

# 宽带中频采样抗混迭滤波器的设计与实现

田海燕, 曹 鹏, 王明飞, 许鹏鹏, 孟凡俊

(北京印刷学院信息与机电工程学院, 北京 102600)

**摘 要:** 由于受滤波器通带带宽、带内纹波、带外衰减量、插损、体积等性能参数的制约, 设计和实现宽带中频抗混迭滤波器的技术要求往往比较高. 首先介绍了中频带通采样技术及抗混迭滤波器设计的关键性能指标, 电感、电容元件的主要参数与工作频率之间的变化关系及选用原则. 然后, 利用计算机仿真软件完成了滤波器的设计、元件参数配置与特性仿真, 并提出了设计和实现高阶椭圆滤波器所采取的一系列措施, 最后给出了 9 阶椭圆滤波器的设计电路及实测结果.

**关键词:** 抗混迭; 椭圆滤波器; 宽带; 大动态; 中频采样

**中图分类号:** TN975.51, TN713

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2010) 2A-060-05

## The Design and Implementation of the Anti-Aliasing Filter for Wideband IF Signals Sampling

TIAN Hai-yan, CAO Peng, WANG Ming-fei, XU Peng-peng, MENG Fan-jun

(School of Information and Mechanical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

**Abstract:** As it is restricted by the filter's parameters, such as the pass-band bandwidth, in-band ripple, out-band attenuation, insertion loss and its volume and so on, designing and achieving broadband IF anti-aliasing filter is difficult. The IF band-pass sampling and anti-aliasing filter, and the relationship between the key parameters of the LC (inductors and capacitors) and the working frequency, and LC components selection principles are introduced. Then it achieved the designing of the filters, the actual components parameters configuration and characteristic simulation with the computer simulation, and provided the methods to design and realize the higher-order elliptic filters. Lastly, gave the designed circuit and testing results of the 9-order elliptic filter.

**Key words:** anti-aliasing; elliptic filter; wideband; large dynamic; intermediate frequency sampling

### 1 引言

抗混迭滤波器用于滤除中频有用信号带外的杂散信号, 避免 A/D 变换过程中出现频谱混迭现象. 当采样频率一定时, 要求抗混迭滤波器的通带必须位于某一特定的奈奎斯特区内, 且其过渡带的衰减必须大于 A/D 变换的动态范围. 同时, 实现中频带通采样通常受多种因素制约, 尤其对宽带、大动态中频信号的采样, 对 A/D 变换的采样速率和信噪比要求都很高. 受 ADC 性能指标的限制, 若满足 ADC 信噪比要求, 则采样速率就不可能很高, 被采样信号的带宽可能非常接近奈奎斯特带宽. 因此, 为防止采样后出现频谱混迭, 要求抗混迭滤波器必须具有通频带宽、带内平坦、带外衰减快、插损小等特性, 从而极大地提高了抗混迭滤波器的设计与实现难

度. 如何设计宽带中频抗混迭滤波器, 文献[1~6]中做了相关研究, 如巴特沃斯、贝塞尔和切比雪夫滤波器. 文献[7~8]对椭圆滤波器进行了设计和仿真. 本文研究更高阶的椭圆滤波器, 以及椭圆滤波器 LC 元件的频率特性, 介绍了 LC 元件建模的注意事项、参数选择与配置方法, 以及滤波器 PCB 的设计, 并利用计算机仿真软件完成了高阶 LC 椭圆滤波器的设计, 给出了该滤波器的仿真与实测结果.

