

文章编号: 1001-4322(2013)11-2919-03

基于人工传输线结构的小型化低通滤波器^{*}

吴 昕, 黄 文, 童 帆, 刘长军

(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘 要: 提出了一种基于人工传输线结构的小型化低通滤波器的设计方法。通过利用电磁仿真软件直接构建出微带电抗器件并对其逐一进行参数提取验证, 将设计的微带电抗器件进行组合集成和调试后得到相应的低通滤波电路。对 5 阶巴特沃兹低通滤波电路和 0.5 dB 切比雪夫低通滤波电路的设计和测量结果对比表明, 采用本方法所设计的滤波器结构紧凑, 面积约为常规低通滤波电路的 23%, 测量结果与仿真吻合。

关键词: 微带滤波器; 小型化; 人工传输线; 电抗器件; 电磁仿真

中图分类号: TN713 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20132511.2919

微带低通滤波器具有电路易于构造和便于集成的特点, 在微波电路中得到广泛应用^[1]。为了满足在多种领域的应用需求, 小型化、低插损、高抑制度逐渐成为了设计滤波器的关键指标。目前, 常用的微波滤波器有许多类型^[2], 如基于 Hairpin 结构滤波器滤波器^[3]、DGS(Defected Ground Structure)结构滤波器^[4]、阶梯阻抗型滤波器^[5]等。当工作在微波低频段时, 大部分结构都尺寸相对较大。借鉴人工传输线的基本结构, 本文设计了一种新型小型化的低通滤波器, 尺寸仅为常规低通滤波电路的 23%。该结构电路采用电磁仿真软件结合参数提取方法进行仿真设计, 利用微带弯折线电感和贴片电容来替代集总电感与电容, 设计简单且易于实现, 测量与理论仿真吻合, 频率响应良好。

1 滤波器设计方法

设计分布参数微波滤波电路时, 根据集总参数低通滤波电路模型, 应用 Richards 变换和 Kuroda 法则得分布参数滤波电路, 然后根据微带传输线的特性得到相应的结构, 实现低通滤波电路的设计。随着电磁仿真技术的发展, 软件功能更加完善, 计算精度与效率逐渐提高^[6]。电磁仿真软件可以在给定的工作频率范围内构建微带器件来等效集总参数器件^[7-8]。采用该方法构建的滤波电路有效地适用于微波低频段, 与传统的分布参数滤波器相比, 电路结构紧凑, 参数准确。

据以上设计理念, 基于微带构建电抗器件的低通滤波器一般设计步骤为: ①根据设计参数确定滤波器阶数 N , 获得归一化低通滤波的参数 g_i ; ②进行频率变换和阻抗变换得到滤波电路参数 L_i 和 C_j ; ③根据要构建电感与电容的构型修正等效电路, 获得实际等效元件参数; ④基于电磁仿真软件构建电感 L_i 和电容 C_j ; ⑤根据实际电路连接方式进行组合集成, 并进行调整优化。

2 微带低通滤波器仿真设计

归一化低通滤波电路具有两种电路结构, 我们选择首元件串联的 5 阶滤波电路形式作为设计参考, 其集总参数原型等效电路模型如图 1 所示。

选择 5 阶巴特沃兹滤波电路、0.5 dB 等波纹切比雪夫滤波电路为例进行设计。选取特征阻抗为 50 Ω , 截止频率为 1.8 GHz 作为设计目标。使用基于矩量法的 IE3D 仿真软件^[9]对滤波器进行仿真。采用介质基板相对介电常数 2.65, 厚度 1 mm, 损耗角正切 0.005 的聚四氟乙烯玻璃纤维板材。

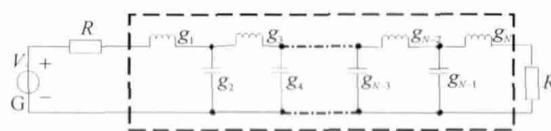


Fig. 1 Equivalent circuit of a 5th order low-pass filter

图 1 5 阶低通滤波等效电路 ($N=5$)

^{*} 收稿日期: 2013-04-28; 修订日期: 2013-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(60971051); 教育部新世纪人才项目(NCET-12-0383); 民用航天科研预先研究项目

作者简介: 吴 昕(1989—), 女, 硕士研究生, 从事电磁场与微波技术研究; wuxin5342@gmail.com。

通信作者: 刘长军, 男, 教授, 博士生导师; cjliu@scu.edu.cn。

以 5 阶巴特沃兹滤波器设计为例,建立微带线构建弯折线电感模型,如图 2(a)所示。由于实际电路中会引入寄生电容,弯折线电感的实际等效电路应如图 2(b)所示,为一个对称的 π 型电路,包括串联电感 L 和电阻 R 及并联电容 C 。对弯折线进行 0~5 GHz 的电磁场仿真获取其导纳矩阵 Y ,利用 Y 的虚部通过参数提取得到等效电路的电感与电容值,见式(1),其中 ω 为角频率。获得 $L=7.20$ nH, $C=0.40$ pF, $R=1.95$ Ω 。理论等效电路不包含寄生电容,其等效电感 $L_{\text{eff}}=8.84$ nH。仿真计算后,确定各频率弯折线的电感值,对比设计参数对微带电感的长度、宽度及高度进行调整。

$$\text{Im}[Y] = \text{Im} \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{j\omega L} \begin{bmatrix} 1 - \omega^2 LC_1 & 1 \\ 1 & 1 - \omega^2 LC_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

