

微波低通滤波器的分析与设计

周学军^①, 董军堂^①, 雷文礼^①, 崔成瑞^②

(①延安大学 物理与电子信息学院, 陕西 延安 716000;
②中国中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710054)

【摘要】介绍了一种微波低通滤波器的简便设计, 从典型的巴特沃斯型(最平坦型)低通原型滤波器的频率特性分析给出低通滤波器的设计方法。为了达到微波滤波器的设计, 采用Richard变换, 将集总元件变换到传输线; 同时采用Kuroda恒等式, 以利用传输线段来分隔滤波器元件。通过实例来说明这种设计方法的简便、快捷, 并用MATLAB软件仿真。

【关键词】微波低通滤波器; 巴特沃斯型; Richard变换; Kuroda恒等式

【中图分类号】TN713

【文献标识码】A

【文章编号】1002-0802(2010)03-0183-02

Analysis and Design of Microwave Low Pass Filter

ZHOU Xue-jun^①, DONG Jun-tang^①, LEI Wen-li^①, CUI Cheng-rui^②

(①College of Physical and Electronic Information, Yan'an University, Yanan Shanxi 761000, China;
②The 1st Group Co., Ltd. of China Railway, Xi'an Shaanxi 710054, China)

【Abstract】A simple design for microwave low pass filter is described, then a design method is given based on analysis of the frequency characteristic from the typical Butterworth low pass filter (the smoothest type). In order to accomplish the filter design, Richard transformation is adopted, thus to transform the lump part into the transmission line, while the Kuroda formula is used in order to separate the filter element with the transmission line. The experiment indicates that this design is simple and easy, and verified by simulation with MATLAB software.

【Key words】microwave low pass filter; Butterworth; Richard transformation; Kuroda formula

0 引言

随着通信系统的发展, 对载波频率的需求已超出了中波、短波、超短波的范围向微波发展。滤波器在通信系统中占有十分重要的地位。它是用于分离或组合各种不同频率信号的重要元件。本文以比较常用的巴特沃斯型(最平坦型)低通滤波电路为例, 说明分布参数综合法微波低通滤波器的设计方法。

1 巴特沃斯低通滤波器的设计方法

(1) 确定参数

电路阻抗 Z_0/Ω ; 通带截止频率 f_c/Hz ; 阻带截止频率 f_s/Hz ; 通带衰减量 L_{Ar}/dB ; 阻带衰减量 L_{As}/dB 。

(2) 计算元件级数

收稿日期: 2009-04-11。

作者简介: 周学军(1969-)男, 讲师, 主要从事光电信号处理的研究工作; 董军堂(1973-), 男, 讲师, 主要研究方向为光电信号处理; 雷文礼(1982-)男, 助教, 主要研究方向为光电信号处理; 崔成瑞(1983-)男, 助理工程师, 主要研究方向为自动化控制。

$$N = 0.5 \cdot \lg \left[\frac{10^{L_{Ar}/10} - 1}{10^{L_{As}/10} - 1} \right] / \lg [f_s/f_c], \quad (1)$$

N 取最接近的整数。

(3) 计算原型电路归一化元件值

$$g_k = 2 \cdot \sin \frac{(2k-1)\pi}{2N}, \quad k=1, 2, 3, \dots, N. \quad (2)$$

(4) 选择串L并C或并C串L型滤波电路, 根据变换公式计算实际电路电感、电容值。对于串L并C型电路:

$$L_{odd} = \frac{g_{odd} \cdot Z_0}{2\pi f_c}, \quad C_{even} = \frac{g_{even}}{2\pi f_c \cdot Z_0}, \quad (3)$$

对于并C串L型电路:

$$C_{odd} = \frac{g_{odd}}{2\pi f_c \cdot Z_0}, \quad L_{even} = \frac{g_{even} \cdot Z_0}{2\pi f_c}. \quad (4)$$

2 微波传输线

当我们假定已成形的线路导体的厚度 t 与基片厚度 h 相比可以忽略 ($t/h < 0.005$), 微带线的宽度可以由以下的公式得出^[1-2]: 对于窄的微带线 $w/h < 1$ 时, 我们得到特性阻抗:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left(8 \frac{h}{w} + \frac{w}{4h} \right), \quad (5)$$

其中, ϵ_{eff} 是由下式给出的有效介电常数:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{1/2} + 0.041 \left(1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right], \quad (6)$$

对于宽的微带线 $w/h > 1$, 我们必须采用不同的特性阻抗表达式:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \frac{1}{\left(1.393 + \frac{w}{h} + \frac{2}{3} \ln \left(\frac{h}{w} + 1.444 \right) \right)}, \quad (7)$$

其中:

$$\sqrt{\epsilon_{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

要求得 w/h 值, 我们可以对上面的式子编程求解。还有一种方法就是可以通过查表法得出 w/h 值。

3 微波滤波器的实现

集总元件如电感和电容等, 只是对有限的数值范围有效, 在微波频率实现很困难, 而且必须用分布元件来近似, 在微波频率, 元件之间的距离是不能忽略的。这里需要采用 Richard 变换^[3], 将集总元件变换到传输线; 同时采用 Kuroda 恒等式^[3], 以利用传输线段来分隔滤波器元件。由于这些附加的传输线段并不影响滤波器响应, 这种类似的设计称之为冗余滤波器综合。设计滤波器时可吸收这些线段的优点, 以便改善滤波器的响应。

