

# 基于 FDTD 算法的环状蝶式双模滤波器

王 凯, 李 楠, 杨明武

(合肥工业大学 理学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章采用时域有限差分法(FDTD),对工作于 2.4 GHz 的环状蝶式双模滤波器进行了模拟分析和优化设计;通过不断改变微扰金属贴片的尺寸优化得到环状蝶式双模滤波器的中心频率为 2.4 GHz,插入损耗和回波损耗能很好地满足无线局域网系统的应用要求,同时环状蝶式双模滤波器的几何尺寸比传统的由其他谐振器构成的微带滤波器的几何尺寸减小了 40%以上;为了进一步的优化,采用四极微带双模谐振器来设计滤波器,滤波器由通带向到阻带的过渡十分陡峭,具有更加优异的选频特性。

**关键词:**时域有限差分算法; 无线局域网; 环状蝶式双模滤波器

中图分类号:O451 文献标识码:A 文章编号:1003-5060(2007)07-0908-04

## Analysis and design of a butterfly-loop DM-ICPF using the FDTD

WANG Kai, LI Nan, YANG Ming-wu

(School of Sciences, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** A butterfly-loop dual-mode integrated-circuit package filter(DM-ICPF) has been analyzed and optimized by applying the FDTD method. This filter is designed in a way that they operate in dual-modes(DM) of  $TM_{100}^z$  and  $TM_{010}^z$  to ensure good electric performance at the center frequency. By uninterrupted changing and optimizing the dimension of small infinitesimal disturbance metal strip, it is found out that the center frequency of the butterfly-loop DM-ICPF is 2.4 GHz. The return losses and insertion losses can fulfill the requirement of wireless local area networks. The approximate minification of the butterfly-loop DM-ICPF geometric size is above 40% in comparison with the geometric size of conventional microstrip filters which are constituted by other resonators. For enhancement of the electric performance around the resonant frequency at 2.4 GHz, a microstrip band-pass filter using four-pole dual-mode meander loop resonators is also presented, and its FDTD simulation result shows that the filter has a better frequency response.

**Key words:** finite-difference time-domain (FDTD); wireless local area network; butterfly-loop DM-ICPF

## 0 引言

滤波器在射频、微波电路应用中起着十分重要的作用。由于电磁波频谱是有限的资源,被严格地按照应用加以分配,滤波器可以用来限定大功率发射机在规定频带内辐射,反过来又可用来防止接收机受到工作频带以外的干扰。

近年来,随着无线通讯行业的发展,对滤波器的设计提出了新的挑战,需要开发出性能高、尺寸小、重量轻及成本低的滤波器<sup>[1,2]</sup>。微带带通滤波器在电子系统尤其是通信领域被广泛使用。随着微波技术的发展,微带滤波器的种类日益增多。它们性能各异,设计方法也有所不同。但总体上来看,除了少数特殊带通滤波器的设计以外,带通

收稿日期:2006-06-22;修改日期:2006-09-08

基金项目:教育部科学技术研究重点资助项目(03100);安徽省自然科学基金资助项目(050420202)

作者简介:王 凯(1982—),男,安徽怀远人,合肥工业大学硕士生;

杨明武(1958—),男,安徽滁州人,合肥工业大学教授,硕士生导师。

滤波器的设计大多数是从集总参数低通原型出发的<sup>[1]</sup>。随着射频电路集成化的提高,电路的尺寸越来越小,这就对其电路中无源元件的尺寸提出了更高的要求。并且随着材料科学和制造技术的不断进步,例如微波单片集成电路 MMIC(Monolithic microwave integrated circuit)和微机械系统 MEMS(Microelectronic mechanic system)的发明,促进了新型的微带滤波器和其他各类滤波器的发展<sup>[2]</sup>。双模谐振器是微波带通滤波器小型化最有效的手段之一,包括波导双模谐振器和微带双模谐振器,对双模谐振器中的2个正交简并模式进行微扰,从而使他们的谐振频率发生分裂,相互之间产生耦合,可以产生滤波器的特性,这相当于在保持谐振回路不变的情况下,使谐振器的个数减少了一半<sup>[3,4]</sup>。环状蝶式双模滤波器就是采用双模谐振器来设计的一种微波带通滤波器,它的性能要优于采用从集总参数低通原型出发设计的滤波器,由于采用环状结构其尺寸更加的小,具有更好的应用前景。

