

源与负载感性交叉耦合的小型介质滤波器

曹良足, 高瑞平, 殷丽霞

(景德镇陶瓷大学 机电学院, 江西 景德镇 333403)

摘要:为了提高滤波器的阻带衰减,研究了源与负载感性交叉耦合的小型介质滤波器。首次提出一种新概念:将源和负载看作准谐振器。以贴片电感作为源与负载之间、源与第二个谐振器之间的交叉耦合元件,两个准谐振器和两个介质谐振器可构成级联四节(CQ),一个准谐振器和两个介质谐振器可构成级联三节(CT)。分析了传输零点的位置,详细讨论了这种滤波器结构的设计方法。采用介电常数为80的介质陶瓷组装了3个两级介质滤波器,并进行测试,结果表明传输零点的个数和位置与仿真设计相符合。滤波器的体积小,均为 $14\text{ mm}\times 6.5\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 。

关键词:介质滤波器;交叉耦合;源与负载;传输零点;准谐振器

中图分类号:TN912;TM571.6

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.04.005

Compact Dielectric Filters With Inductive Cross-Coupling Between Load and Source

CAO Liangzu, GAO Ruiping, YIN Lixia

(School of Mechanical and Electrical Engineering of Jingdezhen Ceramics Institute, Jingdezhen 333403, China)

Abstract: In order to improve the stopband attenuation of the filter, a compact dielectric filter with inductive cross-coupling between the load and the source has been developed. A new concept that the source and the load can be regarded as pseudo-resonator is proposed for the first time. An inductor is used as the cross-coupling element between the source and the load or the source and the second resonator. Two pseudo-resonators together with two dielectric resonators can form a cascaded quadruplet (CQ), two dielectric resonators together with a pseudo-resonator can form a cascaded triplet (CT). The locations of the transmission zeros are analyzed and the design of the proposed filters are discussed in details. Three second-order filters made of dielectric ceramics with dielectric constant of 80 are fabricated and measured. The results show the measured numbers and positions of transmission zeros have a good agreement with the simulation. The fabricated filters have compact volumes of $14\text{ mm}\times 6.5\text{ mm}\times 10\text{ mm}$.

Key words: dielectric filter; cross coupling; load and source; transmission zero; pseudo-resonator

0 引言

微波带通滤波器广泛用于现代雷达、卫星和移动通信等系统中^[1]。这些系统要求滤波器具有较低的通带插入损耗和高的阻带衰减,然而这两者是相矛盾的,通常,为了提高阻带衰减,采取增加谐振器级联个数的方法,这样会导致通带损耗的增加,对窄带滤波器尤其明显。于是人们另辟蹊径,在近阻带处插入传输零点,以提高滤波器的选择性。有以下3种方法:

1) 谐振器间构建混合耦合, H. Wang^[2]以悬置导带实现磁耦合,以金属针连结相邻谐振器实现电耦合,在3级滤波器的阻带高端、低端分别产生一个传输零点; F.-C. Chen^[3]调节微带间距控制电耦

合,调节过孔的直径控制磁耦合,同时引入源与负载间的容性耦合,从而在阻带产生3个传输零点; X. Li^[4]在基片集成折叠结构(SIFW)中分别采用回折狭缝线和感性过孔窗口实现电耦合和磁耦合,从而使直接耦合的4级基片集成波导滤波器的两边阻带各产生一个零点。

2) 在不相邻的谐振器间引入交叉耦合形成级联三节(CT)或级联四节(CQ), J. Thomas Brian^[5]概述了这种交叉耦合的工作原理, L. Cao^[6]用同轴短导线实现容性交叉耦合, S. Bastioli^[7]在正交排列的介质谐振之间插入金属斜杆或金属台阶实现不相邻谐振器的交叉耦合。

3) 在源与负载之间引入容性耦合或感性耦合,

收稿日期:2017-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61661023);江西省教育厅科研基金资助项目(GJJ151560);江西省自然科学基金资助项目(20151BAB207014)

作者简介:曹良足(1966-),男,江西都昌人,教授,博士,主要从事微波介质材料与器件的研究。E-mail:clz4233@aliyun.com。

Amir Torabi^[8]在支节加载的双模滤波器中以输入微带线(源)与输出微带线(负载)之间的间隙引入容性耦合,以终端短路的高阻抗线实现源与负载间的感性耦合。

可是,文献[8]中的感性耦合结构的设计复杂,不合同轴介质滤波器。本文以贴片电感作为交叉耦合元件在源与负载之间,或源与第二个谐振器之间引入感性交叉耦合,分别在阻带的高端或低端和两边引入传输零点,并制作了实物,测量结果与设计相吻合。同时提出一种设计源和负载交叉耦合滤波器的新方法:将源和负载看作准谐振器,那么源、负载和谐振器之间可以构成 CT 或 CQ,不需要编程综合 $(N+2) \times (N+2)$ (其中 N 为谐振器的个数)的耦合矩阵^[9],从而简化了设计过程。

