

# 发夹型滤波器的设计

郑迎宾 孙兴超 崔英善

(贵州大学电子科学与信息技术学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:**根据微波电路设计的基本理论,详细地论述了微带发夹型滤波器的设计过程,及设计中各项参数的确定。并设计了一个抽头线发夹型带通滤波器,其中心频率为1.75GHz,带宽为100MHz,完成了滤波器各参数值初值的确定,并结合ADS的优化仿真功能,得出了满足设计目标的版图仿真结果,论证了设计理论的正确性,证明了此方法适合于工程应用。

**关键词:**微带线;发夹型滤波器;耦合系数;抽头线

**中图分类号:**TN713.5 **文献标识码:**A

## 0 引言

在过去的十年中,由于无线个人通信及其他可移动接收机和发射机应用的迅猛增长为低损耗、小尺寸、重量轻且价格低廉的滤波器形成了一个重要的市场,这为微波滤波器<sup>[1]</sup>的发展创造了很好的契机。微波滤波器作为系统中广泛使用的无源器件之一,它的性能好坏将直接影响到整个系统的优劣,而微带滤波器则因其重量轻、成本低、易加工更被看重。微带滤波器常采用的形式有发夹型、平行耦合线、梳状线、交指型和微带类椭圆函数滤波器等。但是不同形式的滤波器往往存在着各自的缺陷。例如平行耦合线滤波器<sup>[2,3]</sup>由于各平行耦合节在一个方向上级联,故尺寸较大;梳状线滤波器和交指滤波器则需要过孔接地,这样在高频情况下就会不可避免的引入误差;椭圆函数滤波器的设计过程比较复杂,较难实现;而发夹型滤波器通过适当的耦合拓扑结构实现的滤波器,一方面,它是半波长耦合微带线滤波器的一种改良结构,结构比较紧凑,易于集成、尺寸较小;另一方面,其耦合线终端开路,无需过孔接地,这消除了过地孔引入的误差。因此,它具有更好的电性能,因而在微波平面电路的设计中有着良好的应用前景。

本文所研究的就是微带发夹型滤波器,根据微带滤波器设计的基本原理,并利用ADS在微带滤波器设计中的优化仿真功能,通过设计一个通带为1.70~1.80G的带通滤波器,详细论述了微带发夹型滤波器的通用设计方法。

## 1 发夹滤波器的综合设计

### 1.1 谐振单元的奇偶模阻抗

发夹型滤波器以开路式对称耦合微带单元级联而成,如图1(a)所示,其A矩阵<sup>[4]</sup>为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{Z_{oe} + Z_{oo}}{Z_{oe} - Z_{oo}} \cos \theta_c & j \frac{(Z_{oe} - Z_{oo})^2 - (Z_{oe} + Z_{oo})^2 \cos \theta_c}{2(Z_{oe} - Z_{oo}) \sin \theta_c} \\ j \frac{2 \sin \theta_c}{Z_{oe} - Z_{oo}} & \frac{Z_{oe} + Z_{oo}}{Z_{oe} - Z_{oo}} \cos \theta_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

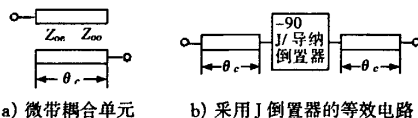


图1 微带耦合单元及其等效电路

其等效电路图1(b)的A矩阵为<sup>[5]</sup>:

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \frac{j \sin \theta_c}{Y_0} \\ j Y_0 \sin \theta_c & \cos \theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{j}{j} \\ -jI & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \frac{j \sin \theta_c}{Y_0} \\ j Y_0 \sin \theta_c & \cos \theta_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

由  $A_1 = A_2, \theta_c = \pi/2$  可得出:

$$\begin{cases} Z_{oe} = (1/Y_0)[1 + J/Y_0 + (J/Y_0)^2] \\ Z_{oo} = (1/Y_0)[1 - J/Y_0 + (J/Y_0)^2] \end{cases} \quad (3)$$