## 1 FDTD 算法

FDTD(Finite Difference Time Domain)方法

$$E_x^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)=\frac{1-\frac{\sigma\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) \Delta t}{2 \varepsilon\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)}}{1+\frac{\sigma\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) \Delta t}{2 \varepsilon\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)}} \times E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)+\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)}}{1+\frac{\sigma\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) \Delta t}{2 \varepsilon\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)}} \times \begin{aligned} &\left[\frac{H_z^{n+1 / 2}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right)-H_z^{n+1 / 2}\left(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k\right)}{\Delta y}-\frac{H_y^{n+1 / 2}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right)-H_y^{n+1 / 2}\left(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2}\right)}{\Delta z}\right] \end{aligned}$$
(1)

从 Yee 网格及其场分量的迭代公式可以看出,任何一个网格上电场的分量只与上一个时间步电场分量的值和四周环绕它的磁场分量有关,因此在任一  $n$  时间步的场分量计算,可以采用一次一步的迭代方式来求解,利用计算出的电场和磁场可以进一步求得空间中任意地方的电流和电压,从而可以算出需要的散射参数。

## 2 滤波器的研究与优化设计

环状蝶式双模滤波器的几何结构如图 2 所示,其 FDTD 建模的 3 维网格图如图 3 所示。

这种双模滤波器包含了 2 个主要的部分:  
①由弯曲的金属微带线构成的环状蝶式结构;  
②由金属微带线所构成的 2 个“十”字形结构,用

属于电磁场全波数值分析法,1966 年由 Yee 提出,它以差分原理为基础,从麦克斯韦方程式中 2 个微分形式的旋度方程式出发,采用中心差分将微分形式的麦克斯韦方程用差分方式来表示。首先对计算空间进行网格划分,将计算空间中电场和磁场离散化,每个网格中电场和磁场的空间分布采用 Yee 元胞形式,如图 1 所示。

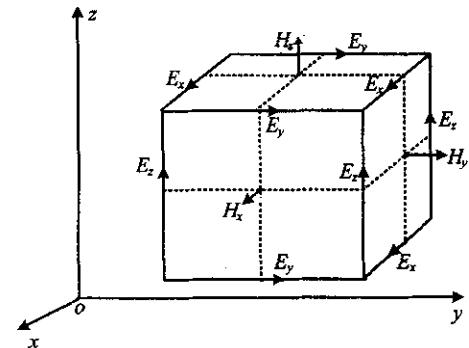


图 1 Yee 元胞

将麦克斯韦旋度方程中的微分用差分替代,得到麦克斯韦方程的差分形式,进而对每个场分量导出迭代公式<sup>[5,6]</sup>,即

来实现耦合的输入和输出。输入和输出端口定义在如图相互垂直的方向上。通过在弯曲环形的右上角上增加一个矩形块来实现对谐振器 2 个模的微扰<sup>[7]</sup>。在滤波器的设计过程中,选用相对介电常数  $\epsilon_r = 9.7$ ,  $\sigma_e = 2.085 \times 10^{-3}$  S/m 有耗的氧化铝陶瓷作为衬底材料。所有金属带都用无限薄的理想导体来代替。各方向采用均匀网格来实现对模型的划分。具体模型划分如下:

计算空间:  $x = 150\Delta x$ ,  $y = 150\Delta y$ ,  
 $z = 20\Delta z$ ;

网格大小:  $\Delta x = 0.1$  mm,  $\Delta y = 0.1$  mm,  
 $\Delta z = 0.127$  mm。

在模拟过程中,  $z$  方向上分别取 40、30、20 个网格,发现对模拟结果基本没有影响,为了节约运

算时间在  $z$  方向取 20 个网格。在模拟中采用中心频率为 2.4 GHz, 半功率带宽为 1 GHz 的高斯调制脉冲作为激励源, 用完全匹配层 (PML) 吸收边界条件作为计算空间的截断边界, 网格大小的设置满足  $\Delta \leq \lambda/12$ , 运行足够的时间步使得信号衰减到 0。在模拟过程中采用“两步法”。首先, 测得滤波器端口 1 和 2 的电流信号, 如图 4 所示; 然后, 将端口 1 所在的金属微带传输线延长至计算边界, 撤去滤波器, 网格划分不变, 测得入射激励信号。利用两步法求得滤波器频域的散射参数。

