术的高速发展对无线通信的带宽提出了更高的要求。滤波器作为无线信号的频率选择器件,在很大程度上影响无线通信的频率带宽,因此研究宽带特性的滤波器具有重要的科研价值。槽线结构具备宽通带、低剖面 and 易于集成等优点,近年来已成为实现宽带滤波器的重要方式,并已在宽带带通滤波器设计<sup>[1-3]</sup>中得到应用。Chu等<sup>[1]</sup>、艾明贵等<sup>[2]</sup>和方婷<sup>[3]</sup>分别采用槽线谐振器、环形槽线谐振器和折叠槽线实现了相对带宽为67%、123%和100%的宽带带通滤波器。王善进等<sup>[4]</sup>、Deleniv等<sup>[5]</sup>、Dong等<sup>[6]</sup>和李素萍等<sup>[7]</sup>分别采用阶跃阻抗多模槽线谐振器、S型槽线、开槽基片集成波导单元和正交槽线给出了带通滤波器设计,均实现了宽通带响应,且电路面积较小,易于集成。然而这些滤波器设计通常采用试验性方法,只能从滤波器已知的尺寸中获得相应的滤波特性,不利于设计的准确性与快速性。为了解决这个问题,Li等<sup>[8]</sup>研究了采用串

联微带线与并联槽线混用结构实现的宽带滤波器。该滤波器可从滤波响应特性提取电路参数,但电路面积较大。因此,在改善滤波器性能的同时,实现更小尺寸、结构简单且可在预定的滤波响应特性下提取电路参数的槽线型宽带滤波器,仍有待进一步的研究。

本文提出了一种基于半波长槽线的宽带带通滤波器设计方案。首先分析了滤波器的物理结构和等效模型,然后结合切比雪夫多项式得出了滤波器的设计方法,最后通过高频结构仿真器(high frequency structure simulator, HFSS)仿真和电路板制作及测试验证方案的可行性。该方案不仅比文献[8]的方案尺寸更小,且可依据设定的响应综合获得滤波器的电气参数,显著降低带通滤波器的计算时间与设计周期。

### 1 宽带带通滤波器设计的理论分析

本文设计的宽带带通滤波器的物理结构如图1所示。该结构由两段四分之一波长微带线和一段半

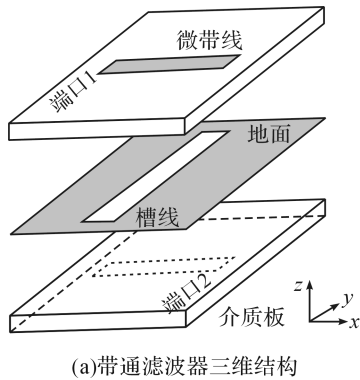
收稿日期:2017-01-03 网络出版日期:2017-05-24

基金项目:浙江省教育厅科研项目(Y201329492)

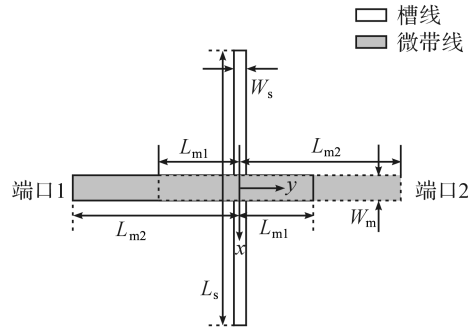
作者简介:程巍(1993-),女,湖北孝感人,硕士研究生,主要从事微波电路设计、天线技术的研究。

通信作者:李霖,E-mail:lilin\_door@hotmail.com

波长槽线组成。其中,半波长槽线的物理长宽分别为  $L_s$  和  $W_s$ ,四分之一波长微带线的物理长宽分别为  $L_{m1}$  和  $W_{m1}$ ,微带馈线的长度为  $L_{m2}$ 。滤波器采用厚度为 0.8 mm,介电常数为 4.4,损耗角正切值为 0.02 的 FR4 介质板制作。该物理结构对应的等效传输线模型如图 2 所示。图 2 中两侧阻抗值为  $Z_{ol}$ 、



(a)带通滤波器三维结构



(b)带通滤波器平面

图1 带通滤波器物理结构

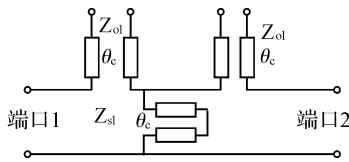


图2 带通滤波器等效传输线模型

传输线模型的正向散射参数  $S_{21}$  可以表达为:

$$|S_{21}|^2 = \frac{1}{1 + |F|^2} \quad (1)$$

其中:特征函数  $F = (B - C)/2$ ,  $B$  和  $C$  均为图 2 电路的  $ABCD$  矩阵中的矩阵参数值。可求得:

$$F = j \left( k_1 \frac{\cos \theta_c}{\sin^3 \theta_c} + k_2 \frac{\cos^3 \theta_c}{\sin^3 \theta_c} \right) \quad (2)$$