### 2 中频采样与抗混迭滤波

中频带通采样在频域可以按照奈奎斯特带宽  $f_s/2$  ( $f_s$  为采样时钟频率) 为单位将频域划分为不同区域. 为了从样本信号中能够无失真的恢复出原模拟信号, 避免出现频谱混迭现象, 选择采样时钟频率  $f_s$  时, 被采样

模拟信号的频谱必须在某个单一的奈奎斯特区内,即:

$$nf_s/2 < f_l < f_h < (n+1)f_s/2 \quad n=1,2,\cdots \quad (1)$$

在 A/D 变换器必须加抗混迭滤波器. 图 1 给出一个第 3 奈奎斯特区内带通采样抗混迭滤波器,其上、下限拐点频率分别为  $f_l, f_h$ ,有用信号的中心频率为  $f_c$ ,频率范围为  $f_l \sim f_h$ ,过渡带分别为:  $2f_s - f_l \sim f_l$  和  $f_h \sim 3f_s - f_h$ . 带外衰减  $R_D$  要满足 A/D 变换的分辨率要求,即:

$$R_D = 6M \lg(f_b/f_a) \quad (2)$$

式中,  $M$  是滤波器的阶数,  $f_a, f_b$  分别是滤波器带外衰减过渡带上、下限频率(图 2).

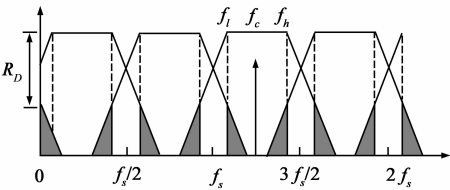


图1 抗混迭滤波器幅频特性

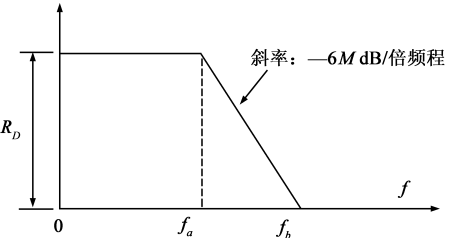


图2 滤波器的带外衰减

3 椭圆滤波器传输特性

与巴特沃斯和切比雪夫滤波器相比,在相同的频率和衰减要求下椭圆滤波器的阶数最少,或阶数相同的情况下,椭圆滤波器具有更窄的过渡带,带外衰减速率更快. 椭圆函数滤波器的传输函数为:

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 Z_n^2(\omega)}} \quad (3)$$

式中,  $\epsilon$  是纹波系数,  $Z_n(\omega)$  是  $n$  阶椭圆函数. 当  $n$  为奇数时,  $Z_n(\omega) = \frac{\omega(a_2^2 - \omega^2)(a_4^2 - \omega^2) \cdots (a_{2n-1}^2 - \omega^2)}{(1 - a_2^2\omega^2)(1 - a_4^2\omega^2) \cdots (1 - a_{2n-1}^2\omega^2)}$ , 当  $n$  为偶数时,  $Z_n(\omega) = \frac{(a_2^2 - \omega^2)(a_4^2 - \omega^2) \cdots (a_{2n}^2 - \omega^2)}{(1 - a_2^2\omega^2)(1 - a_4^2\omega^2) \cdots (1 - a_{2n}^2\omega^2)}$ ,  $a_2, a_4, \cdots$  为椭圆滤波器的零点,  $1/a_2, 1/a_4, \cdots$  为椭圆滤波器的极点.

椭圆带通滤波器带内、带外都有纹波,如图 3 所示. 图中,  $f_c$  是中心频率,  $f_l, f_h$  分别是通带下限和上限频率,  $f_{ls}, f_{hs}$  分别是阻带下限、上限频率. 根据滤波器对称性设计,满足以下关系式:

$$f_c^2 = f f_h = f_l f_{hs} \quad (4)$$

下边带和上边带选择性分别为:

$$B_l = \frac{f_{ls}}{f_l}, B_h = \frac{f_h}{f_{hs}} \quad (5)$$

设计椭圆滤波器时,可以根据设计需要,按式(4)、式(5)计算并合理设置参数.