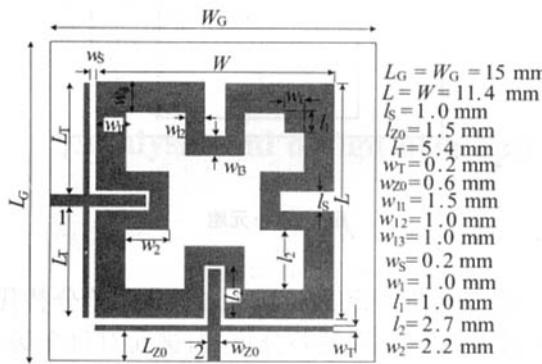


图 2 环状蝶式双模滤波器

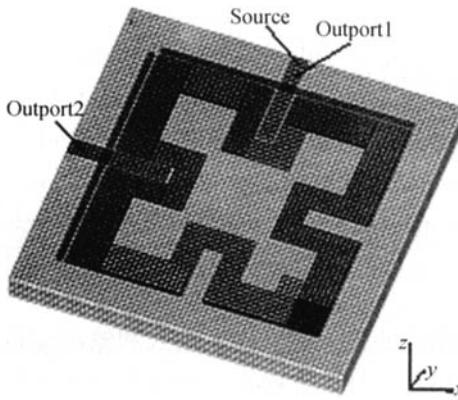


图 3 环状蝶式双模滤波器 FDTD 建模三维网格图

在实际的模拟过程中,用 FDTD 算法完整地模拟了 200 000 个时间步共耗时约 30 h,为了提高效率,采用 FDTD 算法和 GPOF 算法<sup>[8,9]</sup>相结合来提高分析和设计的效率。

只用 FDTD 算法模拟 30 000 步, 在 FDTD 输出的电压信号中, 从第 25 000 开始, 每隔 20 个时间步抽样一次, 抽取 200 个抽样点, 选择了 14 个复指数函数对信号进行拟合和外推, 得到所需的后继 200 000 时间步电流信号, 与完整的 FDTD 模拟信号比较精度能达到 0.352 8%。此后采用

FDTD 结合 GPOF 的方法, 模拟计算量减少为原来的  $1/7$ , 极大地提高了分析和优化设计的效率。最终的优化结果采用全 FDTD 模拟的方法, 保证结果的可靠性。

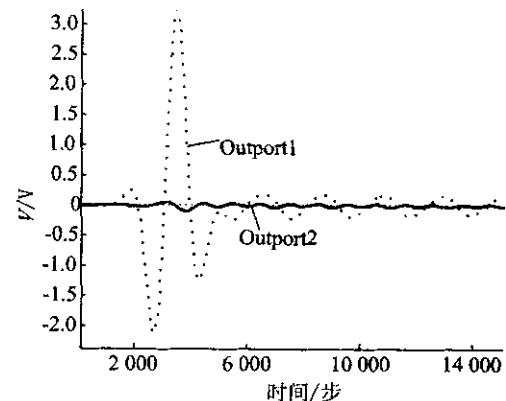


图 4 滤波器端口 1 和 2 得到的电流信号

在反复的模拟仿真过程中,增加金属微带线宽度  $w_{l1}$ 、 $w_{l2}$ 、 $w_{l3}$  中的任意一个,发现滤波器的谐振频率会增加;U形槽的宽度  $l_s$  增加会引起谐振频率的减小;发现引起微扰的金属贴片的尺寸  $w_1$ 、 $l_1$  控制着微扰的强度,从而引起谐振频率的分裂。图 5 表明了不同  $w_1$  情况下滤波器的谐振频率分裂的情况,可以看出,随着  $w_1$  的增加,谐振频率的分离也在增加,当  $w_1 = 1.0 \text{ mm}$  时滤波器的性能最好。

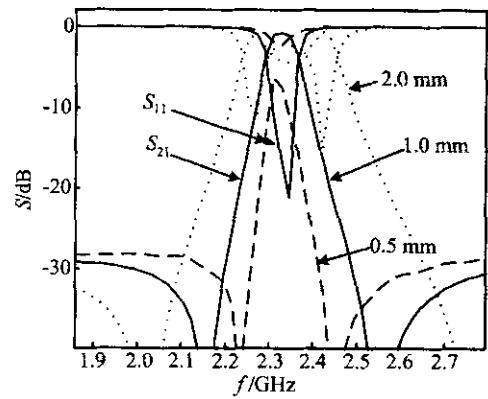


图 5 滤波器的散射参数

优化后的滤波器的几何结构如图 6 所示。

为了进一步提高滤波器的选频特性,采用了四极双模谐振器来设计双模滤波器,利用 FDTD 算法对其进行模拟和仿真,得到了曲线过渡十分陡峭的微带滤波器,如图 7 所示。