其中:  $k_1 = 0.5/Z_{sl} - Z_{ol}$ ;  $k_2 = Z_{ol} + 0.5(Z_{ol}^2 - 1)/Z_{sl}$ 。另外,具有切比雪夫响应的正向散射参数  $S_{21}$  具有以下形式:

$$|S_{21}|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 \cos^2(n\phi + q\xi)} \quad (3)$$

其中:  $x = \cos \phi = \alpha \cos \theta$ ;  $\alpha = \frac{1}{\cos \theta_c}$ ;  $y = \cos \xi = x \sqrt{\frac{\alpha^2 - 1}{\alpha^2 - x^2}}$ 。关系式中  $\epsilon$  表示通带等纹波系数,  $\alpha$  表示影响带宽的变量。式(3)中的余弦函数表达式又可以表示为以下形式:

$$\cos(n\phi + q\xi) = T_n(x)T_q(y) - U_n(x)U_q(y) \quad (4)$$

其中:  $T_n(x)$  和  $U_n(x)$  分别为切比雪夫一类多项式和切比雪夫二类多项式。令  $n=0, q=3$ , 则:

电长度为  $\theta_c$  的开路传输线分别表示图 1(a)中顶层介质板和底层介质板上的四分之一波长微带线;而中间地面层上蚀刻的半波长槽线则由图 2 中阻抗值为  $Z_{sl}$ 、电长度为  $\theta_c$  的短路传输线表示。此外,每段传输线在带通滤波器的下限截止频率  $f_c$  处对应的电长度均为  $\theta_c$ 。

$$\begin{aligned} F &= \epsilon \cos(3\xi) = \epsilon [T_0(x)T_3(y) - U_0(x)U_3(y)] \\ &= \epsilon \left[ -3(\alpha^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \right] \frac{\cos \theta_c}{\sin^3 \theta_c} + \epsilon \left[ 3(\alpha^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \right. \\ &\quad \left. + 4(\alpha^2 - 1)^{\frac{3}{2}} \right] \frac{\cos^3 \theta_c}{\sin^3 \theta_c} \end{aligned} \quad (5)$$

其中:  $k_1 = \epsilon \left[ -3(\alpha^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \right]$ ;  $k_2 = \epsilon \left[ 3(\alpha^2 - 1)^{\frac{1}{2}} + 4(\alpha^2 - 1)^{\frac{3}{2}} \right]$ 。若已知纹波系数  $\epsilon$  和电长度  $\theta_c$ , 那么由式(2)和式(5)直接求出传输线的特性阻抗  $Z_{ol}$  和  $Z_{sl}$ 。根据以上理论分析可知,该滤波器的设计可按照以下步骤进行:

- 确定待实现的滤波响应的特性,即  $\epsilon$  和  $\theta_c$  的值;
- 由式(2)和式(5)提取出  $Z_{ol}$  和  $Z_{sl}$  的值;
- 根据  $\theta_c$ 、 $Z_{ol}$  和  $Z_{sl}$  的值计算出槽线以及微带线的物理长度;
- 在 HFSS 软件中建立物理模型,进行电磁仿真,并适当优化物理参数,使滤波器响应逼近理想特性;
- 加工制作带通滤波器电路板,并且通过测试电路板验证方案的可行性。

## 2 宽带带通滤波器的制作与测量

根据图 2 关于宽带带通滤波器传输线模型的分析,本文设计了一个中心频率为 3 GHz、频带宽为 100%、纹波系数为 0.1 dB 的带通滤波器。依据上文的设计步骤,求出电路参数为  $Z_{ol} = 51.64 \Omega$ ,  $Z_{sl}$

$=43.57\ \Omega, \theta_c=45^\circ$ 。根据该电路参数,由微带线和槽线物理长宽的经验公式<sup>[9-10]</sup>,分别计算出微带线和槽线的物理长宽。然后在 HFSS 13 软件中建立物理模型,通过电磁仿真、优化拟合确定最优的物理尺寸。电路的最终物理尺寸为: $L_{m1}=13.649\ \text{mm}$ ,  $L_{m2}=12\ \text{mm}$ ,  $W_m=1.8\ \text{mm}$ ,  $L_s=31.8\ \text{mm}$ ,  $W_s=0.425\ \text{mm}$ 。

传输线模型仿真、电磁仿真和实物测量的  $S$  参数见图 3。通过图 3 中的曲线可知,传输线模型仿真结果、电磁仿真结果与实物测量在  $0\sim 6\ \text{GHz}$  的频率范围内基本一致。由于设计过程中忽略了频率色散、不连续效应和导体/材料/辐射损耗等因素,因此传输线模型仿真、电磁仿真与实物测量结果之间产生了微小差别。电磁仿真与实物测量结果表明,该滤波器可在中心频率  $3\ \text{GHz}$  附近提供相对带宽达  $100\%$  的宽带滤波特性。测量结果验证了该设计方法的可行性与准确性。表 1 对该带通滤波器与文献设计的带通滤波器的性能做了比较。本文设计的带通滤波器在电路尺寸、宽带宽和低插入损耗之间有一个较好的平衡。虽然本文中设计的带通滤波器带宽小于文献[2]和[8]所提出的带通滤波器,但是相比于文献[8]设计的带通滤波器,本文中设计的带通滤波器具有更低的插入损耗和更小的电路尺寸。

