

# 基于分离指标的宽阻带低通滤波器设计

余 晓, 周新志, 雷印杰

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

**摘要:** 常见的开路短截线和阶跃阻抗结构在微带低通滤波器设计中较为成熟, 但是这些结构的低通滤波器受到寄生通带的影响, 阻带不够宽; 提出了一种基于分离指标的宽阻带低通滤波器设计方法, 利用计算机仿真软件 ADS, 对常见的阶跃阻抗低通滤波器进行结构改进; 该方法将低通滤波器设计指标重点分为滚降率和宽阻带抑制两部分, 分别利用椭圆滤波器和巴特沃斯滤波器的本身特性实现设计目的, 最后进行级联优化; 此结构综合设计方法简单严谨, 易于实现, 改进的低通滤波器性能优越, 实现了宽阻带的设计需求, 通带 0~3 GHz, 插入损耗 < 0.5 dB, 阻带 4~12 GHz, 抑制 > 45 dB。

**关键词:** 低通滤波器; 宽阻带; 分离指标

## Design of Broad-stopband Low-pass Filter Based on Separating Specifications

Yu Xiao, Zhou Xinzhi, Lei Yinjie

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Conventional planar low-pass filters often suffer from the problem of spurious passbands, though the design technology is mature. It presents a novel low-pass filter with broad stopband, which is a optimal structure realized by the way of separating specifications and ADS. Attenuation rate and stopband are designed respectively by using elliptic filter and butterworth filter before optimizing. The proposed low-pass filter has the advantage of design process and broad stopband. The insertion loss is less than 0.5 dB from DC to 3 GHz and S21 is less than -45 dB within the broad stopband from 4 GHz to 12 GHz.

**Keywords:** low-pass filter (LPF); broad stopband; separating specifications

## 0 引言

低通滤波器 (LPF) 在现代电子通信系统中是关键的选频器件之一, 主要用于抑制干扰信号和谐波信号。在日益复杂的电磁环境中, 滤波器性能的优劣直接影响整个系统的性能, 因此对插入损耗、阻带范围等指标的设计有严格的要求。近年来, 平面光子带隙结构<sup>[1]</sup>、缺陷地结构<sup>[2]</sup>、高低阻抗谐振器<sup>[3]</sup>及不对称耦合结构<sup>[4]</sup>等性能优良的新结构相继应用于滤波器设计中, 但是这些结构通常设计周期长、计算复杂且不易于加工。而较为成熟的路短截线和阶跃阻抗结构, 则无法避免分布参数器件本身在阻带内的寄生通带影响, 不能应用于宽阻带要求的使用环境。

本文以射频前端微带低通滤波器为例, 提出了一种分离指标的级联结构设计方法, 对常见的阶跃阻抗微带低通滤波器进行优化设计。同时借助计算机辅助软件 ADS (Advanced Designed System), 有效地简化了设计过程。该方法将微带低通滤波器的滚降率和阻带抑制分离设计, 充分利用传统滤波器 (椭圆低通滤波器和巴特沃斯低通滤波器) 的固有特性, 消除分布参数滤波器的寄生通带影响。通过原理图和版图的仿真均

验证了这种方法的可行性, 为宽阻带低通滤波器的设计提供了一种思路, 有效提高了设计效率。

## 1 寄生通带产生原因分析

寄生通带是微带滤波器无法避免的现象, 它的存在严重破坏了阻带抑制效果, 是微带滤波器设计过程中最直接的干扰因素。

根据微波传输线理论, 对一段长度为  $l$ 、特性阻抗为  $Z_0$  的传输线, 当终端负载为  $Z_L$  时, 传输线的等效输入阻抗为:

$$Z_m = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan\beta l}{Z_0 + jZ_L \tan\beta l} \quad (1)$$

式中,  $\beta$  为相位常数。

微带滤波器的设计原理便是在特定频率处使用不同特性阻抗的开路或短路传输线替换集总参数元件 (电容或电感)。因此, 对于  $Z_L = 0$  或  $Z_L \rightarrow \infty$ ,  $\tan\beta l$  的影响均存在。由于  $\tan\beta l$  具有周期性, 因而滤波器对于不同频率的响应也具有一定的周期性, 表现为在截止频率处产生寄生通带。

## 2 宽阻带微带低通滤波器设计

射频前端在通信系统中是关键信号收发模块, 通常由 LNA、滤波器、本振、混频等部分组成。目前射频前端一级混频多采用高中频方案, 因此一级混频前的低通滤波器必须要有较宽的阻带才能达到镜频抑制的目的。射频前端接收范围 0~3 GHz, 一中频为 4.2 GHz, 故镜频范围 8.4~11.4 GHz。因此低通滤波器设计指标如下: 通带 0~3 GHz, 插入损耗 < 0.5 dB; 阻带 4~12 GHz, 抑制 > 45 dB; 通带反射系数 < -20 dB。设计采用介电系数较为稳定的罗杰斯 (Rogers) 4350B

