

小型化超宽阻带低通滤波器的设计

宁俊松, 罗正祥

(电子科技大学光电信息学院 成都 610054)

【摘要】提出一种小型化超宽阻带低通滤波器设计方法,该方法对常见的高低阻抗低通滤波器进行结构改进。首先将原来直线连接的高阻抗线和低阻抗线变换为成90°直角相连接,利用直角拐角的不连续性产生寄生参量对阻带远端由高次谐波产生的寄生通带进行抑制,极大地缩小了低通滤波器的体积。同时将低通滤波器中的部分传输线用与其等效的T形节替代,实现了带阻滤波器嵌入到低通滤波器内部,既对阻带近端由低次谐波产生的寄生通带进行抑制,又不影响低通滤波器的通带内性能。该低通滤波器性能优越,体积比常见的高低阻抗低通滤波器体积缩小了50%,通带0~4 GHz,插入损耗<0.5 dB,超宽阻带(5个倍频程)5~30 GHz,抑制>40 dB。

关键词 小型化; 低损耗; 低通滤波器; 超宽阻带

中图分类号 TN713

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.02.015

Design of Compact Ultra Broad-Stopband Lowpass Filter

NING Jun-song and LUO Zheng-xiang

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract For miniaturization and harmonic suppression, a novel planar compact lowpass filter is presented in this paper. A conventional stepped-impedance lowpass filter is modified by some microstrip steps connected in 90° and some T-shaped transmission lines integrated into the lowpass filter. The proposed lowpass filter has the advantage of low insertion loss (below 0.5 dB at 0~4 GHz), ultra broad stopband (over 40 dB at 5~30 GHz) and compact size (50% reduction). Experiment validates the design concept.

Key words compact size; low loss; lowpass filter; ultra broad stopband

低通滤波器是一种常见的微波器件,作为选频器件它既可通过有用信号又能抑制干扰信号和谐波信号,在现代通信和雷达系统中有着广泛的应用。为了适应现今日益复杂的电磁环境以及为了满足在舰载、机载和宇航环境下的应用,低通滤波器的小型化、低损耗、宽阻带成为衡量器件优劣的关键指标。为了获得这些优异的性能,近年人们进行了大量的研究,提出一些新结构^[1-5],这些结构有着良好的性能,但也存在设计复杂或是加工复杂的缺陷。本文提出一种小型化超宽带低通滤波器设计方法,对常见的高低阻抗低通滤波器进行结构改进。该方法一方面将原来直线连接的高阻抗线和低阻抗线转化为90°直角相连接,利用直角拐角的不连续性产生寄生参量对阻带远端由高次谐波产生的寄生通带进行抑制,同时极大地缩小了低通滤波器的体积^[6];另一方面,将低通滤波器中的部分传输线用与其等效的T形节替代,实现了带阻滤波器嵌入到低通滤波器内部,既对阻带近端由低次谐波产生的寄生通带

进行抑制,又不影响低通滤波器的通带内性能^[7-8]。改进后的新结构电路设计简单且易于平面电路实现,达到了低通滤波器小型化、低损耗、超宽阻带的优异性能。使用基于矩量法的全波分析软件IE3D仿真和试验结果加以验证,两者得到了很好的吻合。

1 超宽阻带低通滤波器设计

超宽阻带低通滤波器的设计指标为:通带0~4 GHz,插入损耗<0.5 dB;阻带(5个倍频程)5~30 GHz,抑制>40 dB;体积要求尽量小。为了避免采用微带结构空气介质面附近激起表面波以及辐射损耗造成损耗较大,滤波器采用了带状线结构。基片采用Arlon公司AD350:介电常数 $\epsilon_r=3.5$,基片厚度 $H=0.762$ mm

1.1 常见高低阻抗低通滤波器设计

常见高低阻抗低通滤波器综合设计较为成熟易于实现^[9],它根据截止频率和带外抑制要求,选择函数形式和滤波器阶数,综合可得等效LC低通原型

收稿日期:2008-09-10;修回日期:2009-02-25

基金项目:国家自然科学基金(60277008);部级重点实验室基金(514910501005DZ0201)

作者简介:宁俊松(1972-),男,博士生,主要从事高温超导材料在微波器件及系统中的应用方面的研究。

电路的集总元件的参数值, 根据式(1)、式(2), 集总元件可以用分布参数传输线段(高低阻抗线)进行近似替代, 构成半集中参数低通滤波器。

低阻线等效并联电容为:

$$\omega C = \frac{1}{Z_0} \sin\theta \quad (1)$$

高阻线等效串联电感为:

$$\omega L = 2Z_0 \tan \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

式中 ω 为角速度; Z_0 为特性阻抗; θ 为电长度。

由于推导的过程中使用了理想电路等效, 没有考虑分布元件的寄生效应和相邻谐振器之间的附加耦合, 推导出的滤波器初值和实际情况有些偏差, 通过全波分析软件IE3D进行结构微调, 得到最终的设计结果, 如图1所示。