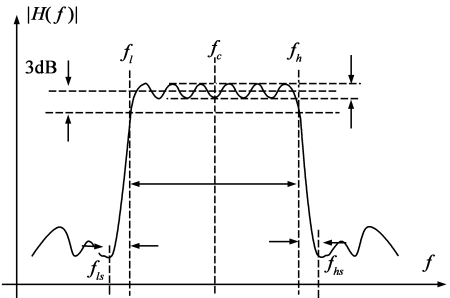


图3 椭圆滤波器的幅频特性曲线( $S_{21}$ )

与同阶切比雪夫、巴特沃斯滤波器相比,椭圆滤波器电路中相邻两个节点之间多并入了一阶 LC 串联电路. 因此,谐振电路数目增加三分之一,导致了高阶椭圆滤波器的稳定性相对更差一些. 对于此问题的解决,一方面尽量选用品质好、体积小的 L、C 元件,另一方面 PCB 设计过程中要解决好电磁兼容问题.

4 LC 元件特性及选择

椭圆滤波器对器件的性能参数要求非常严格,但由于 LC 器件总是存在一定的寄生参数,当在低频率范围内工作时,这些寄生参数对器件性能影响较小,器件性能比较稳定,但在高频范围内,寄生参数的影响很大,且随着频率的提高,影响更大. 在选择 LC 器件时,电容元件的参数较为容易满足要求,而电感的选用较难,需要根据滤波器工作频率范围,选择 Q 值高、损耗小,且经串并联组合容易满足设计参数要求的元件,可选用表贴绕线电感. 但当工作在高频时,表贴绕线电感的 Q 值也会随频率的增加而较小,表 1 给出了使用精密 LCR 测试仪 AV2782 测得标称值为 8.2nH 的表贴绕线电感随工作频率的变化其电感量和等效串联电阻.

表 1 不同频率下电感元件的电感量、等效串联电阻

频率 (MHz)	10	30	50	70	90	110
电感量 (nH)	8.29	7.85	7.54	7.25	6.95	6.61
等效串联电阻 ( $\Omega$ )	0.182	0.241	0.288	0.366	0.376	0.426

电感的特性会随工作频率变化而变换,根据 Coilcraft 公司提供的基于网络 ([www.coilcraft.com/apps/lqz/lqz.cfm](http://www.coilcraft.com/apps/lqz/lqz.cfm)) 的仿真软件,仿真得到 2nH、22nH、47nH 和 150nH 的 0402HP 封装的贴片绕线电感的特性曲线如图 4(a)、4(b)、4(c) 所示. 图 4(a) 是电感的 Q 值随频率变化的曲线,图 4(b) 是电感量随频率变化的曲线,

图 4(c) 是电感的阻抗随频率变化的曲线. 对比分析各图, 可以看到贴片绕线电感尽管可以工作在高频, 但当频率高到一定程度时其  $Q$  值、阻抗和电感量都会发生

非常明显的变化, 并且由于分布参数的影响会出现并联谐振现象, 各项性能参数也变得不稳定.

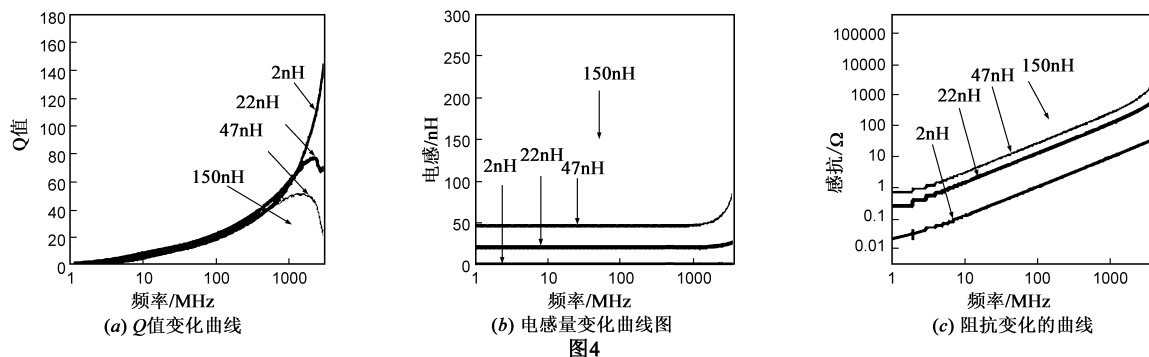


图4

电容特性也会随频率的变化而变化, 同样用精密 LCR 测试仪 AV2782 对封装为 0603 的标称值 8.2pF 的贴片电容进行测量, 当工作频率在 10MHz 时, 测得电容值为 8.38pF, 等效并联电阻值为 9.3M $\Omega$ ; 频率为 30MHz 时, 电容值为 8.4pF, 等效并联电阻值为 65k $\Omega$ ; 频率达到 110MHz 时, 电容值为 9.71pF, 等效并联电阻值为 6.3k $\Omega$ .