收稿日期: 2015-07-21; 修回日期: 2015-08-19。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61172181)。

作者简介: 余 晓 (1990-), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要从事模式识别与智能控制方向的研究。

周新志 (1966-), 男, 四川成都人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事模式识别与智能控制方向的研究。

板材, 介电常数  $\epsilon_r = 3.66$ , 基片厚度  $H = 0.762$  mm, 磁导率  $\mu_{ur} = 1$ , 金属电导率为  $5.88E+7$ , 封装高度  $H_u = 1.0E+33$  mm, 金属层厚度  $T = 0.035$  mm, 介电损耗角正切  $\tan\delta = 0.0037$ 。

本文采用分离指标的设计方法, 将低通滤波器的总体要求主要分为滚降率和阻带抑制两部分分别考虑, 使用椭圆滤波器实现较高的滚降率, 同时利用巴特沃斯滤波器衰减极点在无穷远处的特性消除寄生通带的影响, 最后通过级联优化完成宽阻带低通滤波器设计目的。

## 2.1 滚降率指标设计

从滤波器的设计指标分析, 截止频率和阻带初始频率相隔较近, 即衰减过渡带较窄, 所以需要较高的滚降率, 以保证系统不会发生馈通现象。考虑到椭圆低通滤波器锐截止<sup>[5]</sup>的特性, 选取其作为低通滤波器原型来设计滚降率指标。

由于将设计指标分离, 椭圆低通滤波器的设计仅需着重考虑滚降率, 适当放宽对阻带抑制度的要求, 这将极大的降低设计复杂性以及简化滤波器结构。

首先设计集总参数的低通滤波器。这里并没有采用传统的椭圆滤波器归一化模型, 而是直接使用 ADS 软件提供的 LC 低通滤波器设计功能 (filter design guide) 获取集总参数原型, 避免了繁杂的计算。LC 低通滤波器原型如图 1 所示。

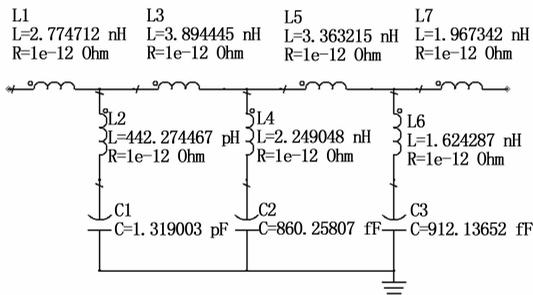


图 1 集总参数椭圆低通滤波器

当传输线尺寸远小于工作波长时, 传输线呈现半集总参数性质。这时, 一段高特性阻抗的传输线可以近似等效为串联电感, 特性阻抗越高, 与集总参数感性性质就越接近, 但是过高的特性阻抗要求较高的制造工艺, 同时限制了传输线的载流能力; 而低阻抗特性的传输线可以等效为并联电容, 特性阻抗越低, 与集总参数电容性质就越接近, 但是传输线的宽度随着阻抗降低而增大, 导致在工作频率处产生横向共振。因此选取合适的高低阻抗, 对滤波器的性能以及结构有重要的影响。原则上, 高阻抗特性应该尽量高, 低阻抗特性应尽量低, 但是为了兼顾制造工艺和结构上的特点, 高阻抗线的特性阻抗取  $120 \Omega$ , 低阻抗线的特性阻抗取  $30 \Omega$ , 源阻抗和负载阻抗取  $50 \Omega$ 。

根据特性阻抗、介电常数、基片厚度、金属层厚度等参数, 椭圆函数低通滤波器高低阻抗线的宽度、导波长可直接由 ADS 中的 LineCalc 工具计算得出, 如表 1 所示。

表 1 椭圆低通滤波器高低阻抗线参数值

	高阻抗	源、负载阻抗	低阻抗
特性阻抗/ $(\Omega)$	$Z_L = 120$	$Z_0 = 50$	$Z_C = 30$
导波长/(mm)	$\lambda_L = 63.60$	$\lambda_0 = 59.24$	$\lambda_C = 57.17$
微带线宽度/(mm)	$W_L = 0.21$	$W_0 = 1.62$	$W_C = 3.46$

根据式 (2)、式 (3)<sup>[6]</sup>, 利用上述 L-C 椭圆低通滤波器原型电路的集总参数, 可以计算高低阻抗微带线的长度  $l_L$  和  $l_C$ , 使用分布参数传输线 (高低阻抗微带线) 代替集总参数元件。

