

复数传输零点在线性相位滤波器设计中的应用

王一凡

中国西南电子技术研究所，四川成都 610036

摘要：分析了复数传输零点对传输群时延特性的影响和线性相位滤波器的设计方法。提出了通过增加复数传输零点来扩宽平坦群时延带宽的新方法。并给出了设计实例和仿真结果，验证了该方法的有效性。

关键字：线性相位滤波器，群时延，复数传输零点

Design of linear phase filter using complex transmission zeros

Wang Yifan

Southwest China Institute of Electronic Technology Sichuan Chengdu 610036

Abstract: Based on analysis the complex transmission zeros' effect on transmission group delay and the method to design of linear phase filter, a new method is introduced to expand the bandwidth of group delay equalization, by increase the number of the complex transmission zeros. Then an example and simulation results are presented, and the validity of the method is verified.

Key Words: Linear phase filter, Group delay, Complex transmission zeros

1 引言

在现代通信系统中，为保证信号的无失真传输，防止信号在传输过程中发生畸变，减小误码率，线性网络在频带内应该具有平坦的幅度特性和线性的相位特性。因此，在设计滤波器时，不仅要满足幅度选择特性，而且还需要满足群时延平坦的要求。广义切比雪夫滤波器可以通过引入一对复数传输零点的办法，调整传输群时延的特性，使得滤波器在部分通带内具有平坦的群时延响应。

由于引入一对复数传输零点所得到的平坦群时延特性一般只占整个通带带宽的60%左右，因此要获得较宽的平坦群时延响应就需要展宽带宽，这在一定程度上减小了带外抑制度。为了增加带宽利用率，本文尝试了用三对复数传输零点来增加带宽利用率的办法，最后通过电路仿真，得到了90%通带内平坦的群时延响应。

2 复数传输零点与群时延的联系

作为一种高性能滤波器形式，广义切比雪夫滤波器能通过引入交叉耦合的方式，产生传输零点，工程中经常使用纯虚数的传输零点来增加带外抑制度，提高通道的选择性。下面，就以一个四阶广义切比雪夫滤波器为例，分别说明复数传输零点的实部和虚部与传输群时延，即 S_{21} 的群时延特性之间的联系。

引入一对归一化频率的复数传输零点 $s = \pm s + jk$ 。当虚部 $k = 0$ 时，分别取实部 s 为0.8, 1.3, 1.8, 3, 绘出对归一化频率的群时延响应曲线。如图1所示，随着 s 由0.8向3变化，群时延由凸形变为凹形，最平群时延出现在 $s = 1.8$ 附近。可见实部主要影响群时延的起伏程度。

当 $s = 1.8$ 时，虚部 k 对群时延的影响如图2所示，当 $k < 0$ 时，前面实部的作用由中心点向左边移动，从图形上看，群时延向右边倾斜。当 $k > 0$ 时，前面实