不同容量的电容, 在频率改变时其特性变化存在一定差别, 但总体变化趋势基本相同. 由 Kyocera 公司提供的基于网络 ([www.coilcraft.com/apps/lqz/lqz.cfm](http://www.coilcraft.com/apps/lqz/lqz.cfm)) 的仿真软件, 仿真得到 2pF、22pF、47pF 和 150pF 的几种特性

曲线分别如图 5(a)、5(b)、5(c) 所示. 图 5(a) 为电容的  $Q$  值随频率变化的曲线图, 图 5(b) 为电容容量随频率变化曲线, 图 5(c) 为电容容抗随频率变化的曲线. 对比分析各图, 可以看到电容工作在低频时各项性能指标都比较稳定, 但当工作在高频时, 由于分布参数的影响会出现串联谐振, 各项性能参数均已变得不稳定.

由于中频抗混迭滤波器的工作频率一般都比较低, 对元器件的性能要求非常严格. 因此, 在设计和实现宽带中频抗混迭椭圆滤波器时, 必须选择工作频率高、寄生参数小、 $Q$  值大的 LC 元件.

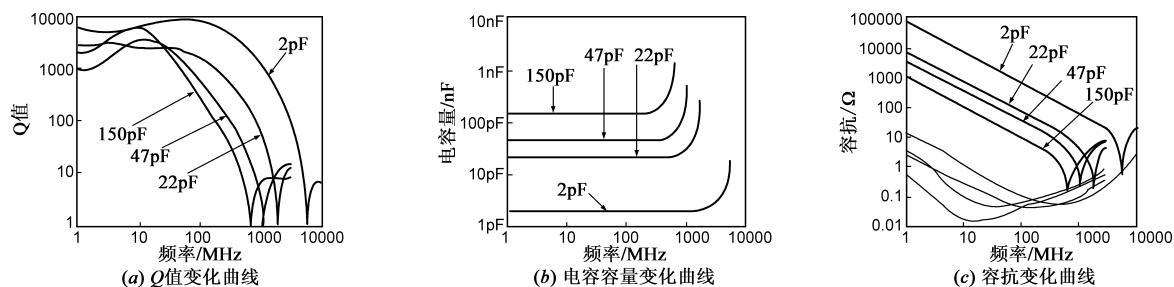


图5

## 5 ADS 软件仿真

滤波器的设计的理论计算是比较复杂的, 本文利用了 ADS 2008 软件实现滤波器的仿真设计, 该软件具有滤波器设计向导功能, 设计时只需输入所需设计滤波器的相关参数并选择滤波器类型即可完成滤波器电路设计、结果仿真和参数扫描优化等功能. 本文设计的宽带中频抗混迭滤波器的参数为: 滤波器的中心频率 140MHz, 通带带宽 36MHz, 带外衰减 40dB, 通带内纹波小于 0.2dB, 过渡带为 112MHz ~ 120MHz 和 158MHz ~ 175MHz, 输入输出电阻分别为 50 $\Omega$ . 电路仿真时, 当滤波器类型选择切比雪夫时, 则满足上述设计参数滤波器的阶数达到 24 阶, 基本无法实现; 当选择椭圆滤波器时, 只需 9 阶即可满足上述设计参数要求 (图 6). 在电路优化过程中, 要尽量考虑电路分布参数的影响. 在仿

真时对各电感元件加入串联等效电阻后, 仿真得出  $S_{21}$  传输特性曲线如图 7 所示. 仿真结果显示, 该滤波器工作稳定, 带外衰减大于 40dB, 通带内非常平坦、纹波小, 3dB 通带带宽满足 36MHz 的设计要求, 能较好的满足总体设计技术指标.

