

基于全波分析的 L 波段微带滤波器设计*

申 凯¹, 郑武团¹, 谷国栋¹, 丁炳汉²

(1. 空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 94259 部队, 山东 蓬莱 265600)

【摘要】运用全波分析的时域有限差分法, 分析了单个谐振器与外部电路发生耦合时外部电路的品质因数以及谐振器对级间耦合系数与电路结构参数的关系, 并据此设计出了中心频率为 902.5 MHz 的带通滤波器, 在不进行优化的情况下, 仿真得到的滤波器指标已十分接近设计值。

【关键词】全波分析; 时域有限差分法; 微带谐振器; 傅里叶变换

中图分类号: TN713 文献标识码: A

Accurate Design of a L-band Microstrip Filter Based on Full-wave Analysis

SHEN Kai¹, ZHENG Wu-tuan¹, GU Guo-dong¹, DING Bin-han²

(1. Missile Institute, AFEU, Sanyuan 713800, China; 2. Army 94259 of PLA, Penglai 265600, China)

【Abstract】A microstrip resonator is analyzed by finite-difference time-domain method. Formulas of external circuit quality factors of the input and output resonators and coupling coefficients of intercoupled resonators against the physical dimensions were derived. With them, a four-pole microstrip band-pass filter centered at 902.5 MHz was designed. Even if it was not optimized, the simulation result of frequency response accorded well with design requirement.

【Key words】full-wave analysis; FDTD; microstrip resonator; Fourier transform

0 引言

微带谐振器的分析方法很多, 近似计算方法主要有磁壁法, 而严格计算须借助各种经典方法或数值分析来解边值问题。磁壁法的基本原理是假设微带贴片四周各边为磁壁, 上下导体片为电壁, 电磁场在这些磁壁和电壁所限定的空间里振荡。严格的全波分析法又分时域法和频域法。通过求解满足边界条件的位函数的赫姆霍兹方程, 导出一组耦合的位函数积分方程, 解这些方程得到场分布。但由于这些方程中的卷积含有收敛很慢的格林函数, 数值计算比较困难, 因此常不去求解空间域的积分方程, 而是用 Fourier 变换把它们变换到谱域中, 再求解频域中的积分方程获得场分布, 故称频域法。本文采用时域的时域有限差分(FDTD)法进行谐振器的分析。

1 时域有限差分方法

1966 年 K. S. Yee 首次提出以 Yee 氏网格的空间离散方式, 将 Maxwell 方程转化为差分格式, 并成功模拟了电磁脉冲与理想导体作用的时域响应, 这种新的

电磁场的数值方法被称为时域有限差分法, 迄今为止已在计算电磁场的各个领域得到了广泛应用。作为一种简单、直观的时域电磁场数值计算方法, 时域有限差分法在计算结构复杂的微带不连续性和谐振器时具有突出的优点。

无源区域麦克斯韦方程的两个旋度方程为

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \sigma_m \mathbf{H} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}\end{aligned}$$

Yee 的独特之处是为每一个电场和磁场分量的空间取样选择一种特殊的网格——Yee 网格, 在时间上, 采用了蛙跳算法, 使得利用一阶导数的二阶中心差分近似从 Maxwell 方程获得的 FDTD 公式, 既满足 Maxwell 方程的微分形式又满足其积分形式。这里只列出其电场和磁场的 x 向分量的 FDTD 差分形式

$$H_x[i, j, k, n+1] = D_{\text{atk}}[i, j, k] H_x[i, j, k, n] + D_{\text{btk}}[i, j, k] \times \left\{ \frac{E_y[i, j, k+1, n] - E_y[i, j, k, n]}{\Delta z} - \frac{E_z[i, j+1, k, n] - E_z[i, j, k, n]}{\Delta y} \right\}$$

$$D_{aHw} = \frac{2\mu - \rho\Delta t}{2\mu + \rho\Delta t} \Big|_{H_w \text{ 所在空间位置}}$$