部的作用由中心点向右边移动，从图形上看，向左边倾斜。可见虚部主要控制实部所起作用的位置。

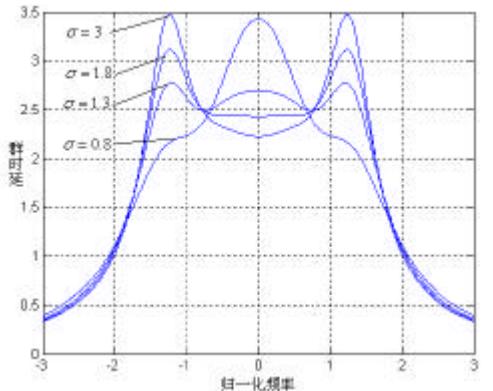


图1 实部对群时延的影响

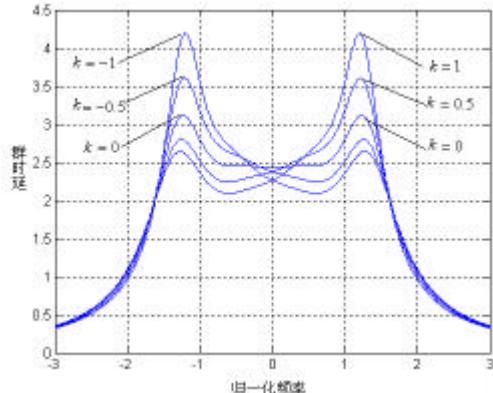


图2 虚部对群时延的影响

由此可见，通过适当调整复数传输零点的虚部，可以控制群时延起伏的位置，而调整复数传输零点的实部，则可以控制所在位置的群时延起伏程度。换句话说，虚部决定了群时延受影响的频率点，而实部决定了所在频点的群时延起伏程度。

3 多对复数传输零点的添加过程

由于无复数传输零点时，通带内的群时延响应是凹形的，为了使群时延变平，应该在最凹处添加一对复数传输零点，使其变平。如果要进一步扩宽平坦群时延，则需要在中心频率两端再加入两对复数传输零点。图3以添加三对复数传输零点为例，说明了多对复数传输零点的添加过程。

如图3所示，在中心频率附近加入一对复数传输零点后，在中心频率两边又出现两个凹点，在这两个凹点处再加入两对复数传输零点后，群时延的起伏程度就降低了，若还需要进一步降低起伏程度，可在相应的凹点再次加入复数传输零点，这样就可以得到更宽

且更平坦的群时延带宽了。

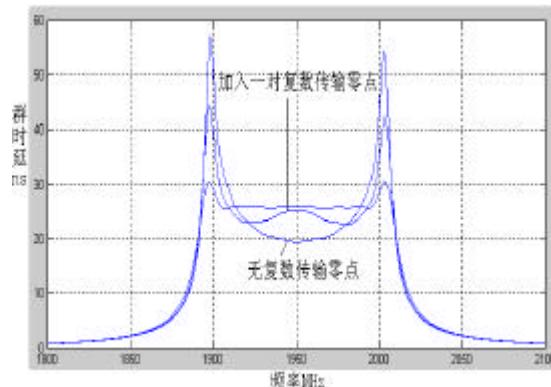


图3 三对复数传输零点的添加过程

综上所述，复数传输零点的添加对数应该每次增加 2^n ，分别为1对，3对，7对，15对……。

4 八阶线性相位滤波器的设计实例与仿真结果

根据以上分析，设计一个中心频率1950MHz，带宽100MHz的八阶线性相位滤波器。

图4给出了不同数目的复数传输零点所得到的群时延比较结果。对于只有一对复数传输零点的线性相位滤波器，其平坦群时延的带宽一般只占整个通带的60%，而加入三对复数传输零点后，在群时延波动不变的前提下，平坦群时延的带宽可以占到整个通带的90%。平坦群时延的时延值由原来只有一对复数传输零点时的22ns增加到了26ns。值得注意的是，加入三对复数传输零点后，通带边缘的群时延峰值由原来的50ns下降到了30ns，这对提高滤波器的功率容量有很大的帮助。

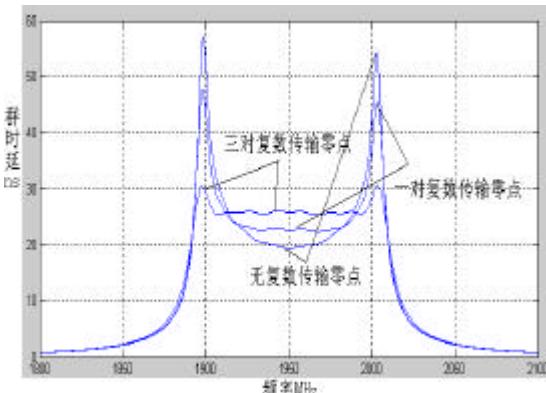


图4 多对复数传输零点的群时延比较

为验证理论的正确性，运用cameron在文献^[1]中叙述的广义且比雪夫滤波器综合方法计算耦合矩阵，令三对

传输零点分别为 $:1950.8 \pm 31.8j$, $1916.5 \pm 29.5j$, $1986 \pm 29.5j$ (单位MHz), 综合后, 得到折叠型拓扑结构八阶线性相位滤波器的耦合矩阵。