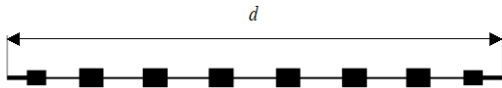


图1 常见高低阻抗低通滤波器电路图

1.2 低通滤波器改进I

为了减小低通滤波器体积和获得更宽的阻带抑制, 对常见高低阻抗低通滤波器的结构进行了改进。如图2所示, 将原来直线连接的高阻抗线和低阻抗线转化为90°直角相连接, 利用90°直角拐角的不连续性产生寄生电感电容对高次谐波的寄生通带进行抑制。

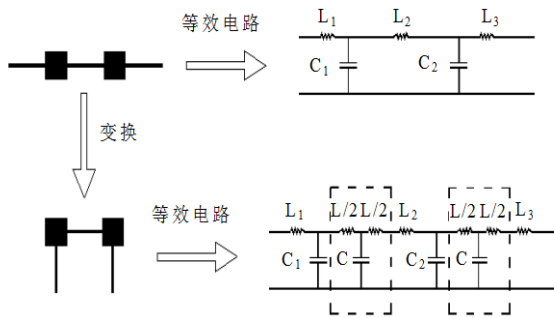


图2 低通滤波器改进I等效电路

将低通滤波器中一组直线相连的高阻线与低阻线变换成90°直角相接, 这就相当于电路增加2个90°直角拐角, 90°直角拐角的不连续性产生了寄生电感和电容^[5], 其等效电路如图2中虚线框所示。由于带状线与微带线电磁场分布近似, 对带状线的直角拐角的不连续性可以使用微带线公式来近似考虑。

微带线直角拐角寄生参量的计算公式为^[10]:

$$\frac{C}{W} = (9.5\epsilon_r + 1.25) \frac{W}{h} + 5.2\epsilon_r + 7.0 \quad (3)$$

$$\frac{L}{h} = 100 \left(4\sqrt{\frac{W}{h}} - 4.21 \right) \quad (4)$$

式中 W 为微带线宽度; ϵ_r 为相对介电常数; h 为基片的厚度; C 为寄生电容量; L 为寄生电感量。

以 $W=3 \text{ mm}$, $\epsilon_r=3.5$, $h=0.762 \text{ mm}$ 的微带直角拐角为例, 代入式(3)、式(4)解得:

$$C \approx 0.5 \text{ pF}, L \approx 0.3 \text{ nH}$$

对图2中虚线框内的一个等效电路进行模拟仿真, 仿真响应曲线如图3所示。可以看出其相当一个简单低通滤波器电路, 效果是抑制了高端的频率信号。多个90°直角拐角相连相当于多个抑制高端的频率信号的低通滤波器级联, 因此低通滤波器改进I对高端的频率信号有良好的抑制。

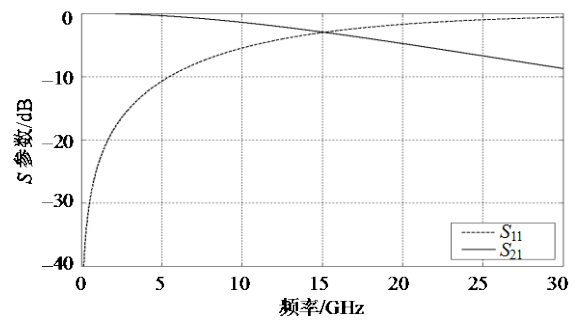


图3 直角拐角等效电路频响特性

根据上述结论, 对常见高低阻抗低通滤波器进行改进, 如图4所示。对由此产生的不连续造成的对滤波器通带性能的影响, 使用全波分析软件IE3D进行仿真优化微调, 结果如下: $d=37 \text{ mm}$, $l_1=7.7 \text{ mm}$, $W_1=0.5 \text{ mm}$

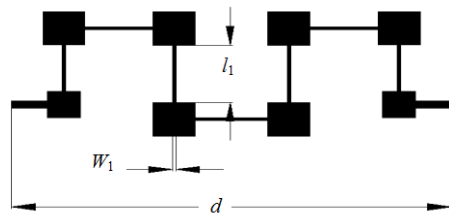


图4 低通滤波器改进I电路

1.3 低通滤波器改进II

为了提高滤波器对近端第3次谐波的寄生通带的抑制, 使用等效的T形节代替滤波器中的串联传输线的方式, 引入一个带阻滤波器对第3次谐波的寄生通带进行抑制^[8]。本文考虑用T形节来代替滤波器第3个高阻线和第5个高阻线。由于滤波器结构是对称的, 因此只需要考虑T形节来代替滤波器第3个高阻线的情况。代替的传输线和等效T形节电路原理如图5所示。

