

终端开路式交指带通滤波器仿真设计

杜 勇^{1,2}, 郑佳春¹, 陈智勇¹

(1. 集美大学 信息工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门大学 电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 基于悬置线交指带通滤波器通带内插入损耗比较小, 具有很高的选择性和很大的带外衰减, 常应用于无线电收、发接收机以及雷达通信系统中。将综合设计法和微波电路仿真软件 ADS 相结合, 设计悬置线终端开路式交指带通滤波器。根据交指滤波器的理论得到每个杆的归一化单位长自电容和两相邻杆的归一化单位长互电容, 得到滤波器的最初尺寸。利用 ADS 软件建模、仿真、优化调整, 最后得到该滤波器的几何参数尺寸终值。该设计方法简单, 适合工程应用。

关键词: 悬置线; 终端开路式; 交指带通滤波器; ADS 软件

中图分类号: TN 971.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-9787 (2009) 04-0461-06

Simulation design of terminal open - circuit type interdigital band - pass filter

DU Yong^{1,2}, ZHENG Jia - chun¹, CHEN Zhi - yong¹

(1. School of Information Engineer, Jimei University, Xiamen 361021, Fujian, China; 2. Department of Electronic Engineer, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: The interdigital band - pass filter based on suspended line with low pass - band insertion, precise selective and high out - band attenuation, which is often used in wireless transceiver and radar communication system. In order to design band - pass filter which hangs to place the open - circuit type of the line terminal, the traditional calculate method is combined with the microwave ADS software, the self - capacitor, mutual capacitor and the initial value of the geometry parameter of the interdigital band - pass filter are obtained according to the exact design theory of the interdigital band - pass filter. by building model, simulation, and optimization adjustment, the final value of the geometry parameter for the filter is gotten. The method is simple in designing filter and easily available for engineering applications.

Key words: overhanging line; open - circuit type of the terminal; interdigital filter; ADS software

0 引 言

微波滤波器在微波系统中应用十分广泛^[1-3]。基于悬置微带线的交指滤波器设计多采用近似方法, 以切比雪夫滤波器为低通原型, 根据设计指标确定滤波器的节数及归一化低通元件值, 再结合交指带通滤波器的经典公式, 得到终端开路式交指型带通滤波器每个杆的归一化单位长自电容和两相邻杆的互电容。利用图表得到滤波器尺寸, 然后加工调试, 计算精度不高, 且调试困难^[4-8]。利用 ADS 软件设计微波滤波器可缩短研制周期, 提高设计效率和精度^[1]。本文采用交指滤波器的准确理论设计频率为 0.975 ~ 2.025 GHz 的终端开路式交指型带通滤波器, 选择悬置线的基片结构, 确定基片参

收稿日期: 2009-03-21

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (2006J0410); 福建省科技计划项目 (2008H0032)。

作者简介: 杜勇 (1971-), 男, 甘肃天水人, 博士, 讲师, 从事射频电路设计教学与研究工作。

E-mail: duyong2001@jmu.edu.cn

数, 编程计算出每级导体杆的长度 $L[i]$, 宽度 $W[i]$ 以及每两个导体杆之间的间距 $S[i, i+1]$, 结合 ADS 软件建模、仿真、优化调整。

1 终端开路式交指带通滤波器的设计原理

终端开路式交指滤波器的结构如图 1 所示。在两平行终端传输线间平行放置多个交叉的矩形杆耦合线阵, 矩形杆起谐振器作用, 长度约小于 $1/4$ 导波波长。

对于终端开路式滤波器, 由文献 [9-11] 可得式 (1) - (5)

$$N_{\text{开路}} \geq 3 + \frac{\ln\left(\frac{2a}{\varepsilon}\right) - 3 \cosh^{-1} \frac{\Omega_1}{\Omega_a}}{\cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 + \Omega_1^2}}{\sqrt{1 + \Omega_a^2}} \right)}, \quad (1)$$

式中: $N_{\text{开路}}$ 为终端开路式滤波器节数; $\varepsilon = (10^{\frac{L_{As}}{10}} - 1)^{\frac{1}{2}}$; L_{As} 为通带内分贝波纹; $\Omega_1 = \tan \theta_1 = \tan \frac{\pi \omega_1}{2\omega_0}$
 $= \tan \frac{\pi f}{2f_0}$; $\Omega_a = \tan \frac{\pi f_a}{2f_0}$; f_1 为通带截止频率; f_a 为阻带的衰减频率; $a = 10^{L_{As}/20}$; L_{As} 为阻带衰减值。