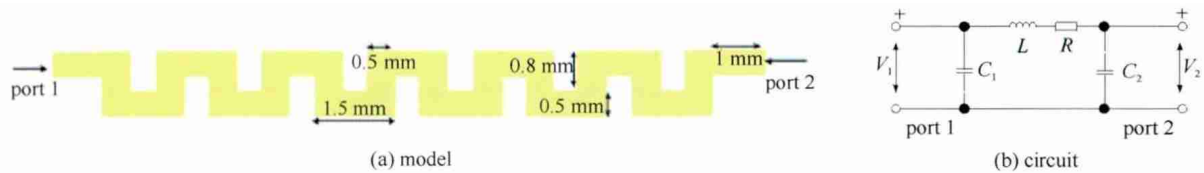


Fig. 2 Constructed inductor based on a microstrip meander line

图 2 使用微带曲折线构建的电感

采用类似的方法来构造等效电容。要将微带电容并联到电路中,需要考虑直接连接可能会引入寄生参数。因此,在电容的输入端增加了宽度突变。将端口的参考面设置到突变连接处,如图 3 所示。同理,根据电容等效电路计算得到理论等效电路中 $C=2.86$ pF,实际等效电路 $R=1.12$ Ω , $C=1.48$ pF,电感 $L=2.57$ nH。由式(2)计算可得 $C_{\text{eff}}=2.86$ pF,与理论值吻合。将构建好的电抗元件进行集成得到最终的滤波电路,如图 4 所示。

$$j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j\omega C_{\text{eff}}} \quad (2)$$

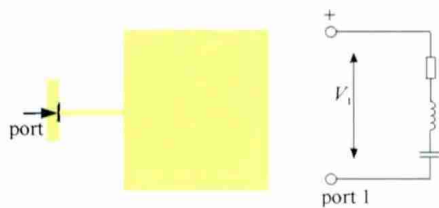


Fig. 3 Constructed capacitor from microstrip structure

图 3 基于微带结构的电容

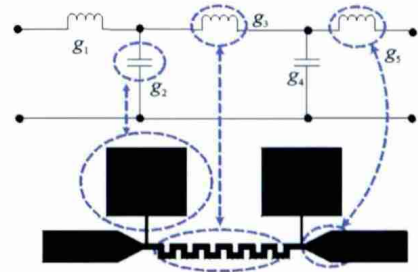


Fig. 4 5th order Butterworth low-pass filter

图 4 微带 5 阶巴特沃兹低通滤波器

3 测试结果及讨论

采用本文提出的基于微带构建电抗器件方法设计的小型化低通滤波器的实物如图 5 所示。滤波器的尺寸分别为 $32.0 \text{ mm} \times 10.0 \text{ mm}$ ($1.92\lambda \times 0.60\lambda$) 和 $44.5 \text{ mm} \times 9.8 \text{ mm}$ ($2.67\lambda \times 0.59\lambda$)。使用安捷伦 N5230A 矢量网络分析仪进行 S 参数测量,实测与仿真对比如图 5 所示。