高阻抗微带线等效长度为:

$$l_L = \frac{\lambda_L}{2\pi} \sin^{-1} \left( \frac{\omega L}{Z_L} \right) \quad (2)$$

低阻抗微带线等效长度为:

$$l_C = \frac{\lambda_C}{2\pi} \sin^{-1} (\omega C Z_C) \quad (3)$$

式中,  $\omega$  为角速度,  $L$ 、 $C$  为集总参数原型的等效电容电感值。

根据表 1 中的宽度参数和计算得到的微带线等效长度在 ADS 原理图中构建该滤波器。但是由于在计算微带线等效长度时使用理想电路进行公式推导, 并没有考虑相邻谐振器之间的附加耦合以及分布参数元件的寄生效应等诸多因素的影响, 因此推导出的滤波器参数和实际数据略有偏差。诚然可以通过复杂的联合方程式推导更为精确的参数值, 但是更为简洁高效的方法是利用 ADS 的优化功能进行结构微调。经过优化后使用 layout 功能生成的版图如图 2 所示。

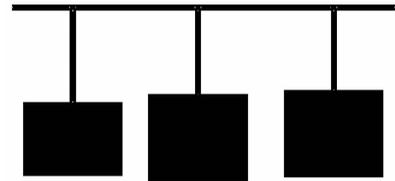


图 2 椭圆函数微带低通滤波器版图

ADS 提供版图的矩量仿真功能 (Momentum 功能)<sup>[7]</sup>, 是一种对第三维度进行简化的 2.5D 电磁场仿真器, 准确的引入 EM 模型并考虑微波电路的寄生、耦合效应, 因而仿真结果比原理图仿真更接近于实际情况。针对版图选用 S 参数进行仿真, 频率范围  $0 \sim 14$  GHz, 仿真结果如图 3 所示。

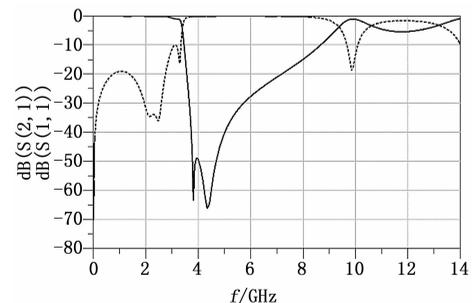


图 3 椭圆微带低通滤波器仿真结果

从上面的仿真结果可以获知, 椭圆微带滤波器达到了高滚降率的设计初衷。这是因为椭圆函数滤波器在有限频率内存在零、极点, 通带和阻带内都具有等波纹性, 阻带内的传输零点压缩了过渡带, 因而可获得极为陡峭的衰减曲线。但是随着频率上升, 元件的电抗、电纳相互转化, 在  $10$  GHz 附近出现了明显的寄生通带, 严重破坏了阻带抑制度。通过增加多处等效 T 型节<sup>[8]</sup>等带阻结构可以有效降低寄生通带的影响, 但是计算过程过于复杂; 或者调整微带线的特性阻抗值, 将寄生通带搬移至阻带外, 但是微带线的宽度随着特性阻抗的增加而变窄, 加大了制版工艺的难度。

### 2.2 阻带抑制指标设计

上述设计保留了高滚降率的设计指标，忽略寄生通带的影响，使得设计过程简洁高效。而本节设计在不影响滚降率的前提下，着重考虑阻带抑制性能，平滑寄生通带影响。降低寄生通带影响的方法很多，但都设计复杂或者对制造工艺要求较高。

巴特沃斯最大平滑滤波器理论上衰减极点在无穷远处，在通带和阻带内均具有最大限度平坦，没有起伏，因此其本身特性在阻带范围内能够有效抑制寄生通带的影响。但是巴特沃斯滤波器的滚降率偏低，在多数滤波场合中不能胜任。如果将上述二者的滚降率和寄生通带抑制级联，不仅能保留陡峭的衰减带，而且可以获得极宽的阻带抑制。

直接使用 ADS 软件提供的 LC 低通滤波器设计功能生成集总参数滤波器原型，设计指标不考虑滚降率，仅需保证阻带抑制以及插入损耗。

巴特沃斯滤波器集总参数原型转化为分布参数元件过程中，高特性阻抗仍使用 120 Ω，但是低特性阻抗取 15 Ω。这是因为选用相同阻抗的高阻抗线（宽度相同）作为级联结构的连接线，能够很大程度上降低两级间的耦合；同时降低低特性阻抗值，虽然微带线宽度增加，但是在滤波器结构长度上大大减小。

