

# 一种具有谐波抑制特性的窄带带通滤波器设计

赵建中, 杨瑾屏, 杨 国, 吴 文

(南京理工大学 近程高速目标探测技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 提出一种小型化带通滤波器结构及其设计方法. 该滤波器具有良好的窄带滤波特性和高次谐波抑制功能, 其高次谐波抑制特性由谐振加载耦合微带线结构所产生的多个传输零点来实现, 其中心工作频率和带宽则由短路短截线特性决定. 基于传输线模型和奇偶模分析推导的解析设计公式使得该滤波器的设计变得简单而快捷. 采用这种方法研制了一个中心频率为2.4 GHz的窄带带通滤波器, 其3 dB带宽为300 MHz, 通带最小插损为0.4 dB; 在二次、三次谐波频率上具有35 dB的衰减, 而四次谐波的衰减也超过20 dB.

**关键词:** 带通滤波器; 微带线; 谐波抑制; 奇偶模分析

**中图分类号:** TN822 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2009)03-0568-05

## Design of a compact narrow band-pass filter with harmonics suppression

ZHAO Jian-zhong, YANG Jin-ping, YANG Guo, WU Wen

(Ministerial Key Lab. of JGMT, Nanjing Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210094, China)

**Abstract:** A compact narrow band-pass filter with a low insertion loss and multi-order harmonics suppression is proposed. The harmonic suppression is realized through transmission zeros of the parallel coupled lines loaded open-circuited resonator, and the filter passband characteristics are determined by the short-circuited stubs. By coupling of the transmission line model of this filter and even- and odd-mode analysis, the expressions for calculating element parameters are presented, and thus the design process in this paper is fast and accurate. Finally, a band-pass filter working in 2.4 GHz is developed. Simulation and measured results show that the passband insert-loss is 0.4 dB, that stopband attenuations at second and third harmonics frequency are more than 35 dB, and that stopband attenuations at fourth is about 20 dB.

**Key Words:** bandpass filters; microstrip lines; harmonics suppression; even- and odd-mode analysis

为了改善通信系统的性能指标, 必须抑制信号高次谐波的传播和消除寄生通带影响. 采用具有谐波抑制功能的带通滤波器可以实现上述功能, 还可以有效地提高振荡器的工作效率, 降低混频器的噪声. 因此, 具有谐波抑制功能的带通滤波器已成为当前微波技术领域研究热点之一. 目前, 实现具有谐波抑制功能带通滤波器的方法通常有如下几种:

- (1) 在带通滤波器后加低通滤波器或带阻滤波器, 该方法会明显增加电路尺寸;
- (2) 利用电磁带隙结构(EBG)<sup>[1-2]</sup>的阻带特性来抑制谐波. 该方法可以明显减小所需滤波器尺寸, 但不适合接地板与金属外壳必须紧密接触的应用场合;
- (3) 采用SIR滤波器、Wiggly-Line滤波器或者是在传统平行耦合滤波器末端加载开路短截线或其他容性负载等<sup>[3-6]</sup>来抑制谐波.

这几种滤波电路虽然已经展示出一些优良的谐波抑制特性, 但其设计过程比较复杂, 而且不能同时抑制

收稿日期: 2008-12-16

基金项目: 国家部委预研项目资助(51305070204)

作者简介: 赵建中(1955-), 男, 南京理工大学副教授, E-mail: zhaonjust@sina.com.

多个高次谐波,因此有待于进一步深入研究。

笔者提出了采用谐振加载耦合微带线与短路短截线相级联的新型结构来实现带通滤波器,这种新型滤波器不仅能够同时抑制多个高次谐波,而且具有尺寸小、结构简单和设计方便等优点。由于谐振加载耦合微带线可以产生具有3个传输零点的宽阻带<sup>[7-10]</sup>,而短路短截线具有高通特性,因此将谐振加载耦合微带线结构与短路短截线相级联就可以实现窄带带通滤波器。如果将工作频率的高次谐波设计为该滤波器的传输零点,则该滤波器不仅具有高频阻带特性,而且可以同时抑制多个高次谐波。由于该滤波器仅仅由谐振加载耦合微带线和短路短截线等组成,采用传输线路模型和奇偶模分析方法相结合的方法就可以对该滤波器的特性进行精确分析,而且可以构造解析公式对其进行设计,因此该滤波器具有设计方便、结构简单和尺寸小等优点。