在利用 ADS 软件进行宽带中频抗混迭滤波器设计时, 可以看出椭圆滤波器对元器件的参数变化非常敏感, 尤其是对电感元件的串联等效电阻 (损耗电阻) 非常敏感, 为了设计出插损小、带外衰减大、滤波特性好的滤波器, 除了要解决好 PCB 设计、屏蔽等问题外, 要尽量选择高频特性好、 $Q$  值高的电感, 电容则需选用高频贴片电容.

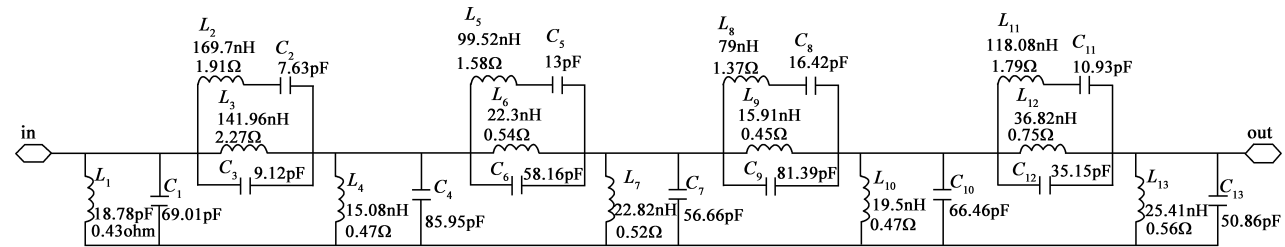


图6 9阶椭圆滤波器电路

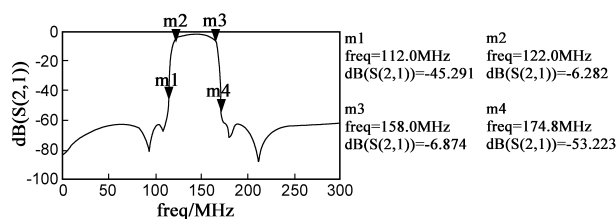


图7 仿真的滤波器幅频传输特性曲线( $S_{21}$ /dB)

6 电路优化及测试结果

在宽带、高阶椭圆滤波器的电路优化设计过程中,需要注意的地方比较多,下面介绍几种主要措施:

(1)合理选择 LC 元件的参数和模型.一般情况下,电感元件采用采用电感电阻串联等效电路,电容元件采用电容电阻并联等效电路.高频时还需要考虑电路中分布参数.

(2)设计 PCB 时,为减小 L、C 单个元件体积,将其封装等效为两个元件串联封装,并在电路安装时通过元件叠加焊接实现并联.

(3)PCB 采用高频基材(如聚四氟乙烯),同时采用

大面积接地和信号线两边放置密集的接地过孔,减少信号间串扰.

(4)对 LC 元件需要进行精密测量和挑选.

利用上述各项措施制作的 9 阶椭圆滤波器,电路实物照片如图 8 所示,其  $S_{21}$ 测试结果如图 9 所示.测试结果显示,除了上限阻带衰减主要由于电感元件的影响产生了一些误差外,其它参数均能较好满足设计参数要求,并且实测结果与仿真结果比较相近.充分说明了采用上述各项措施后,较好地解决了宽带、高阶椭圆滤波器电路仿真和实现问题.

7 结束语

宽带中频抗混迭滤波器的设计技术要求高,且其实际性能在很大程度上依赖于 LC 元器件的选择、PCB 的布局布线、电路的屏蔽与接地等多种因素,在设计与制作时需综合考虑.通过对 LC 器件的建模与精确测量,并在 PCB 设计时,从基材选择、阻抗匹配、大面积接地和外加屏蔽壳等措施,解决了宽带、高阶椭圆滤波器设计和实现的一些关键问题.

参考文献:

[1] Ansari R. Elliptic filter design for a class of generalized half-band filters[J]. IEEE Trans on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1985, 33(5): 1146 – 1150.