$$\begin{cases} \frac{C_1}{\varepsilon} = \frac{376.7}{\sqrt{\varepsilon_r}} Y_A \left(\frac{1 - \sqrt{h}}{Z_1/Z_A} \right) \\ \frac{C_2}{\varepsilon} = \frac{376.7}{\sqrt{\varepsilon_r}} Y_A h \left(\frac{Y_2}{Y_A} \right) - \sqrt{h} \frac{C_1}{\varepsilon} \\ \frac{C_k}{\varepsilon} \Big|_{k=3-n-2} = \frac{376.7}{\sqrt{\varepsilon_r}} Y_A h \left(\frac{Y_k}{Y_A} \right) \\ \frac{C_{n-1}}{\varepsilon} = \frac{376.7}{\sqrt{\varepsilon_r}} Y_A h \left(\frac{Y_{n-1}}{Y_A} \right) - \sqrt{h} \frac{C_n}{\varepsilon} \\ \frac{C_n}{\varepsilon} = \frac{376.7}{\sqrt{\varepsilon_r}} Y_A \left(\frac{1 - \sqrt{h}}{Z_n/Z_A} \right) \end{cases}, \quad (2)$$

由式 (2) 可计算每个杆的归一化单位长自电容, 其中各参量由式 (3), (4) 可得, g_k 为归一化低通原型滤波器元件数值, $\omega_1' = 1$ 。

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{\pi}{2} \frac{\omega_1}{\omega_0} = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\Omega}{2} \right) \\ \frac{J_{k,k+1}}{Y_A} \Big|_{k=2-n-2} = \frac{g_2}{g_0 \sqrt{g_k g_{k+1}}} \\ \frac{J_{n-2,n-1}}{Y_A} = \frac{1}{g_0 \sqrt{g_{n-2} g_{n+1}}} \\ N_{k,k+1} \Big|_{k=2-n-2} = \sqrt{\left(\frac{J_{k,k+1}}{Y_A} \right)^2 + \left(\frac{\omega_1' g_2 \tan \theta_1}{2g_0} \right)^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{Z_1}{Z_A} \omega_1' g_0 g_1 \tan \theta_1 \\ \frac{Y_2}{Y_A} = \frac{\omega_1' g_2}{2g_0} \tan \theta_1 + N_{23} - \frac{J_{23}}{Y_A} \\ \frac{Y_k}{Y_A} \Big|_{k=3-n-2} = N_{k-1,k} + N_{k,k+1} - \frac{J_{k-1,k}}{Y_A} - \frac{J_{k,k+1}}{Y_A} \\ \frac{Y_{n-1}}{Y_A} = \frac{\omega_1' (2g_0 g_{n-1} - g_2 g_{n+1}) \tan \theta_1}{2g_0 g_{n+1}} + N_{n-2,n-1} - \frac{J_{n-2,n-1}}{Y_A} \\ \frac{Z_n}{Z_A} = \omega_1' g_n g_{n+1} \tan \theta_1 \end{cases} \quad (4)$$

由式(5)可计算两相邻杆间的归一化单位长互电容:

$$\begin{cases} \frac{C_{12}}{\varepsilon} = \frac{376.7}{\sqrt{\varepsilon_r}} Y_A \frac{\sqrt{h}}{(Z_1/Z_A)} \\ \frac{C_{k,k+1}}{\varepsilon} \Big|_{k=2-n-2} = \frac{376.7}{\sqrt{\varepsilon_r}} Y_A h \left(\frac{J_{k,k+1}}{Y_A} \right), \\ \frac{C_{n-1,n}}{\varepsilon} = \frac{376.7}{\sqrt{\varepsilon_r}} Y_A \left(\frac{\sqrt{h}}{Z_n/Z_A} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式(2)和式(5)中 ε 为介电常数; ε_r 为相对介电常数; h 为无量纲的比例因素.

图2为滤波器设计采用的平行耦合矩形杆等效电路. 其中 C'_{f0} 为奇模边缘电容, C'_{fe} 为偶模边缘电容, C_p 为平板电容, C_f 为边缘电容, B 为两边两个接地板的距离, t 为中心导带的厚度, W 为中心导带的宽度, S 为两个导带(谐振器)的间距, c 为光速, f_0 为通带的中心频率.