## 1 分析与设计

笔者提出的窄带带通滤波器单元电路由谐振加载耦合微带线和短路短截线组成,其图形参考图1。平行耦合微带线上端一侧的两个端口被短接在一起,并与具有相同电长度的微带开路谐振器相连接,组成谐振加载耦合微带结构;而谐振加载耦合微带下端一侧的两个端口则在分别并联一条接地的短路短截线以后作为该滤波器的输出端口,通过串联的匹配阻抗微带线和外部电路连接。

短路短截线在零频处具有传输零点,因此在一定频率范围内可以看成是高通结构。根据文献[6],谐振加载耦合微带线结构在低频具有传输通带,而在高频具有宽带衰减特性。因此该滤波电路可看成是由高通结构和低通结构级联,从而具有带通滤波功能。要设计满足所需特性的窄带带通滤波器,必须首先对该滤波电路进行严格的理论分析。

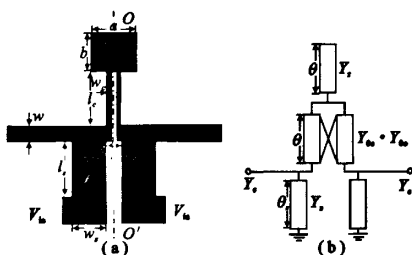


图1 窄带带通滤波器的结构图和原理图

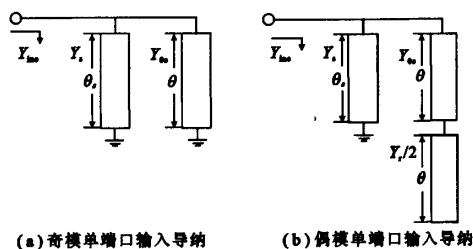


图2 奇偶模分析单端口输入阻抗等效电路

### 1.1 奇偶模分析

由图1可知,该滤波器单元是以 $O-O'$ 为对称轴的左右对称结构,故可以采用经典的奇偶模分析方法研究该结构的特性。对其端口分别用奇模电压和偶模电压对其进行激励,可以得到如图2所示的奇偶模传输线等效电路模型。奇模单端口输入导纳 $Y_{ino}$ 和偶模单端口输入导纳 $Y_{ine}$ 的表达式如下:

$$Y_{ino} = -jY_{o0} \cot \theta - jY_s \cot \theta_s \quad (1)$$

$$Y_{ine} = j((Y_{oe} + Y_r/2) \tan \theta) / (1 - (Y_r / (2Y_{oe})) \tan^2 \theta) - jY_s \cot \theta_s \quad (2)$$

式(1)和(2)中的 $Y_{o0}$ 、 $Y_{oe}$ 分别为平行耦合传输线的奇模和偶模特性导纳,其电角度用 $\theta$ 表示; $Y_r$ 是开路谐振器的特征导纳, $Y_s$ 是短路短截线的特征导纳, $\theta$ 和 $\theta_s$ 分别是两者的电角度。

若取端口特性导纳为 $Y_c$ ,则该滤波器单元的散射矩阵可以表示为

$$S = \frac{1}{(Y_{ine} + Y_c)(Y_{ino} + Y_c)} \cdot \begin{bmatrix} Y_c^2 - Y_{ine}Y_{ino} & Y_c(Y_{ino} - Y_{ine}) \\ Y_c(Y_{ino} - Y_{ine}) & Y_c^2 - Y_{ine}Y_{ino} \end{bmatrix} \quad (3)$$

在带通滤波器各个衰减极点亦即传输零点的位置,滤波器的传输系数将为0;而在带通滤波器的通带频率中心则应满足滤波器的反射系数为0的条件。所以由式(3)可以简单地得到该滤波器的传输零点条件和反射零点条件:

$$\text{传输零点条件} \quad Y_{ine} = Y_{ino} \quad (4)$$

$$\text{反射零点条件} \quad Y_{ine}Y_{ino} = Y_c^2 \quad (5)$$

式(4)和式(5)分别决定了该带通滤波器单元的谐波抑制特性和通带特性,下文将对其逐一进行细致讨论以便设计满足所需特性的窄带带通滤波器。

## 1.2 阻带特性的设计

将式(1)和式(2)代入式(4)可知本滤波器结构传输零点所需满足条件为

$$jY_{00} \cot \theta + jY_s \cot \theta_s = j \frac{(Y_{0e} + Y_r/2) \tan \theta}{1 - (Y_r/(2Y_{0e})) \tan^2 \theta} + jY_s \cot \theta_s. \quad (6)$$