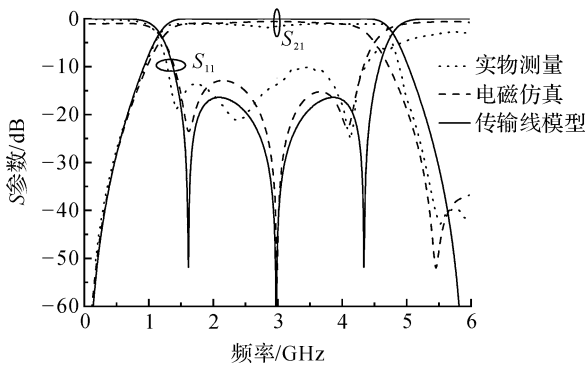


图 3 传输线模型、电磁仿真与实物测量的  $S$  参数曲线

表 1 带通滤波器性能对比

设计方案	文献[1]	文献[2]	文献[8]	本文
中心频率 $f_0/\text{GHz}$	6.00	6.80	5.51	3.00
带宽 $FBW/\%$	67.00	123.00	101.60	100.00
插入损耗/ $\text{dB}$	$>0.97$	$<1.20$	$<2.32$	$<0.10$
电路面积/ $\text{mm}^2$	$0.45\lambda_g^2$	$0.16\lambda_g^2$	$1.74\lambda_g^2$	$0.23\lambda_g^2$

注: $\lambda_g$  为传输线在其中心频率处对应的引导波长。

### 3 结 论

本文提出了基于槽线的宽带带通滤波器的设计方法。理论分析和测量结果表明:采用该结构可有效缩小电路尺寸,并实现了滤波器的宽带宽与低插损。采用该方法设计带通滤波器,可直接从电路响应特性求出电路参数,大大缩短滤波器设计的计算时间和设计周期。

### 参考文献:

- [1] CHU Q X, QIU L L. Wideband balanced bandpass filter using slot resonators and back-to-back structure [C]// Wireless Symposium (IWS), 2015 IEEE International. IEEE, 2015:1-4.
- [2] 艾明贵,梁显锋. 一种小型化的超宽带微带带通滤波器的设计[J]. 电子设计工程, 2015(24):113-115.
- [3] 方婷. 微带/槽线结构平衡带通滤波器的研究与设计 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2014:39-44.
- [4] 王善进,刘华珠,赖颖昕,等. 基于微带线-槽线转换的具有陷波特性的超宽带带通滤波器[J]. 电子器件, 2016, 39(3):522-525.
- [5] DELENIV A, GASHINOVA M, ERIKSSON A, et al. Novel band-pass filter utilizing s-shaped slot line resonators [C]// Microwave Symposium Digest, 2003 IEEE MTT-S International. IEEE, 2003, 2:1081-1084.
- [6] DONG K, HE Y, YANG X, et al. Millimeter-wave wideband bandpass filter using novel slotted substrate integrated waveguide [C]// Asia-Pacific Microwave Conference. IEEE, 2015:1-3.
- [7] 李素萍,蔡洪涛,吴伟. 带有方形切角和正交槽线的带通滤波器设计[J]. 华北水利水电大学学报, 2011, 32(1): 104-106.
- [8] LI R, SUN S, ZHU L. Synthesis design of ultra-wideband bandpass filters with composite series and shunt stubs [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2009, 57(3):684-692.
- [9] 徐兴福. ADS2008 射频电路设计与仿真实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013:81-82.
- [10] GUPTH K C, GARG R, BAHL I J. Microstrip Lines and Slotlines [M]. 2nd ed. Boston, London: Artech House, 1979:283-286.

## Design of Wideband Band-Pass Filter Based on Half-Wavelength Slotline

CHENG Wei, ZHANG Tenghui, WU Jiajia, YANG Junxiu, LI Lin

(School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** A novel wideband band-pass filters based on  $1/2$  wavelength slotline is proposed in this paper. The wideband filter structure and the corresponding equivalent transmission line model are given in this design scheme. The equivalent circuit analysis reveals that the electrical and then geometric parameters of the filter structure can be obtained by theoretical calculation under the specific filter response conditions. The feasibility of the scheme is well verified by the EM simulation and measurements of the fabricated exemplary filter using the proposed structure and design method. A broadband band-pass filter with a center frequency of 3 GHz and a bandwidth of 100% is designed by using the above method. The results of electromagnetic simulation and physical measurement indicate that the scheme is accurate and fast, and the design cycle of the filter can be shortened significantly while achieving the wide bandwidth and low insertion loss characteristics of the filter.

**Key words:** slot; wideband; band-pass filter

(责任编辑: 康 锋)