1 理论分析

图 1 为含有多种耦合(直接耦合、交叉耦合)的带通滤波器的等效原理图,方框中的 M 为直接耦合,带箭头直线间的 M 为交叉耦合, jB_i 和 C_i (其中 i 为谐振器个数)构成并联谐振回路,是谐振器的等效电路。图中, S, L 分别为信号源和负载, N 为级数, B 为电纳, G_s 和 G_L 分别为输入端的电导和输出端的电导。

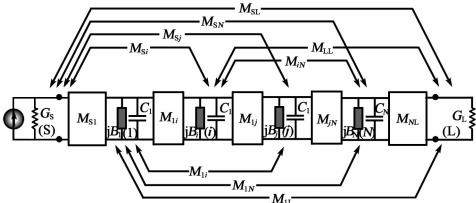


图 1 多种耦合的带通滤波器的等效电路图

根据文献[8]可综合出其耦合矩阵,如图 2 所示。

	S	1	2	L
S	M_{SS}	M_{S1}	M_{S2}	M_{SL}
1	M_{S1}	M_{11}	M_{12}	M_{1L}
2	M_{S2}	M_{12}	M_{22}	M_{2L}
L	M_{SL}	M_{1L}	M_{2L}	M_{LL}

图 2 两级滤波器的 $N+2$ 阶耦合矩阵

对两级滤波器可综合出 4 阶耦合矩阵,含有 16 个元素,除对角线 4 元素外,有 6 个独立元素是表示直接耦合或交叉耦合,这 6 个元素不全为 0,有多种组合形式,但有些结构是无法实现的。要找到能够实现的耦合矩阵,必须将综合出来的矩阵通过矩阵

变换消元,这需要较强的数学知识和编程能力,对工程技术人员是一项挑战。针对这种尴尬,本文提出了一种新的设计方法,将源和负载看作准谐振器,源、负载和谐振器之间可构成 CT 和 CQ,然后通过相位法^[5]判断传输零点的位置,不需要编程综合出 $(N+2)$ 阶耦合矩阵,只需要计算两相邻谐振器间的耦合系数(k_{12})和外部品质因数 Q_e 值。图 3 为交叉耦合的两级滤波器拓扑图。

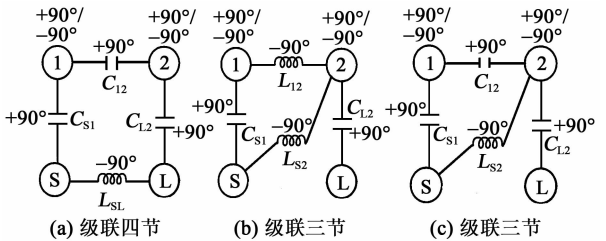


图 3 交叉耦合的两级滤波器拓扑图

图 3(a)由两个准谐振器(用 S 与 L 表示)和两个谐振器(用 1 与 2 表示)构成 CQ,图 3(b)、(c)由一个准谐振器(S)和两个谐振器(用 1 与 2 表示)构成 CT。其中 S 与 1、1 与 2、2 与 L 之间是直接耦合, S 与 L 之间、 S 与 2 之间是感性交叉耦合。传输零点由相位法^[5]判断,结果如表 1 所示。

表 1 两路径的总相位差

图 3	低端	高端
(a)	路径 $S-1-2-L$	$+90^\circ + 90^\circ + 90^\circ + 90^\circ = +450^\circ$
	路径 $S-L$	-90°
	相位差	反相
	相位差	反相
(b)	路径 $S-1-2-L$	$+90^\circ + 90^\circ - 90^\circ + 90^\circ = +450^\circ$
	路径 $S-2-L$	$-90^\circ - 90^\circ + 90^\circ = -90^\circ$
	相位差	反相
	相位差	同相
(c)	路径 $S-1-2-L$	$+90^\circ + 90^\circ + 90^\circ + 90^\circ = +450^\circ$
	路径 $S-2-L$	$-90^\circ - 90^\circ + 90^\circ = -90^\circ$
	相位差	反相
	相位差	同相

由表 1 可知,图 3(a)在阻带两边各产生一个零点,图 3(b)在阻带低端产生一个零点,图 3(c)在阻带高端产生一个零点。

2 设计实例

下面以两级同轴介质滤波器为例详细说明设计步骤,滤波器的技术参数如下:中心频率为 900 MHz,通带带宽 10 MHz,偏离中心频率

20 MHz处产生传输零点。

设同轴介质谐振器的特性阻抗为 $8\ \Omega$, 根据滤波器的设计理论^[1], 选择通带波纹为 0.1 dB 的切比雪夫低通原型, 归一化参数为: $g_0 = 1.000\ 0$, $g_1 = 0.843\ 0$, $g_2 = 0.622\ 0$, $g_3 = 1.355\ 4$ 。 k_{12} 和外部 Q_c 值分别为