在式(6)中,等式两边同时存在一个并联的短路短截线。此短路短截线除了在零频处提供一个传输零点外,在非零频处可以从等式中约去。亦即该滤波器在高频阻带的传输零点仅由平行耦合微带线及其连接的微带开路谐振器决定,不受短路短截线的影响。所以本滤波器单元的阻带特性和下文讨论的通带特性可以分别进行设计,这也是本滤波器结构具有的一个显著优点之一。

由上式易知,在阻带的中心频率处存在一个传输零点,此时的平行耦合微带线(及微带开路谐振器)的电角度 $\theta=90^\circ$ 。而满足条件式(4)的另外两个传输零点则通过求解上式得解,经过推导得到两个传输零点处的电角度的计算公式为

$$\theta = 90^\circ \pm \arctan((Y_r/(2Y_{0e})) - (Y_{0e} + Y_r/2)/Y_{00})^{1/2}. \quad (7)$$

由于这两个传输零点关于 $90^\circ$ 左右对称,为了使这3个传输零点的位置恰好都处于通带中心频率的高次谐波位置,可以选取3次谐波频率对应平行耦合微带线的电角度恰好为 $90^\circ$ ,则其二次谐波、四次谐波频率所对应的电角度为 $60^\circ$ 和 $120^\circ$ 。从而确定平行耦合微带线在通带中心工作频率时其电角度就是 $30^\circ$ ,对应的物理长度为 $\lambda_g/12$ ( $\lambda_g$ 为中心工作频率的导波波长),从此处可以看出该滤波器单元还具有小型化的优点。

如果把这种角度对应关系代入式(7),根据给定的耦合微带线奇模特性导纳和偶模特性导纳就可以计算出同时抑制信号的2~4次谐波所需的开路谐振器的特性导纳为

$$Y_r = 2(Y_{00} + Y_{0e}/3)/(Y_{0e}/Y_{00} - 1). \quad (8)$$

## 1.3 通带特性的设计

抑制高次谐波特性已经通过选取适当的耦合微带线和微带开路谐振器的特性导纳及电角度来实现,但其通带工作中心频率和通带带宽仍需通过调整短路短截线的参数来确定。根据式(5)所给出的反射零点条件,将式(1)和式(2)以及此时的电角度 $\theta=30^\circ$ 代入式(5),并以短路短截线的参量作为未知量求解,可以得到

$$Y_s \cot \theta_s = ((y_a - y_b)^2 - 4(Y_{0e}^2 - y_a y_b))^{1/2} - (y_a - y_b)/2, \quad (9)$$

其中  $y_a = Y_{00} \cot \theta = 3^{1/2} Y_{00}$ ,  $y_b = \frac{(Y_{0e} + Y_r/2) \tan \theta}{1 - (Y_r/(2Y_{0e})) \tan^2 \theta} = \frac{Y_{0e} + Y_r/2}{3^{1/2} (1 - Y_r/(6Y_{0e}))}$ 。

短路短截线的电路特性由两个参量来决定,即特性导纳和短截线电长度。由上式可以看到,为了在给定的中心频率处具有好通带匹配特性,短路短截线特性导纳和此时的短路短截线电长度必须满足式(9),也只需要满足此式即可。所以可以根据需要先确定一个参量,然后根据式(9)求取另一个参量的值,其结果如图3所示。从图3可看到,如果短路短截线在给定中心工作频率点的电角度越大(即其物理长度越长),则所需短截线的特性导纳也越大,亦即对应着较宽的微带宽度。

需要指出的是,虽然笔者所提出的设计方法和计算结果适用于抑制通带的2~4次谐波,但只要适当调整滤波器高频的3个传输零点所对应的电角度和相应的频率,也可以实现对其他频率高次谐波的抑制。

## 2 研制测试

笔者采用上述方法研制了一个中心频率为2.4 GHz的窄带带通滤波器。电路制作在厚度为0.813 mm,介电常数 $\epsilon_r=3.38$ 的RO4003介质基板上,并采用 CST