可以看出,由<sub>2</sub>极微带双模谐振器所构成的双模滤波器比环状蝶式双模滤波器具有更好的选频特性,其曲线的过渡十分陡峭。

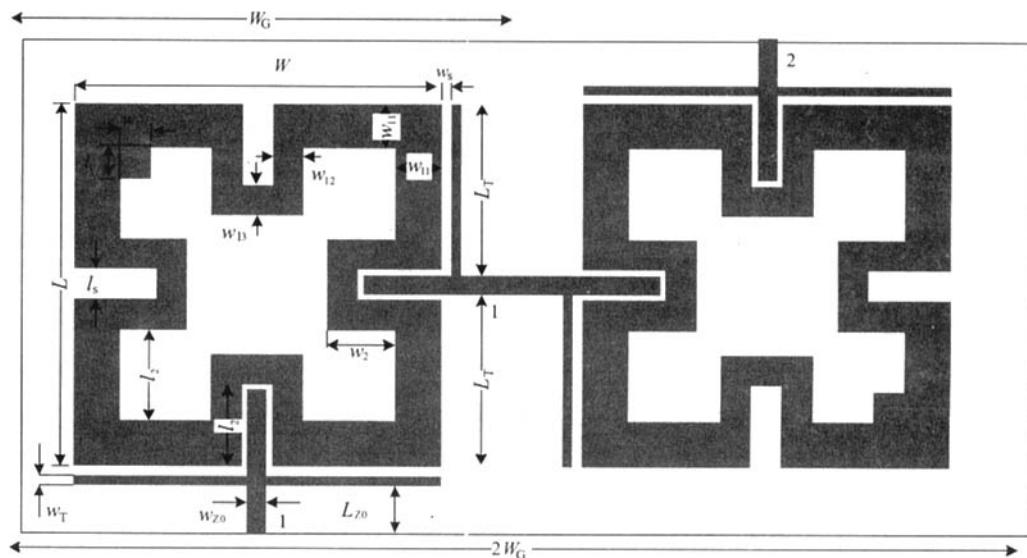
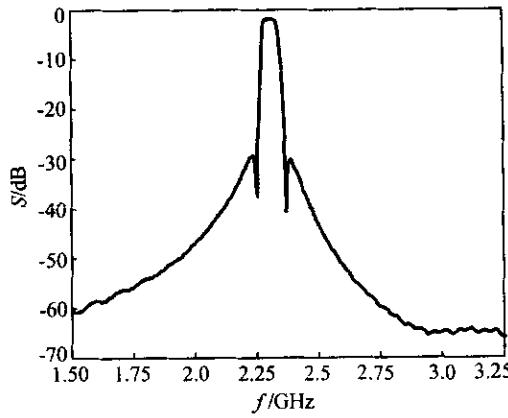


图6 由四极微带双模谐振器所构成的双模滤波器模型图

图7 滤波器的  $S_{21}$  参数

### 3 结束语

本文运用 FDTD 结合 GPOF 的方法对环状蝶式双模滤波器进行了分析和优化,通过 FDTD 模拟,求得了滤波器频域上的散射参数,在模拟过程中,通过不断改变引起微扰的金属贴片尺寸,发现  $w_1 = 1.0 \text{ mm}$  时滤波器的性能最好。并在此基础上为进一步提高滤波器的选频特性,采用了 2 极双模谐振器来设计双模滤波器,经过模拟仿真结果显示其曲线的过渡十分陡峭,比环状蝶式双模滤波器具有更好的选频特性,并且尺寸小、重量轻、成本低,可用于无线局域网的通讯系统中。

### 参 考 文 献

- [1] Hong Jiasheng, Lancaster M J. Microstrip filters for RF-mi-

crowave applications [M]. John Wiley & Sons, Inc, 2001: 109—151.

- [2] 甘本祓,吴万春.现代微波滤波器的结构与设计[M].北京:科学出版社,1973:10—50.
- [3] Hong J S, Lancaster M J. Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a novel meander loop resonator[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1995, 5(11): 371—372.
- [4] Cuits J A, Fiedziuszko S J. Miniature dual mode microstrip filters[J]. IEEE MTT-S. Microwave Symposium, 1991, (2): 443—446.
- [5] 葛德彪,闫玉波.电磁波时域有限差分方法[M].西安:西安电子科技大学出版社,2002:125—127.
- [6] 王长清,祝西里.电磁场计算中的时域有限差分法[M].北京:北京大学出版社,1994:157—166.
- [7] Tong M S, Zhang Y P, Lu Yilong, et al. Design and analysis of on-package dual-mode band pass filters for highly integrated wireless transceivers [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2006, 48(4): 756—760.
- [8] Sarkar T K, Pereira O. Using the matrix pencil method to estimate the parameters of a sum of complex exponentials [J]. IEEE Antennas Propagat Mag, 1995, 37(1): 48—55.
- [9] Hua Y, Sarkar T K. Generalized pencil-of-function method for extracting poles of an EM system from its transient response[J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 1989, 37(2): 229 — 234.

(责任编辑 张 锴)

## 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，致力于专注于微波、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/>