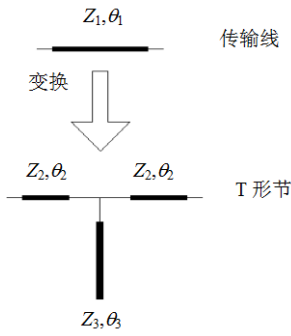


图5 等效T形节电路原理图

由文献[8], 计算公式为:

$$Z_2 = \cot\theta_2 \frac{1 - \cos\theta_1}{\sin\theta_1} Z_1 \quad (5)$$

$$Z_3 = \tan\theta_3 \frac{\cos^2\theta_2}{\cos 2\theta_2 - \cos\theta_1} \frac{1 - \cos\theta_1}{\sin\theta_1} Z_1 \quad (6)$$

式中 Z_1 、 Z_2 和 Z_3 是相应传输线的特性阻抗; θ_1 、 θ_2 和 θ_3 是相应传输线的电长度。在式(5)和式(6)两个方程中, 由前面分析已知第3个高阻线宽带 $W_1=0.5$ mm, 即阻抗 $Z_1 \approx 62 \Omega$; 长度 $l_1=7.7$ mm, 即 $\theta_1 \approx 69^\circ$; T形节开路短截线的电长度 $\theta_3=30^\circ$ (由要抑制的寄生通带的频率决定, $\theta_3=90^\circ/n$, n 为寄生通带频率与基波频率的比)。而 Z_2 、 Z_3 和 θ_2 是未知参数, 只有两个方程, 说明可能有无数个解满足上述方程, 考虑到电路的可实现性, 只有部分解有现实的意义, 因此只要合理选择 θ_2 的值, 就能确定 Z_2 和 Z_3 的值。

本文取 $\theta_2=25^\circ$, 代入式(5)、式(6), 得 $Z_2=90 \Omega$, $Z_3=73 \Omega$ 。故得到T形节结构尺寸 $W_2=0.18$ mm, $W_3=0.34$ mm, $l_2=2.8$ mm, $l_3=3.3$ mm。最后得到的滤波器改进II结构图如图6所示。

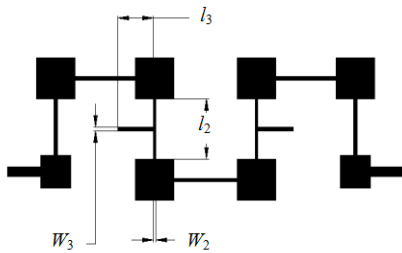


图6 低通滤波器的改进II电路图

2 试验结果

常见高低阻抗低通滤波器与改进结构低通滤波器频率响应曲线如图7所示。常见高低阻抗低通滤波器的体积比较大, 总长度 $d=74$ mm, 从图中可以看出其阻带在第3和第5奇次谐波处出现寄生通带。

从图7中低通滤波器改进I的频响特性可以看出其对远端第5次谐波的寄生通带的抑制达到40 dB, 而对近端第3次谐波的寄生通带的抑制只有20 dB。

从图7还可以得到新结构的低通滤波器测试指标达到: 通带0~4 GHz, 插入损耗<0.5 dB, 带外5~30 GHz, 抑制>40 dB, 体积为40 mm×20 mm×10 mm, 新结构的低通滤波器具有小型化、低损耗、超宽阻带的良好性能。

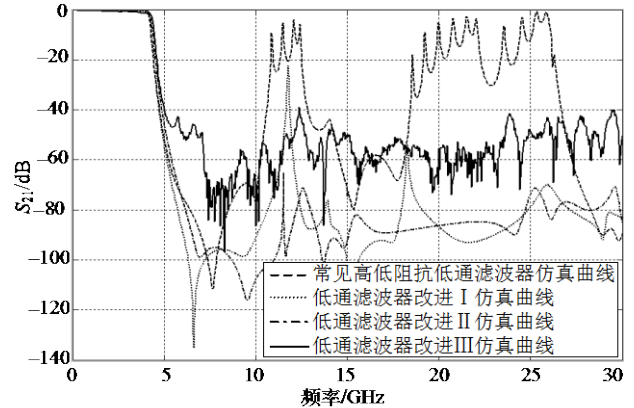


图7 低通滤波器频率响应对比图

3 结论

本文提出一种小型化超宽带低通滤波器设计方法, 对常见高低阻抗低通滤波器进行结构上的改进, 大大缩小了滤波器的体积, 更重要的是对滤波器阻带内谐波的寄生通带进行了有效的抑制, 获得了超宽阻带。用全波分析软件IE3D仿真和试验加以验证, 得到了很好的吻合。该方法不但可以广泛地应用于微波电路器件和系统中, 而且对毫米波电路器件和系统也有一定的借鉴作用。