[2] Vlcek M, Unbehauen R. Degree, ripple, and transition width of elliptic filters[J]. IEEE Trans on circuits and systems, 1989, 36(3): 469 – 472.

[3] Corral C A, Lindquist C S. Selectivity of elliptic filters[J]. IEE Proceedings-Circuits, Devices and Systems, 2000, 147(3): 189 – 195.

[4] 王田, Celestino A Corral, 杨士中. 椭圆函数滤波器边带特性优化方法[J]. 电路与系统学报, 2005, 10(5): 1 – 4. Wang Tian, Celestino A Corral, YANG Shi-zhong. A technique for optimizing the band-edge characteristics of elliptic function filter[J]. Journal of Circuits and Systems, 2005, 10(5): 1 – 4. (in Chinese)

[5] 曾涛, 龙腾, 毛二可. 一种新的中频采样滤波器的设计与实现[J]. 电子学报, 2000, 28(6): 51 – 54. Zeng Tao, Long Teng, Mao Er-ke. A new approach of the de-

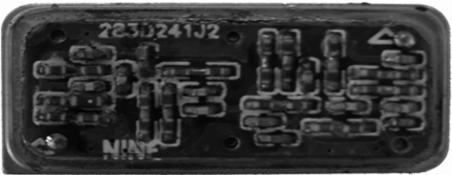


图8 9阶LC椭圆滤波器实物照片

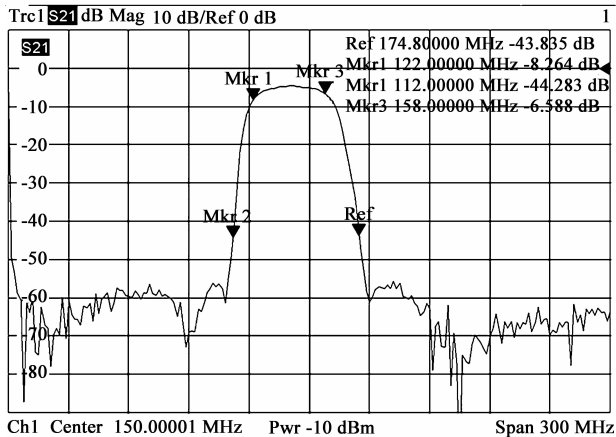


图9 滤波器幅频传输特性曲线( $S_{21}$ /dB (R&S ZVL))

sign and realization of intermediate sampling filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(6): 51 – 54. (in Chinese)

[6] 曹鹏, 齐伟. 宽带无线通信收发信机新技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009. 129 – 138.

[7] 彭永胜, 王太勇 等. 高品质抗混叠滤波器设计[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(5): 596 – 601.

Peng Yong-sheng, Wang Tai-yong et al. Design of high quality anti – aliasing filter[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,

2003, 38(5): 596 – 601. (in Chinese)

[8] 常会敏, 张礼勇, 等. LC 椭圆函数带通滤波器的设计与仿真[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2008, 13(5): 21 – 24.

Chang Hui-min, Zhang Li-yong et al. The design and simulation of LC elliptic band-pass filter[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology. 2008, 13(5): 21 – 24. (in Chinese)

## 作者简介:



**田海燕** 女, 1982 年生于河北张家口蔚县, 北京印刷学院信号与信息处理专业硕士研究生, 2007 年毕业于石家庄铁道学院电子信息工程专业, 主要从事软件无线电, 宽带中频信号的采集与处理系统的研究.

E-mail: thy2003292@sohu.com



**曹 鹏** 男, 1969 年生于宁夏彭阳县, 北京印刷学院教授, 2005 年毕业于北京理工大学电磁场与微波技术专业, 获工学博士学位, 北京市学术创新团队带头人, 信号与信息处理北京市重点建设学科带头人, 已发表论文 20 余篇, 出版著作 4 部, 获得国家级二等奖 1 项, 省部级一等奖 1 项, 主要从事高速信号采集与处理、现代无线通信新技术研究. E-mail: pc@bigc.edu.cn