$$D_{bHw} = \frac{2\Delta t}{2\mu + \rho\Delta t} \Big|_{H_w \text{ 所在空间位置}}$$

$$E_x[i j k n+1] = C_{aE_x}[i j k]E_x[i j k n] - C_{bE_x}[i j k] \times$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{H_y[i j k+1 n+1] - H_y[i j k n+1]}{\Delta z} \\ & - \frac{H_z[i j+1 k n+1] - H_z[i j k n+1]}{\Delta y} \end{aligned} \right\}$$

$$C_{aE_w} = \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} \Big|_{E_w \text{ 所在空间位置}}$$

$$C_{bE_w} = \frac{2\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} \Big|_{E_w \text{ 所在空间位置}}$$

对于微带线激励源设置方法主要有 4 种: 1) 将激励源平面设在边界面上, 并且激励源平面设为电壁, 在微带线与接地平面之间加入强迫激励的高斯 (Gauss) 脉冲, 激励面的其余部分切向电场设为 0。2) 将激励源平面设在边界面上, 但激励源平面设为磁壁, 并在激励源平面前后根据镜像理论将其切向磁场设置为 $H_{\tan}|_+ = -H_{\tan}|_-$ 。3) 把激励波与激励面上的场量进行叠加。4) 单独划分出来一个空间作为激励空间^[2], 而所研究的微带结构处于另一个网格空间内。激励空间的作用是迭代产生微带线入射波场, 然后将这入射波场通过连接面加入到微带结构网格空间中。为使激励空间仅有入射波, 空间两端用吸收边界端接, 并将微带线延伸入吸收边界中。对微带结构空间来说, 连接面就是总场、反射场分界面, 它的反射区域终端连接着吸收边界, 与馈电无关, 不存在二次反射, 易于分离反射波。虽然因单独的激励空间存在, 增加了少量内存, 但效果是良好的, 使激励波形得到较好的保真。图 1 是激励空间的计算网格, 激励源不是加在边界面上, 而是加在离开边界面一定距离的某一个位置。

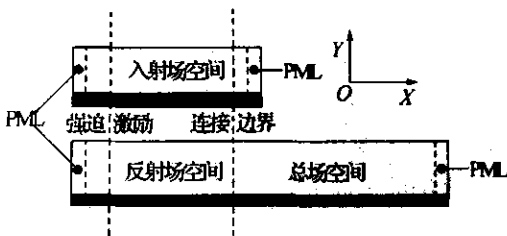


图 1 FDTD 激励空间与微带结构空间设置模型

2 用 FDTD 分析微带发夹线谐振器

采用上述方法对图 1 所示结构的微带谐振器 (对) 分别进行 FDTD 计算和分析。介质基片的介电常数 $\varepsilon_r = 3.0$, 厚度 $h = 0.83 \text{ mm}$ 。激励源选用第 4 种

设置方法^[2] (如图 2 所示), 激励源为高斯脉冲 $\alpha(t) = \exp[-(t-t_0)^2/T^2]$, 其中 $T = 45 \text{ ps}$, $t_0 = 15 \text{ ps}$, 微带金属层尺寸: $L = 52 \text{ mm}$, $\mu = 1 \text{ mm}$, $\nu = 2 \text{ mm}$, $g = 2 \text{ mm}$ 。吸收边界采用 Berenger 完全匹配层 (PML), 分为 7 层, 网格空间划分 $\Delta x = \Delta y = 0.4 \text{ mm}$, $\Delta z = 0.12 \text{ mm}$, 取时间步长 $\Delta t = 0.441 \text{ ps}$ 。入射场的计算网格 (激励空间) 在 x, y, z 方向网格空间的大小为 $50 \times 130 \times 27$, 在 $i = 10$ 处加入强迫激励源, 反射场与总场的分离面设在 $i = 40$ 处。总场空间 x, y, z 方向网格空间的大小分别为 $110 \times 130 \times 27$ (单个谐振器), $190 \times 130 \times 27$ (谐振器对)。入射场计算空间和总场空间具有相同的横截面。对于时间的计算域, 取 $6000 \Delta t$ 以使计算频域分量时更加精确。反射场与总场的分离面设置为参考面。参考点设置为参考面上微带线中心轴线下紧相邻微带线的网格点处。在基板与空气分界面处为保证切向电场和法向磁场的连续性, 介电常数取平均数 $\varepsilon = (\varepsilon_r + \varepsilon_0)/2$, 损耗参数也取其平均值。通过数值仿真计算得出了谐振器 (对) 的 S 参数。