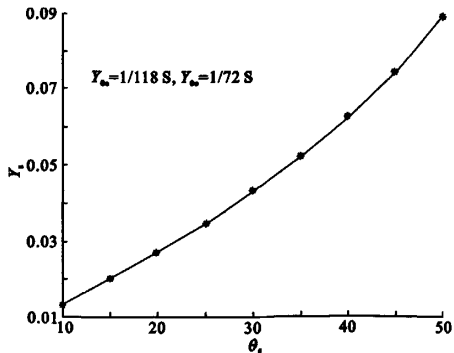


图3 短路短截线特性导纳 $Y_s$ 与工作中心频率点短路短截线的电角度 $\theta_s$ 关系曲线

Microwave Studio 5.0 对其进行了电磁场全波仿真验证. 选定的特性电参数如表 1 所示, 对应的耦合微带和开路谐振器长度则可以简单地由下式计算:

$$L = (\theta/360^\circ) \cdot \lambda_g \quad .$$

(10)

表 1 中心工作频率点的特性电参数

	耦合微带线	开路谐振器	短路短截线
特性阻抗/ $\Omega$	118(偶模), 71(奇模)	29.2	27.0
电角度/ $^\circ$	30	30	27

笔者设计的滤波器单元各部分的物理尺寸为:  $a=5.0\text{ mm}$ ,  $b=6.0\text{ mm}$ ,  $w_c=0.5\text{ mm}$ ,  $w_l=4.0\text{ mm}$ ,  $l_c=5.9\text{ mm}$ ,  $l_s=5.6\text{ mm}$ ,  $g=0.5\text{ mm}$ . 由于微带开路边缘效应和接地过孔的影响, 并经过电磁场仿真的校正, 实际微带开路谐振器的长度减少到  $4.3\text{ mm}$ . 而短路短截线的长度则有所增长, 达到  $6.1\text{ mm}$ . 两端连接的  $50\text{ }\Omega$  微带线的宽度可以取为  $1.8\text{ mm}$ . 实际加工得到的滤波器如图 4 所示.

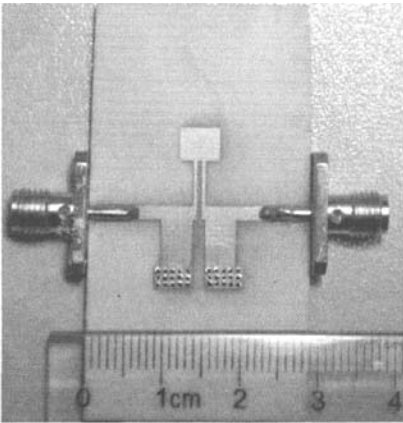


图 4 带通滤波器实物图

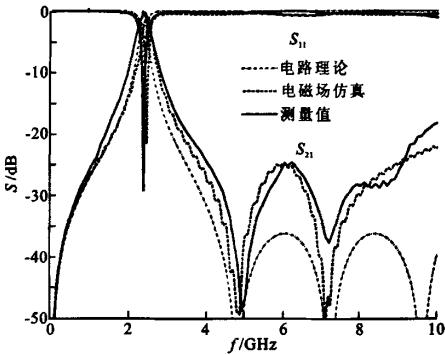


图 5 带通滤波器的仿真结果与实测结果

图 5 将实测数据与电路理论及电磁场全波仿真结果进行对比. 可以看到, 三者在相当宽的频率范围内保持了较好的一致. 滤波器的实测中心频率为  $2.39\text{ GHz}$ , 最小插损为  $0.4\text{ dB}$ ,  $3\text{ dB}$  带宽为  $300\text{ MHz}$ ; 在二次、三次谐波频率上具有超过  $35\text{ dB}$  的衰减, 而四次谐波的衰减极点虽然受开路谐振器辐射和介质损耗的影响变得不是非常明显, 但其衰减幅度也超过  $20\text{ dB}$ , 达到一般应用的要求.

3 总 结

笔者设计了一种新的小型化窄带带通滤波器, 仿真和测试结果表明该滤波器能够同时抑制多个高次谐波. 此外该滤波器还具有尺寸小、结构简单和设计方便等优点, 可以广泛应用于放大器、振荡器和混频器等微波电路中.

参考文献:

[1] Yang F R, Ma K P, Qian Y, et al. A Uniplanar Compact Photonic-bandgap (UC-PBG) Structure and Its Applications for Microwave Circuits [J]. IEEE Trans on Microw Theory Tech, 1999, 47(8): 1509-1514.