式中,耦合谐振器带通滤波器的导纳倒置器的导纳  $J^{[6]}$  为:

$$\begin{cases} \frac{J_{01}}{Y_0} = \sqrt{\frac{\pi FBW}{2g_0g_1}} \\ \frac{J_{i,i+1}}{Y_0} = \frac{\pi FBW}{2\sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad (i=1,2,\dots,n-1) \\ \frac{J_{n,n+1}}{Y_0} = \sqrt{\frac{\pi FBW}{2g_n g_{n+1}}} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $g_i$  为低通原型滤波器元件值,FBW 为滤波器相对带宽<sup>[7]</sup>。

### 1.2 谐振器的耦合系数

耦合系数的计算精确与否直接关系到滤波器设计是否成功。因此,设计滤波器时,必须完成耦合系数的计算。两个发夹型谐振器之间的耦合根据谐振器放置的相对位置可分为电耦合、磁耦合和混合耦合三种情况,如图2所示。谐振器的间距  $s$  和相对位置偏移  $d$  决定了耦合系数的大小。

谐振器之间的耦合系数  $K$  可按下列式(5)进行计算:

$$K = \frac{f_{p2}^2 - f_{p1}^2}{f_{p2}^2 + f_{p1}^2} \quad (5)$$

$f_{p1}$  和  $f_{p2}$  是当两个谐振器间的中心面分别被定义为电壁和磁壁时的谐振频率<sup>[8]</sup>。

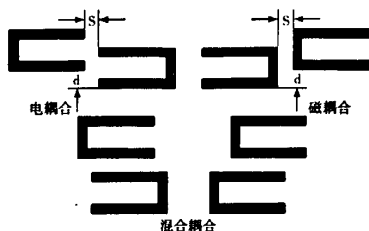


图2 谐振器之间的三种耦合方式

实际应用中,对于级联型滤波器,计算相邻谐振器间耦合系数一般使用下面的通用计算公式:

$$K_{i,i+1} = \frac{W}{f_0 \sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (6)$$

### 1.3 抽头位置的确定

抽头线发夹谐振器如图3(a)所示,当忽略发夹型谐振器两臂间自耦合的影响,可以得到其等效电路如图3(b)所示<sup>[9]</sup>。

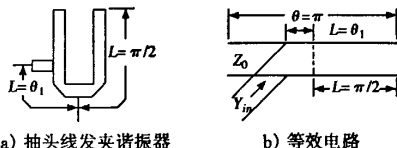


图3 抽头线发夹滤波器谐振单元及其等效电路

抽头位置  $l$  可由式(7)结合发夹谐振器的外部耦合系数式(8)来确定。

$$l = \frac{2L}{\pi} \arcsin \sqrt{\frac{\pi R}{2Z_0 K_e}} \quad (7)$$

$$K_{em} = \frac{g_n g_{n+1}}{FBW} \quad (8)$$

上两式中,  $l$  是指抽头线到谐振器中间位置的距离,  $L = \lambda_g/4$ ,  $R$  是抽头线的特性阻抗,  $Z_0$  是发夹线的特性阻抗,  $K_e$  是发夹谐振器的外部耦合系数。

## 2 设计实例

设计一个5节发夹型带通滤波器,设计目标:中心频率  $f_0 = 1.75\text{GHz}$  带宽为  $100\text{MHz}$ ;带内差损:  $> -2\text{dB}$ ;带内纹波:  $< 0.1\text{dB}$ ;带外抑制:  $1.60\text{GHz}$  和  $1.90\text{GHz}$  时衰减  $< -40\text{dB}$ 。选用 FR4 双面敷铜板作为基板,厚度  $h = 0.8\text{mm}$ ,介电常数为  $4.8$ ,损耗正切  $\tan\delta = 1e-4$ ,敷铜厚度  $M = 0.035\text{mm}$ 。