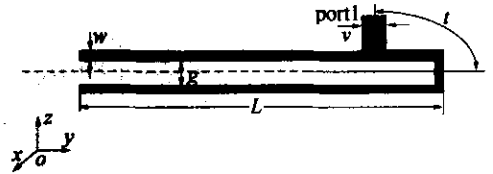


图 2 发夹线谐振器的结构

2.1 谐振器与外部电路的耦合

谐振器单端加载的传输频响如图 3 所示, 外部品质因数 (Q_e) 能由此求出^[3]

$$Q_e = \frac{f_0}{\Delta f_{\pm 90^\circ}}$$

式中 $\Delta f_{\pm 90^\circ}$ 为偏离中心频率相位 $\pm 90^\circ$ 频率带宽, 须注意的是, 由于参考面选取的误差, 中心频率 S11 的相位不为零, 而是有一个小的偏差 Δf , 在求取 $\Delta f_{\pm 90^\circ}$ 时需将此偏差考虑进去。图 4 所示为由 FDTD 求得的谐振器输入输出耦合位置 t 与外部品质因数 Q_e 的关系曲线。

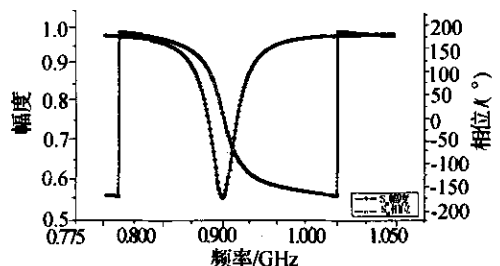
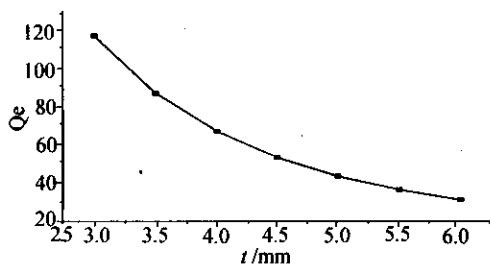


图 3 单端加载谐振器的 S 参数曲线 (幅度和相位)

图 4 输入输出耦合位置 t 与外部品质因数 Q_e 的关系曲线

2.2 谐振器的级间耦合

当两个具有相同谐振频率的谐振器之间发生耦合时,会出现谐振频率分离情况,如图 5a 所示,设两个谐振频率分别为 f_1 和 f_2 ,则耦合系数定义为^[3]

$$k = (f_2 - f_1) / f_0$$

其中

$$f_0 = (f_1 + f_2) / 2$$

由 FDTD 方法可以得到谐振频率 f_1 和 f_2 。图 5b 为由全波分析法的 FDTD 法得到的耦合系数 $k_{j,j+1}$ 与耦合缝宽 S 的关系曲线。