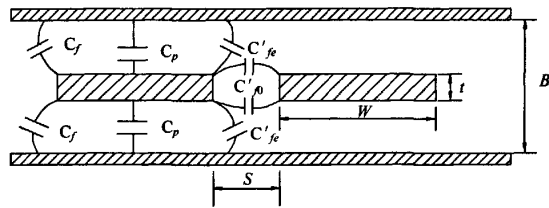


图2 平行耦合矩形杆的各边缘电容和平板电容

Fig.2 Brim and panel capacitance in the parallel coupling rectangle pole

$$\begin{cases} \frac{S}{B} = \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{K_2 + 1}{K_2 - 1} \right) \\ \frac{W_k}{B} \Big|_{k=1-n} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{t}{B} \right) \times \left(\frac{C_0}{2\varepsilon} - \frac{C'_{fe,k-1,k}}{\varepsilon} - \frac{C'_{fe,k,k+1}}{\varepsilon} \right), \\ L = \frac{1}{4} \times \frac{c}{f_0} \times \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{C_p}{\varepsilon} = \frac{2W}{B(1-t/B)} \\ \frac{C'_{fe}}{\varepsilon} = \frac{C_f \times \ln(1 + \tanh \theta)}{\pi(1-t/B) \ln 2} \\ \frac{C_f}{\varepsilon} = \frac{C_f}{\pi(1-t/B)} \end{cases} \quad (7)$$

由式(2)和式(5)结合式(6)和式(7)可求出滤波器每一级的几何尺寸 S , W , L 的值, 其中 c 为光速, f_0 为通带的中心频率. $\theta = \pi S/2B$, $K_2 = \exp\left(\frac{\Delta C/\varepsilon}{K_1}\right)$, $K_1 = \frac{C_f}{\pi(1-t/B) \ln 2}$, $\frac{\Delta C}{\varepsilon} = \frac{C'_{f0}}{\varepsilon} - \frac{C'_{fe}}{\varepsilon}$.

2 设计实例及仿真

滤波器设计指标有以下几个.

中心频率: $f_0 = 1.5\text{ GHz}$; 通带宽度: 相对带宽 $\Delta = (f_2 - f_1) / f_0 = 70\%$, 或 $f_2 - f_1 = 1.05\text{ GHz}$; 通带衰减: 等于或小于 0.1 dB ; 阻带衰减: 在 0.8 GHz 频率上至少有 30 dB 的衰减; 端接条件: 两端均为 $50\ \Omega$ 的微带线.

2.1 滤波器级数的选择和归一化低通原型元件值的确定

由于该滤波器的相对带宽 $\Delta = 70\%$, 故选用宽带型的终端开路式交指型滤波器设计方法^[10]. 滤波器的通带内波动要求不太高, 而对于带外的衰减要求很高, 所以选用矩形系数较好的切比雪夫低通原型滤波器来设计, 带内的最大衰减值 L_A 为 0.1 . 由式 (1) 可得 $N_{\text{开路}} = 8$. 则其归一化低通原型滤波器元件值为: $g_0 = 1, g_1 = 1.1897, g_2 = 1.4346, g_3 = 2.1199, g_4 = 1.6010, g_5 = 2.1699, g_6 = 1.5640, g_7 = 1.9444, g_8 = 0.8778, g_9 = 1.3554$.

2.2 导体杆归一单位长自电容和互电容和具体几何尺寸的计算

图 3 为选用的悬置线结构, 其中 B 为腔体的内部高度, t 为微带线的介质基片厚度, h_1 为介质基片距腔体上表面的距离, h_2 为介质基片距腔体下表面的距离.

计算导体杆的归一化单位长自电容和归一单位长互电容时, 悬置线和带状线的转换公式要进行变换. 对自电容 C_k/ε 和互电容 $C_{k,k-1}/\varepsilon$, 悬置线 ε_{rel} 与带状线 ε_r 的转换公式和悬置线 $\varepsilon_{\text{rel}2}$ 与带状线 ε_r 的转换公式^[10] 分别为式 (8) 和 (9) 所示.

$$\varepsilon_{\text{rel}} = \frac{B\varepsilon_r}{2B\varepsilon_r - 4(\varepsilon_r - 1)} + 0.5, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{\text{rel}2} = (1 + \varepsilon_r)/2. \quad (9)$$

选用的基片材料为聚四氟乙烯, 介电常数 $\varepsilon_r = 2.6$, 厚度 $t = 1.6\text{ mm}$, 腔高 $B = 15.8\text{ mm}$. 由式 (6) 和式 (7), 结合公式 (8) 和 (9) 和介质基片的常数 B, t 可得到交指型滤波器中每一级导体杆具体的物理几何尺寸参数 $W[i], L[i] (i = 1 \sim 8)$ 和 $S[i, i+1] (i = 1 \sim 7)$ 如表 1 所示.