查表得波纹为  $0.1\text{dB}$  的5阶 Chebyshev 低通原型滤波器满足上述指标,其元件值为:  $g_0 = g_6 = 1, g_1 = g_5 = 0.7563, g_2 = g_4 = 1.3049, g_3 = 1.5773$ 。根据以上参数,由(3)式和(4)式可得滤波器的奇、偶模阻抗,可由 ADS 中的 linecalc 计算出  $w, s, L$  的初值,见表1。

表1 滤波器的参数初值

$i$	偶模阻抗 $Z_{oe}$	奇模阻抗 $Z_{oo}$	线宽 $W(\text{mm})$	间距 $S(\text{mm})$	线长 $L(\text{mm})$
1	54.91	45.91	1.35	1.22	22.81
2	53.29	47.09	1.36	1.67	22.79

由(7)式与(8)式可估算抽头位置:  $l = 0.223L$ , 这里取

$l = 5.1\text{mm}$ 。

根据以上参数进行 Momentum 设计与仿真。在仿真模型中用了3个优化目标:1) 通带差损:  $S(2,1) > -2\text{dB}$ ;2) 通带回波损耗:  $S(1,1) < -20\text{dB}$ ;3) 阻带 ( $< 1.60\text{GHz}$  且  $> 1.90\text{GHz}$ ) 时,  $S(2,1) < -40\text{dB}$ 。经过数次优化后,得到微带发夹型滤波器版图仿真结果如图4所示。

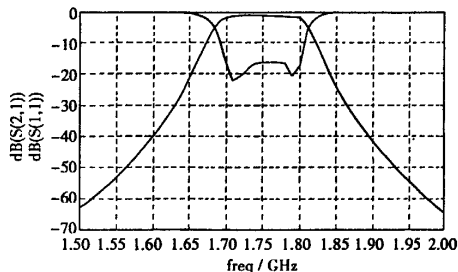


图4 优化后的插入损耗 S21 和回波损耗 S11

## 3 实验分析

ADS Momentum 仿真是采用矩量法直接对电磁场进行计算,其结果比在原理图中仿真要准确,对设计也更有意义,但是它的计算比较复杂,需要较长的时间;另外,还要考虑到受加工工艺的限制,在工程上一般要求线宽  $s$  和缝隙  $w$  要大于  $0.2\text{mm}$ 。优化时根据情况可对优化目标、优化变量的取值范围、优化方法及次数进行适当的调整。从仿真结果图可以看出,理论计算与实际设计有一定的差值,差损  $s(2,1) < -16\text{dB}$ ,一般工程上要求  $s(2,1) < -13\text{dB}$ 。所以本设计达到了工程应用的要求。

## 4 结束语

微带发夹型滤波器具有尺寸小、易集成、成本低、设计较为简单等优点,在微带平面电路的设计中被一致看好,具有很好的实际应用价值。利用 ADS 设计方法摆脱了盲目性的人工调试,大大缩短了研制周期、减少了设计成本,并比较容易达到指标要求。

### 参考文献

- [1] Ralph Levy, Richard V. Snyder and George Matthaei. Design of Microwave Filters[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2002, 50(3): 783-793.
- [2] Easter B, Merza K A. Parallel-coupled-line Filters for Inverted-microstrip and Suspended-substrate MIC's[J]. In 11th Eur Microwave Conf Dig, September, 1981: 164-167.
- [3] Riddle A. High Performance Parallel Coupled Microstrip Filters[J]. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp Dig, 1988: 427-430.
- [4] 清华大学《微带电路》编写组. 微带电路[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1979.
- [5] Ludwig, Bretchko P. 射频电路设计——理论与应用[M]. 王子宇, 张肇仪, 徐承和, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 169-176. (下转第53页)

出 LS-DRMTCM 算法的基础上提出了 DR-LMS 算法,本文在这一思路的引导下对 DR-LMS 算法作了进一步改进,引入了变步长算法。通过仿真比较,在跟踪性能上和文献[2]中所提到的算法相当,但在收敛性能上却有明显的提高。