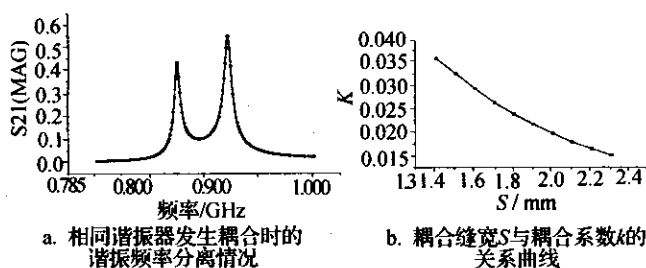


图 5 谐振器的级间耦合

3 设计实例

采用上述谐振器作为滤波器的基本单元,设计有如下指标的切比雪夫型带通滤波器:中心频率 902.5 MHz,带宽为 25 MHz,带内纹波小于 0.1 dB,在偏离中心频率 45 MHz 处衰减大于 30 dB。根据低通到带通的变换公式,由表查得 $n' = 4$,各低通原型的原件值为 $g_0 = 1$, $g_1 = 1.1088$, $g_2 = 1.3061$, $g_3 = 1.7703$, $g_4 = 0.8180$, $g_5 = 1.3554$,通过外部品质因数和级间耦合系数曲线来确定带通滤波器的几何尺寸,由 $K_{i,j+1} = (BW/f_0) / \sqrt{g_i g_{j+1}}$, $Q_e = (f_0/BW) \cdot g_0 g_1$ 得到 $K_{12} = K_{34} = 0.023$, $K_{23} = 0.0182$, $Q_e = 40.0259$,进而求得 $S_{12} = S_{34} = 1.9$ mm, $S_{23} = 2$ mm, $t = 5.5$ mm。图 6 是用 FDTD 仿真得到的上述结构的 S 参数曲线。由此可见,设计结果与指标要求十分接近。

万方数据

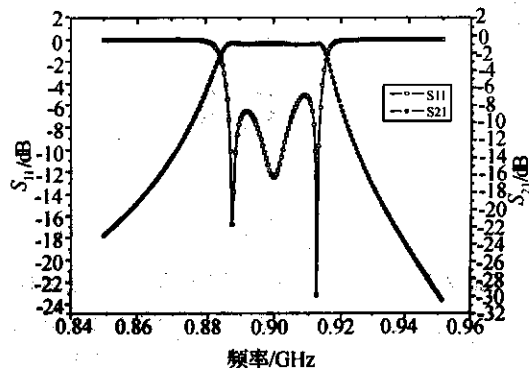


图 6 设计结构的频响曲线

4 结 语

随着空间电子技术和移动通信的发展,整机的小型化已成为研究发展方向。微波滤波器作为整机中的一个关键部件,对其小型化的研究是整机小型化研究的一个重要部分。基于微带谐振器实现的滤波器往往需要在结构上进行变化以实现小型化^[4],由于结构的变化,各种不连续性随之而来,利用等效电路往往无从下手,且精度不高,因此须先借助全波分析法拟合出谐振器外部品质因数和耦合系数与结构参数的关系曲线,再进行滤波器的设计。时域有限差分法由于其在处理复杂结构问题时所具有的特殊优势,再加上其节约存储空间和计算时间,在微波电路的分析与设计中已经被越来越多的人采用。

参 考 文 献

- [1] Zhang X, Fang F, Mei K K. Calculations of the dispersive characteristics of microstrips by the time-domain finite difference method[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1988, 34: 263-267.
- [2] 尹家贤. FDTD 中微带线激励源设置的新方法[J]. 电波科学学报, 2000, 15(2): 204-207.
- [3] Hong Jia-sheng, Lancaster M J. Microstrip filter for RF/microwave applications[M]. A Wiley-interscience publication, John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Makimoto M, Yamashita S. 无线通信中的微波谐振器与滤波器[M]. 赵宏锦,译. 北京:国防工业出版社, 2002.

申 凯 男,1979 年生,博士研究生。研究方向为微波电路与系统,电磁场数值计算。

郑武团 男,1958 年生,副教授。研究方向为微波,毫米波电路与系统,微波智能检测。

谷国栋 男,1979 年生,博士研究生。研究方向为雷达信号处理。

丁炳汉 男,1965 年生,工程师。研究方向为雷达信号处理。

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(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/>