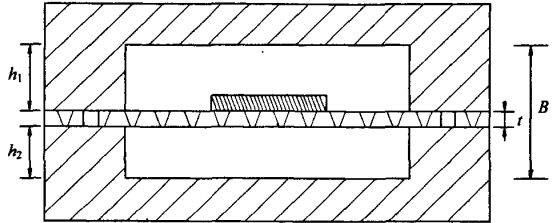


图 3 悬置线内部尺寸

Fig.3 Inner dimension of overhanging line

表 1 交指滤波器导体杆几何尺寸参数的最初值

Tab.1 Initial value of conductor geometry parameter in interdigital filter

导体杆 i	导体杆宽度 $W[i]/\text{mm}$	导体杆间距 $S[i, i+1]/\text{mm}$	导体杆长度 $L[i]/\text{mm}$
1	3.200 4	1.209 8	48.976 4
2	3.073 4	3.454 4	48.976 4
3	3.200 4	3.632 2	48.976 4
4	3.225 8	3.708 4	48.976 4
5	3.225 8	3.632 2	48.976 4
6	3.200 4	3.454 4	48.976 4
7	3.073 4	1.209 8	48.976 4
8	3.200 4	0	48.976 4

2.3 仿真模型的建立

图 4 为基于 ADS 的 5 层介质模型的仿真原理图: 其中 ML8CTL-V 为非对称 8 级耦合线模型, 每一级耦合杆的参数为 $W[1], W[2], \dots, W[8]; S[1, 2], S[2, 3], \dots, S[7, 8]; S-PA-$

PARAMETERS 为散射参量 [S] 模块, 仿真起始频率 0.4 GHz, 终止频率 2.6 GHz, 步长为 0.05 GHz.

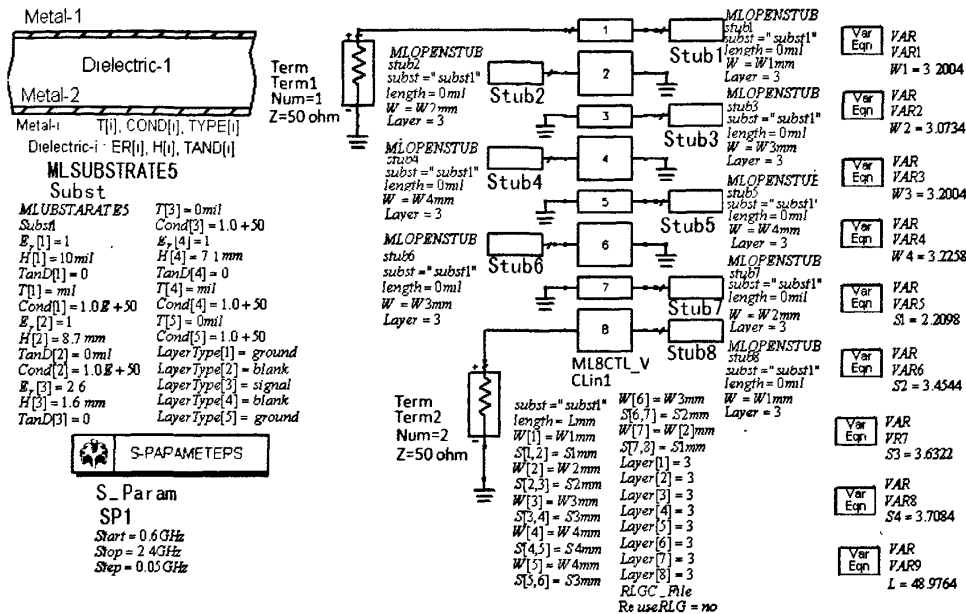


图4 悬置线终端开路式交指型滤波器仿真原理

Fig.4 Simulation principle diagram of open-circuit type interdigital filter

2.4 仿真的最初结果

由图5可知, 该带通滤波器的波形基本形成, 但通带的带内波纹抖动较大, 通带两边缘处的特性不太理想, 应在仿真时对滤波器尺寸参数加以调整和优化, 以满足设计指标要求.

2.5 仿真优化后的结果

使用ADS的TUNE仿真器对图4所示的仿真原理图进行优化, 结果如图6所示, 同时可以得出该滤波器的几何尺寸参数的最终数值如表2所示.