$$\begin{bmatrix} 0.002 & 0.849 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.052 \\ 0.002 & 0.605 & 0 & 0 & 0 & 0.106 & 0.004 & \\ -0.002 & 0.488 & 0 & 0.209 & 0.010 & 0 & & \\ -0.019 & 0.257 & 0.007 & 0 & 0 & & & \\ -0.037 & 0.488 & 0 & 0 & & & & \\ -0.011 & 0.605 & 0 & & & & & \\ 0.001 & 0.849 & & & & & & \\ 0.002 & & & & & & & \end{bmatrix}$$

其中归一化输入, 输出阻抗 $r_1 = r_2 = 1.01$ 。将所得耦合矩阵反归一化后就可以得到实际电路所使用的耦合系数。同理可将归一化的输入, 输出阻抗换算为输入, 输出腔的有载品质因数 Q_e 。最后可以在ADS中建立等效电路模型, 如图5所示。

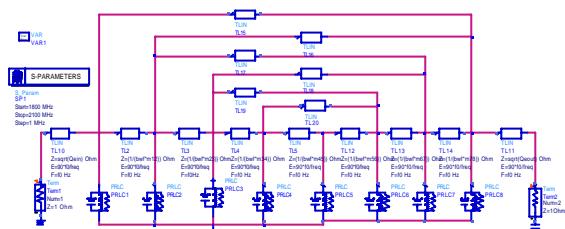


图5 八阶线性相位滤波器等效电路

电路仿真的结果如图6所示。从仿真曲线上看, 加入三对复数传输零点后, 平坦群时延的带宽利用率增加到了通带带宽的90%, 和理论计算得到的结果吻合得很好, 充分证明了理论计算的正确性与有效性。

5 结论

本文在分析了复数传输零点对群时延的影响机理后, 提出了通过增加复数传输零点对数来扩宽平坦群时延带宽的方法。最后通过电路仿真验证了该方法的正确性与有效性。

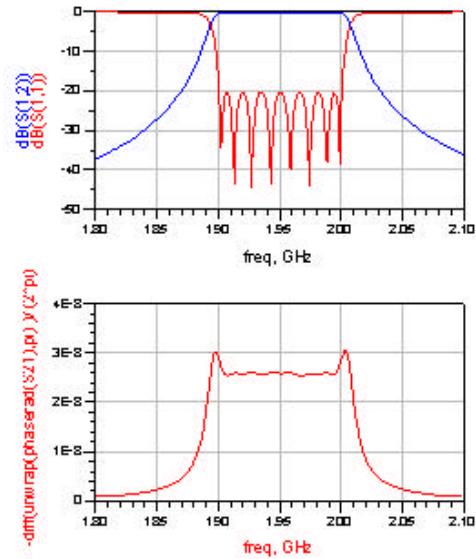


图6 八阶线性相位滤波器等效电路的仿真结果

参考文献

- [1] Richard J Cameron. General Coupling Matrix Synthesis Methods for Chebyshev Filtering Functions[J]. IEEE Trans-MTT, 1999, 47(4): 433-442
- [2] Richard J Cameron. Advanced Coupling Matrix Synthesis Techniques for Microwave Filters[J]. IEEE Trans-MTT, 2003, 51(1): 1-10
- [3] Smain Amari. Synthesis of Cross-coupled Resonator Filters Using an Analytical Gradient-Based Optimization Technique[J]. IEEE Trans-MTT, 2000, 48(9): 1559-1564
- [4] 黄席椿,高顺泉.滤波器综合[M].北京:人民邮电出版社.1978

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/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>