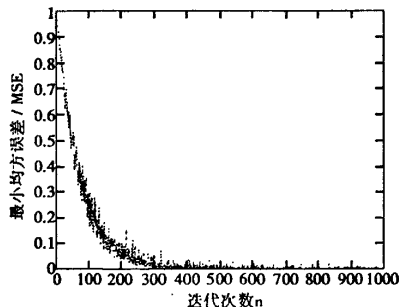


图2 新算法的收敛曲线

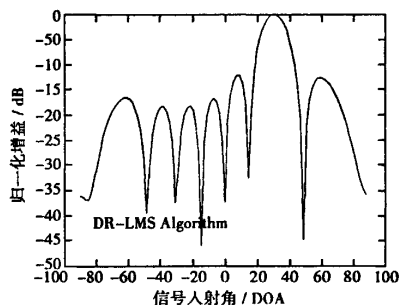


图3 DR-LMS算法的波束方向图

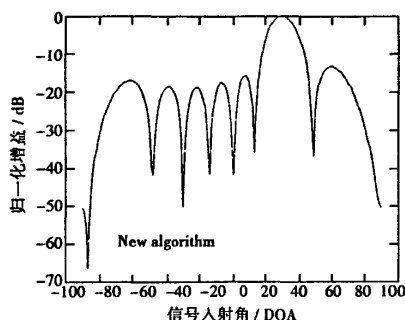


图4 新算法的波束方向图

参考文献

- [1] Rong Z. Simulation of Multitarget Adaptive array Algorithm for Wireless CDMA Systems[J]. IEEE, 1997.
- [2] 桑怀胜,李峥嵘.利用PN码的盲自适应波束形成算法[J].通信学报,2002,23(11).
- [3] 倪锦根,李锋.一种新的变步长最小均方自适应算法[J].信息与电子工程,2008(2).
- [4] 李存武.关于几种变步长LMS算法的讨论[J].舰船电子工程,2008(5).
- [5] 樊珠昱.一种改进的变步长频域批处理LMS自适应算法[J].现代电子技术,2007(1).
- [6] Haykin S. Adaptive Filter Theory[M]. Fourth Edition. New York: Pearson Education, 2002.

## A New Variable Step-Size Algorithm for Beamforming

Xu Li-de Wang Hua-kui Liu Zhu

(Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China)

**Abstract:** The main context of this paper is beamforming algorithm on smart antenna technique of DS-CDMA system. The LS-DRMTCM algorithm and DR-LMS algorithm are first introduced, then a variable step-size PN code filter adaptive beamforming algorithm is presented. Simulation results show that the track performance of new algorithm with small computing complexity is similar to the former algorithms, and its convergence has a great improvement.

**Key words:** beamforming; LS-DRMTCMA; DR-LMS algorithm; variable step-size

(上接第50页)

- [6] 甘本祺,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.
- [7] Yingjie Di, Peter Gardner, Peter S, et al. Multiple-coupled Microstrip Hairpin Resonator Filter[J]. IEEE Microwave and Wireless Components, 2003, 13(12): 32-534.
- [8] Jia-Sheng Hong, Michael J Lancaster. Coupled Lings of Microstrip Square Open-loop Resonators for Cross-coupled Planar Microwave Filters[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1996, 44(12): 2099-2109.
- [9] Wong J S. Microstrip Tapped-line Filter Design[J]. IEEE Trans, Microwave Theory Tech, 1979: 44-50.

## Design of Hairpin Filter

Zheng Ying-bin Sun Xing-chao Cui Ying-shan

(College of Electronic Science & Information Technology, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025, China)

**Abstract:** According to the basic theory of microwave circuit design, the design process of microstrip hairpin-filter is presented in details. Then a tapped-line hairpin-filter with the center frequency of 1.75 GHz and the bandwidth of 100 MHz is made, and the determination of each parameter's initial value of the filter is completed, also the ADS is used for simulation and optimization. EM simulation result of meeting design objective proves that the design theory is correct and that the design method is adaptable to engineering applications.

**Key words:** microstrip; hairpin-filter; coupling coefficient; tapped-line

## 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/>