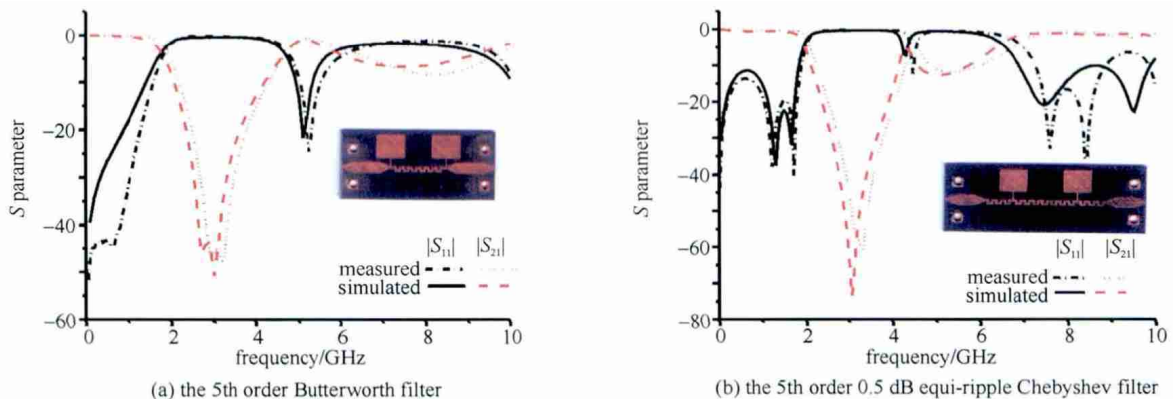


Fig. 5 Comparison between measurements and simulated results

图 5 仿真与实测结果对比

设计的 5 阶巴特沃兹滤波器在 0~1.5 GHz 内通带损耗低于 0.5 dB, 回波损耗高于 10 dB。0.5 dB 等波纹切比雪夫滤波器在 0~1.5 GHz 内通带损耗低于 0.29 dB, 回波损耗高于 13.6 dB。仿真结果与实际测量结果吻合良好, 验证了设计方法的正确性和可靠性。微带线器件集成引入一定的电路耦合和寄生参数, 导致实测结果存在一定的差异。由于加工精度与基板参数可能存在偏差, 造成截止频率略高于设计。

4 结 论

本文提出了一种基于微带线构建电抗器件设计低通滤波器的方法。根据设计参数确定滤波器的 LC 参数, 利用电磁仿真软件和参数提取的方法分别构建串联电感和并联电容, 采用类似于人工传输线的结构实现小型化的低通滤波电路, 面积仅为常规微带低通滤波电路的 23%。通过该方法设计了截止频率为 1.8 GHz 的两种滤波器, 实现了良好的滤波器频率响应, 实测与理论仿真吻合, 能够有效适用于微波低频段, 在小型化滤波器设计中得到应用。今后将改进本文提出的设计方法, 进一步改善低通滤波电路带外响应特性。

参考文献:

- [1] Hong J S, Lancaster M J. Microstrip filters for RF /microwave applications[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2001.
- [2] He Qijuan, Liu Changjun. A novel low-pass filter with an embedded band-stop structure for improved stop-band characteristics[J]. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2009, **19**(10): 578-580.
- [3] 蔡钟斌. 基于阶梯阻抗夹谐振器的小型低通滤波器[J]. 信息与电子工程, 2007, **5**(1): 78-80. (Cai Zhongbin. Miniature low pass filter using stepped impedance hairpin resonator. *Information and Electronic Engineering*, 2007, **5**(1): 78-80)
- [4] 倪春, 吴先良, 安士全. 微带 DGS 低通滤波器的设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, **4**(2): 217-220. (Ni Chun, Wu Xianliang, An Shiquan. A design of microstrip DGS low-pass filter. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2010, **4**(2): 217-220)
- [5] 杨维明, 吴姣, 张劲, 等. 基于分形技术的阶跃阻抗微带低通滤波器设计[J]. 电波科学学报, 2010, **25**(5): 1000-1004. (Yang Weiming, Wu Jiao, Zhang Jin, et al. Design of stepped impedance micro-strip low-pass filter based on fractal shape technique. *Chinese Journal of Radio Science*, 2010, **25**(5): 1000-1004)
- [6] 肖卫东, 潘涵. 国外电磁兼容仿真软件发展概述[J]. 装备环境工程, 2010, **7**(2): 55-60. (Xiao Weidong, Pan Han. Development of simulation software of electromagnetic compatibility overseas. *Equipment Environmental Engineering*, 2010, **7**(2): 55-60)
- [7] 黄文, 刘长军. 基于人工传输线的小型微带 Wilkinson 功分器[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(1): 123-126. (Huang Wen, Liu Changjun. Design of miniaturized microstrip Wilkinson power divider based on artificial transmission lines. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(1): 123-126)
- [8] 李雨浓, 刘长军. 基于混合左右手和人工传输线的平面双向耦合器[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(10): 2403-2406. (Li Yunong, Liu Changjun. Bi-directional coupler based on composite right/left-handed and artificial transmission lines. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(10): 2403-2406)
- [9] Zheng Jianxiong. A general purpose 3D electromagnetic simulation and optimization package-IE3D[C]//Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International. 1994: 373-376.

Novel miniaturized low-pass filters from artificial transmission line structures

Wu Xin, Huang Wen, Tong Fan, Liu Changjun

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: A novel design on miniaturized low-pass filters from artificial transmission line structures is proposed. Reactance components, i. e. capacitors and inductors, are directly constructed from microstrip structures based on electromagnetic simulation and parameter extraction. The constructed reactance components are integrated to build low-pass filters. The results of two 5th-order Butterworth and 0.5 dB ripple Chebyshev low-pass filters, which are realized by the proposed method, are presented. The proposed low-pass filter is compact and its size is only 23% of a conventional filter. The simulation agrees well to the measurements, which shows the validation of the proposed design method. The miniaturized low-pass filters have good applications in microwave systems.

Key words: microstrip filter; miniaturization; artificial transmission line; reactance components; electromagnetic simulation