4 微波低通滤波器的设计

4.1 设计要求

截止频率: $f_C = 3.0$ GHz, 即通带为 0~3.0 GHz; 通带衰减: 等于或小于 0.5 分贝; 阻带衰减: 当频率大约为截止频率的两倍时损耗不小于 40 dB; 传输线阻抗: 两端均为 50Ω 的微带线; 介质基片参数: 采用 $\epsilon_r = 9.6$, 厚度 $h = 1$ mm 的陶瓷基片。

4.2 设计步骤

步骤 1 根据计算, 滤波器的阶数必须为 5, 归一化低通滤波器其它参数为:

$$g_1 = 1.7058 = g_5, g_2 = 1.2296 = g_4, g_3 = 2.5408, g_6 = 1.0.$$

步骤 2 用开路、短路的并联、串联微带线替换电感和电容。只需直接应用 Richard 变换即可得到微带线的特性阻抗和特性导纳为:

$$Y_1 = Y_5 = g_1, Y_3 = g_3, Z_2 = Z_4 = g_2.$$

步骤 3 为了在信号端和负载端达到匹配并使滤波器容易实现, 需要引入单位元件以便能够应用 Kuroda 规则^[3]将所有串联线段变为并联线段, 引入它们并不影响滤波器的特性。

步骤 4 反归一化过程包括了将单位元件的输入、输出阻抗变成 50Ω 的比例变换以及计算短线的长度。短线长度:

$$l = \lambda_0 / 8 = v_p / (8f_0) = \frac{c / \sqrt{\epsilon_r}}{8f_0} = 4.034 \text{ mm}, \text{ 微带所对应的阻抗}$$

值: $Z_1 = Z_5 = 129.3$, $Z_{UE3} = Z_{UE4} = 81.5$, $Z_2 = Z_4 = 24$, $Z_{UE1} = Z_{UE2} = 80$, $Z_3 = 19.7$ 。

步骤 5 比较集总元件和分布元件低通的幅频特性, 并通过仿真结果对微带线尺寸进行调整, 最终基本达到设计要求。

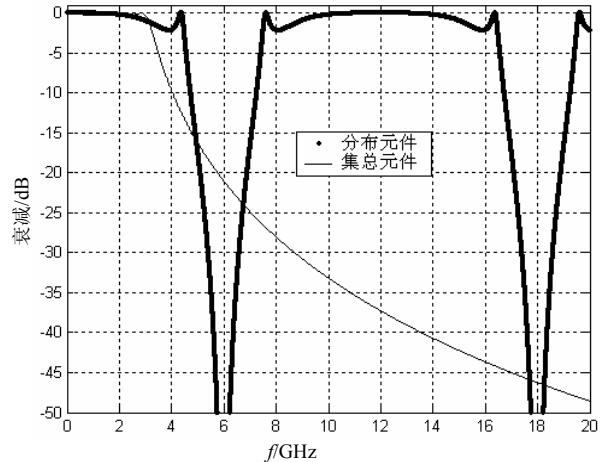


图 1 集总元件和分布元件低通的幅频特性比较

这种设计算出的分布元件幅频特性和集总元件的幅频响应一起给出, 需要说明的是通带内特性直到 3 GHz 两者是很类似的, 但分布元件滤波器具有较大的截止特性, 另外, 还应说明分布元件滤波器具有频率响应, 由于 Richard 变换周期性的结果, 每 12 GHz 重复一次。

5 结语

在初次按照理论值输入时, 发现截止频率高于设计要求, 可以通过调整 Z_3 的宽度来实现(增大), 不过不能调整太大, 此时容易造成带内波纹增大^[1]。如果还有差距可以同时调整 Z_2 和 Z_4 的宽度。但是又造成了波形衰减太慢在 6G 频率是达不到损耗大于 40 dB 的要求。为了减少带内波纹和增大衰减特性可以调整四个单位元件 Z_{UE1} 、 Z_{UE2} 、 Z_{UE3} 和 Z_{UE4} 的宽度。增加宽度则衰减率会减小, 带内波纹更平缓^[4-5]。综合以上特性, 反复调整可以得到比较满意的低通滤波器特性。

参考文献

- [1] 陈振国. 微波技术基础与应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002.
- [2] 赵春晖, 杨辛元. 现代微波技术基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000.
- [3] 邓贤进, 金数波. 微波带通滤波器的准确设计及仿真[J]. 电讯技术, 2001(05): 18-22.
- [4] 吕盛, 费元春. DSP+DDS 在软件无线电中的应用[J]. 通信技术, 2003(05): 37-38.
- [5] 周资伟, 王世练, 张尔扬. 多功能调制平台的设计与实现[J]. 通信技术, 2003(11): 19-20.

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/>