阻带抑制指标的设计过程与滚降率相似，所以利用上述讨论方法可以很容易得到满足设计指标的滤波器结构，如图 4 所示。

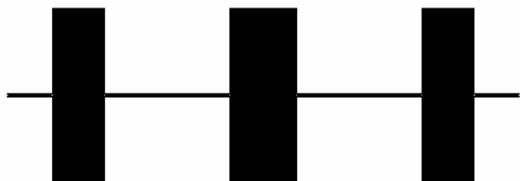


图 4 巴特沃斯微带低通滤波器版图

### 2.3 级联结构及结果分析

将上述基于不同设计指标的滤波器级联后，由于相邻结构间的耦合因素，滤波效果有一定的恶化，再次使用 ADS 原理图版图联合仿真优化功能进行结构优化后，最终的滤波器改进结构以及仿真结果如图 5 和图 6 所示。



图 5 级联结构滤波器版图

由最终的优化仿真结果可以得出，该级联结构微带低通滤波器在 0~3 GHz 通带内波纹小于 0.5 dB，插入损耗小于 0.5 dB，反射系数 S11 小于 -20 dB；在 4~12 GHz 阻带范围内，抑制大于 45 dB。虽然在 11 GHz 附近仍可以观察到寄生通带

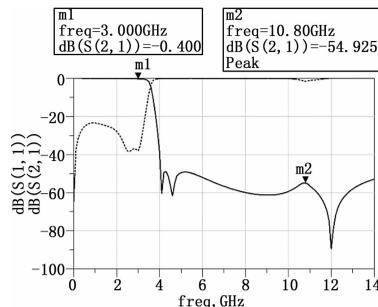


图 6 级联结构滤波器仿真结果

的影响痕迹，但是并未能影响到阻带抑制效果。可见，设计的微带低通滤波器满足设计要求，达到了设计指标。

### 3 结论

本文提出了一种分离指标的级联结构宽阻带低通滤波器的设计方法，在常见阶跃阻抗设计方法上和结构上进行优化。通过实验步骤可知，该设计方法充分利用计算机资源，极大简化了设计步骤，提高了设计效率。并以射频前端微带低通滤波器的设计为例，通过 ADS 的矩量仿真加以验证，实现了在通带 (0~3 GHz) 范围内插入损耗小于 0.5 dB 以及在阻带 (4~12 GHz) 范围内抑制大于 45 dB 的设计指标。实验结果表明分离指标的设计方法能够有效满足宽阻带的设计需求，消除了微带滤波器在 10 GHz 附近的寄生通带影响，同时其阻带抑制效果优于设计指标。基于分离指标的宽阻带微带低通滤波器设计方法提高了设计效率和质量，可广泛应用于射频前端等通信系统中。

#### 参考文献:

- [1] Kim T, Seo C. A novel photonic bandgap structure for low-pass filter of wide stopband [J]. IEEE Microw Guid Wave Lett, 2000, 10 (1): 13-15.
- [2] Ahn D, Park J-S, Kim C-S, Qian Y, Itoh T. A design of low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2001, 49 (1): 86-93.
- [3] Hsieh L-H, Chang K. Compact elliptic-function low-pass filters using microstrip stepped-impedance hairpin resonators [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2003, 51 (1): 193-199.
- [4] Gao J, Zhu L. Asymmetric parallel-coupled CPW stages for harmonic suppressed /4 bandpass filters [J]. Electron Lett, 2004, 40 (18): 1122-1123.
- [5] Karimi G, Yazdani M, Siahkamari H, Lalbakhsh A. Design of microstrip LPF with sharp cut-off frequency and wide stopband [J]. Frequenz, 2014, 68 (7-8): 313-319.
- [6] 甘本被, 吴万春. 现代微波滤波器结构与与设计 [M]. 北京: 科学出版社, 1974.
- [7] 郭湘荣, 武岳山. 微波低通滤波器电路设计 [J]. 计算机仿真, 2010, 27 (8): 338-341.
- [8] 宁俊松, 罗正祥, 等. 宽阻带平面低通滤波器的设计 [J]. 电子学报, 2008, 36 (2): 342-345.

—locked loop applied to grid-connected power converters [J]. Industrial Electronics, IEEE, 2011, 58 (5): 1737-1745.

- [10] Singhal A, Madhu C, Kumar V. Designs of all digital phase locked loop [A]. Engineering and Computational Sciences (RAECS) [C]. IEEE, 2014. 1-5.

(上接第 245 页)

- [7] 高建明. 自适应模糊控制的自平衡机器人设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015 (3): 773-776.
- [8] 黄保瑞, 杨世平. 基于 FPGA 的全数字锁相环设计 [J]. 电子测试, 2014 (8X): 33-34.
- [9] Geng H, Xu D, Wu B. A novel hardware-based all-digital phase