图6(a)可知 m_1 为通带的低频点, 频率为0.978 GHz, 衰减为-0.189 dB; m_2 为通带的高频

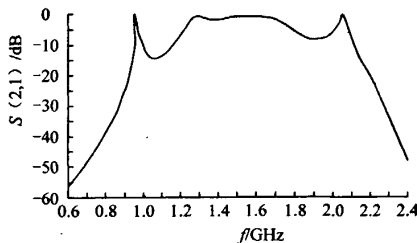
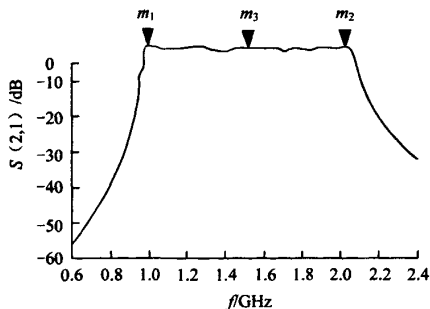
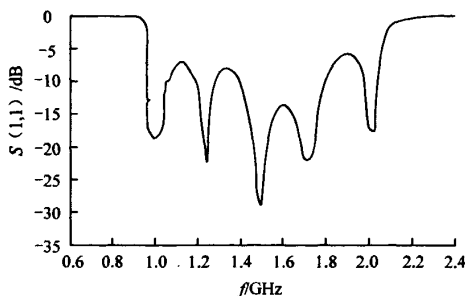


图5 交指滤波器频带响应的最初仿真结果

Fig.5 Prime simulation result of interdigital filter



(a) ADS 仿真的频带响应



(b) ADS 仿真反射系数响应

图6 悬置线交指滤波器的最终仿真结果

Fig.6 Final results of the overhanging line interdigital filter

表 2 交指型滤波器导体杆几何尺寸参数的最终值
Tab.2 Final value of conductor geometry parameter in interdigital filter

导体杆 i	导体杆宽度 $W[i]/\text{mm}$	导体杆间距 $S[i, i+1]/\text{mm}$	导体杆长度 $L[i]/\text{mm}$
1	3.099 4	0.734 6	46.648 2
2	2.959 4	3.364 7	46.648 2
3	3.102 3	3.572 8	46.648 2
4	3.212 6	3.875 2	46.648 2
5	3.212 6	3.572 8	46.648 2
6	3.102 3	3.364 7	46.648 2
7	2.959 4	0.734 6	46.648 2
8	3.099 4	0	46.648 2

点，频率为 2.037 GHz，衰减为 -0.226 dB； m_3 处频率为 1.512 GHz，衰减为 -0.371 dB；在 0.8 GHz 频率上大于 30 dB 的衰减，表明该悬置线交指型滤波器的仿真最终结果的中心频率，通带带宽，阻带衰减都基本达到设计要求。由图 6（b）可以看出：在通带 0.975 ~ 2.025 GHz 内， $S(1, 1)$ 的值基本上都小于 -5 dB 的，故该滤波器的驻波比满足设计要求。

3 结 论

利用 ADS 软件对带宽为 0.975 ~ 2.025 GHz 的悬置线终端开路式交指型带通滤波器建模，并对其几何尺寸参数的初值进行了仿真、优化，得到该滤波器几何尺寸参数的终值。从仿真设计中可知 ADS 所提供的多层介质和多层耦合线模型的精度是比较高的，能够解决交指型滤波器的仿真和优化的难题，提高了效率。该设计方法简单，适合工程应用，对实际滤波器的制作有一定的指导意义。

参考文献：

[1] 苏建欢. 用 ADS 仿真设计制作一种高性能的微带滤波器 [J]. 河池学院学报, 2004, 24 (4): 57 - 60.

[2] JOHN SMITH. The even - mode and odd - mode capacitance parameters for coupled lines in suspended substrate [J]. IEEE MTT, 1971, 19 (5): 424 - 431.

[3] 王子宇, 张肇仪, 徐承和, 等. 射频电路设计——理论与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 169 - 175.

[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, 1976: 100 - 121.

[5] 赫崇骏, 韩永宁, 袁乃昌, 等. 微波电路 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999: 106 - 114.

[6] 雷振亚. 射频/微波电路导论 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 86 - 87.

[7] GIOVANNI ALESSIO, GUISEPPE TROROISE. Interdigital design forms low - cost bandpass filters (I) [J]. Microwave & RF, 1997, 48 (9): 77 - 85.

[8] GIOVANNI ALESSIO, GUISEPPE TROISE. Interdigital design forms low - cost bandpass filters (II) [J]. Microwave & RF, 1997, 48 (10): 79 - 83.

[9] 夏运强, 王玲. 交指带通滤波器的精确设计 [J]. 电子科技, 2004, 17 (5): 23 - 26.

[10] 甘本拔, 吴万春. 现代微波滤波器的结构与设: 上册 [M]. 北京: 科学出版社, 1972: 218 - 222.

[11] 黄慰. 悬置线交指型带通滤波器设计 [J]. 电子科技大学学报: 自然科学版, 2005, 34 (1): 33 - 35.

(责任编辑 李文清)

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/>