[2] 杨瑾屏, 吴文. SP-DGS 等效电路模型及其在微波电路中的应用[J]. 西安电子科技大学学报, 2007, 34(6): 1007-1010. Yang Jinping, Wu Wen. Research on the Equivalent Circuit Model of the Spiral Defected Ground Structure and Its Applications to Microwave Circuits[J]. Journal of Xidian University, 2007, 34(6): 1007-1010.

[3] Cheong P, Fok S W, Tam K W. Miniaturized Parallel Coupled-Line Bandpass Filter with Spurious-response Suppression [J]. IEEE Trans on Microw Theory Tech, 2005, 53(5): 1810-1816.

- [4] Tu W H, Chang K. Compact Second Harmonic-suppressed Bandstop and Bandpass Filters Using Open Stubs [J]. IEEE Trans on Microw Theory Tech, 2006, 54(6): 2497-2502.
- [5] Kuo J T, Shih E. Microstrip Stepped Impedance Resonator Band-pass Filter with an Extended Optimal Rejection Bandwidth [J]. IEEE Trans on Microw Theory Tech, 2003, 51(5): 1554-1559.
- [6] Garde M J, Sorolla M, Guglielmi M. New Microstrip 'Wiggly-line' Filters with Spurious Passband Suppression [J]. IEEE Trans on Microw Theory Tech, 2001, 49(9): 1593-1598.
- [7] Hsieh M Y, Wang S M. Compact and Wideband Microstrip Bandstop Filter [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(7): 472-474.
- [8] Li R, Kim D I, Choi C M. Compact Structure with Three Attenuation Poles for Improving Stopband Characteristics [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006, 16(12): 663-665.
- [9] Lee H S, Choi K, Hwang H Y. A Harmonic and Size Reduced Ring Hybrid Using Coupled Lines [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(4): 259-261.
- [10] Zhang J, Li L Y, Gu J Z, et al. Compact and Harmonic Suppression Wilkinson Power Divider with Short Circuit Anti-coupled line [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(9): 661-663.

(编辑: 郭 华)

~~~~~  
(上接第 567 页)

图 2 给出了 2 种新型准正交码采用不同译码方式时的性能仿真. 由图 2 可以看到, QR 分解算法性能较 ML 算法性能稍差, 当 BER 等于  $10^{-3}$  时要大约差 1 dB, 主要是由于 QR 分解算法中没有针对干扰的消除过程. 但是 QR 译码算法译码复杂度降低, 是一种次优译码方案.

## 6 结 束 语

提出了两种新的 4 天线准正交空时分组码编码方案, 舍弃了 Alamouti 形式的编码单元, 采用了新的编码方法, 并且采用 2 个编码单元, 增加了 4 天线准正交空时分组码的可用码字. 比较了最大似然译码与 QR 分解算法, 实验仿真结果证明文中方案与已有典型的准正交空时分组码相比, 具有较好的误码性能; QR 分解算法对新的准正交分组码具有较好的检测性能, 译码复杂度大大降低.

### 参考文献:

- [1] Alamouti S M. A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications [J]. IEEE JSAC, 1998, 16(8): 1451-1458.
- [2] Jafarkhani H. A Quasi-orthogonal Space Time Block Codes [J]. IEEE Trans on Common, 2001(49): 1-4.
- [3] Tirkkonen O, Boariu A, Hottinen A. Minimal Nonorthogonality Rate One Space Time Block Codes for  $3+T_x$  Antennas [C]//Proc IEEE Int Symp on Spread Spectrum Techniques and Applications, ISSSTA 2000. Newark: ISSSTA, 2000: 429-432.
- [4] Sezgin A, Jorswieck E A. Tight Upper Bound on the Outage Probability of QSTBC [J]. Communications Letters, IEEE, 2006, 10(11): 784-786.
- [5] Zhang Xianda. Matrix Analysis and Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 229-243.
- [6] 张朝柱. 选择性衰落信道下的空时分组码研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006: 67-68.  
Zhang Chaozhu. Research on Space-time Block Codes under Selective Fading Channels [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006: 67-68.
- [7] Tarkh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time Block Codes from Orthogonal Designs [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1999, 45(5): 1456-1467.

(编辑: 齐淑娟)

## 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, 致力和专注于微波、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/>