参 考 文 献

- [1] KIM T, SEO C. A novel photonic bandgap structure for low-pass filter of wide stopband[J]. IEEE Microw Guid Wave Lett, 2000, 10 (1): 13-15.
- [2] AHN D, PARK J S, KIM C S, et al. A design of lowpass filter using the novel microstrip defected ground structure [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2001, 49(1): 86-93.
- [3] HSIEH L H, CHANG K. Compact elliptic-function low-pass filters using microstrip stepped-impedance hairpin resonators[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech., 2003, 51(1): 93-199.
- [4] UYSAL S. A double-sided suspended substrate microstrip lowpass filter[C]//2003 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference- IEEE MIT-S IMOC 2003. [S.1.]: IEEE, 2003: 21-24.
- [5] GAO J, ZHU L. Asymmetric parallel-coupled CPW stages for harmonic suppressed $\lambda/4$ bandpass filters[J]. Electronics Letters[J], 2004, 40(18): 1122-1123.
- [6] KIM I S, YUN S W. Compact LPF using asymmetrical microstrip step discontinuity for harmonic suppression[J]. Electronics Letters, 2005, 41(16): 41-42.

- [7] TU Wen-hua, CHANG Kai. Compact second harmonic-suppressed bandstop and bandpass filters using open stubs[J]. *IEEE MTT*, 2006, 54(6): 2497-2502.
- [8] 宁俊松, 罗正祥, 羊 恺, 等. 宽阻带平面低通滤波器的设计[J]. *电子学报*, 2008, 36(2): 342-345.
NING Jun-song, LUO Zheng-xiang, YANG Kai, et al. Design of broad-stopband planar lowpass filters[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(2): 342-345.
- [9] 顾继慧. 微波技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
GU Ji-hui. *Microwave technology*[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [10] THOMSON A F, GOPINATH A. Calculation of microstrip discontinuity inductances[J]. *IBID*, 1975, MTT-23: 648-655.

编辑 漆 蓉

(上接第213页)

参 考 文 献

- [1] FENG S, JIANG G, YU M, et al. A color correction algorithm for noisy multi-view images[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(1): 28-30.
- [2] QUAN C, KANG X, TAY C J. Speckle noise reduction in digital holography by multiple holograms[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(11): 115801-1-115801-6.
- [3] BRUNO M, JOVAN G B, MILES N W. Noise and sampling analysis for multiple-image radiography[C]//3rd IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI'06). Arlington WA, USA: IEEE, 2006, 3: 1232-1235.
- [4] CHANG S G, YU B, VETTERLI M. Wavelet thresholding for multiple noisy image copies[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(9): 1631-1635.
- [5] CHANG S G, YU B, VETTERLI M. Multiple copy image denoising via wavelet thresholding[C]//International Conference on Image Processing. Chicago, Illinois: IEEE Computer Society, 1998.
- [6] 贺卫国, 黎绍发. 多幅相同场景的图像的降噪[J]. *计算机工程与应用*, 2005, 12: 15-17.
HE Wei-guo, LI Shao-fa. Multiple copy image denoising[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, 12: 15-17.
- [7] LIU Q K, QUE P W, GUO H W, et al. Blind noise cancellation in ultrasonic NDE using RPS and ICA: computer simulation[J]. *Journal of X-Ray Science and Technology*, 2006, 14: 21-26.
- [8] HAO Z Y, JIN Y, YANG C. Study of engine noise based on independent component analysis[J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2007, 18(5): 772-777.
- [9] XU J, ROY A, CHOWDHURY M H. Noise separation in analog integrated circuits using independent component analysis technique[J]. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2008, 15: 163-180.
- [10] PARK H M, OH S H, LEE S Y. Adaptive noise cancelling based on independent component analysis[J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(15): 832-833.
- [11] BLANCO D, MULGREW B. ICA in signals with multiplicative noise[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2005, 53(8): 2648-2657.
- [12] BLANCO D, MULGREW B, MCLAUGHLIN S, et al. The use of ICA in multiplicative noise[J]. *Neurocomputing*, 2006, 69: 1435-1441.
- [13] HYVARINEN A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1999, 10(3): 626-634.
- [14] WANG P S, WU Y T, HUNG C I, et al. Early detection of periodic sharp wave complexes on EEG by independent component analysis in patients with Creutzfeldt-Jakob disease[J]. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 2008, 25(1): 25-31.
- [15] REIDL J, STARKE J, OMER D B, et al. Independent component analysis of high-resolution imaging data identifies distinct functional domains[J]. *Neuroimage*, 2007, 34(1): 94-108.
- [16] WANG J, CHANG C I. Independent component analysis-based dimensionality reduction with applications in hyperspectral image analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(6): 1586-1600.

编辑 黄 莘