$$k_{12} = \frac{b\omega}{f_0 \sqrt{g_1 g_2}} \quad (1)$$

$$Q_c = \frac{f_0}{b\omega} g_0 g_1 \quad (2)$$

式中 $b\omega$, f_0 分别为滤波器的带宽和中心频率。经过计算得 $k_{12} = 0.015$, $Q_c = 76$ 。

图 4 为电路模型, PLC1 和 PLC2 为介质谐振器的等效电路, PS2、PS1 和 PS3 为移相器, 表示谐振器间的耦合、谐振器与源(或负载)间的耦合, 相移为 $+90^\circ$ 表示容性耦合, 相移为 -90° 表示感性耦合, 交叉耦合直接用集总电感。图 4(a) 中, 3 个移相器的相移均为 $+90^\circ$, 对应图 3(a); 图 4(b) 中, 当 PS1 和 PS3 均为 $+90^\circ$, PS2 为 -90° 时, 对应图 3(b), 而 PS2 为 $+90^\circ$ 时, 对应图 3(c)。

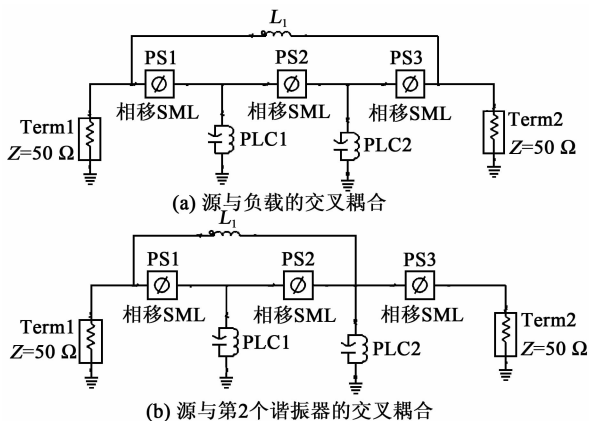
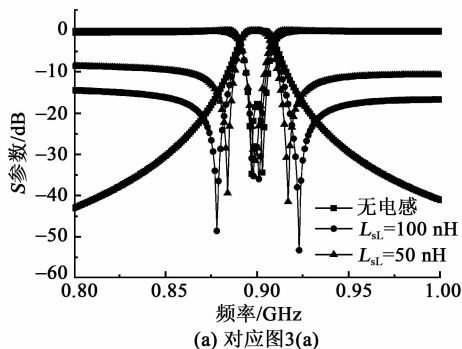


图 4 源与负载交叉耦合滤波器的仿真模型

采用 ADS2009update 对图 4 的模型进行仿真, 仿真波形如图 5 所示。图 5(a) 对应图 4(a) 的波形, 图 5(b) 对应图 4(b) 的波形 (PS2 的相移为 -90°), 图 5(c) 对应图 4(b) 的波形 (PS2 的相移为 $+90^\circ$)。



(a) 对应图3(a)

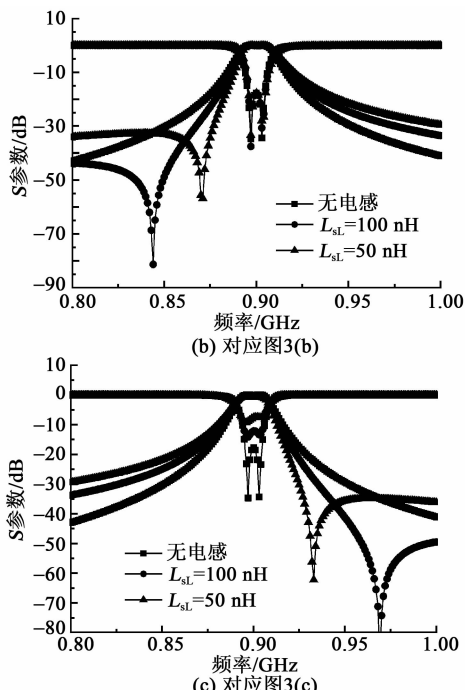


图 5 ADS 仿真波形

从图 5(a)、(b) 可看出, 感性交叉耦合对滤波器的中心频率和反射损耗几乎无影响, 电感量越大, 传输零点离通带越远。但图 5(c) 中, 感性交叉耦合对滤波器的反射损耗有较明显的影响, 这是因为引入交叉耦合后, 滤波器的结构不再对称。只要适当调整其中一个谐振频率和一边的外部 Q 值就可满足滤波器的反射损耗要求。

采用介电常数为 80 的微波介质陶瓷制作两级同轴介质滤波器, 内外表面除一端面外全部涂覆银层, 内径 $\varnothing 1.25\text{ mm}$, 截面尺寸为 $6.5\text{ mm} \times 14\text{ mm}$, 谐振器的长约为 9 mm, 输入、输出采用同轴引线^[10], 谐振器间采用两种耦合、直通孔为磁耦合^[11-12], 开路端的银层间隙为电耦合^[13]。滤波器的结构如图 6 所示, 为了看清滤波器的耦合结构, 将基片与瓷体分开, 基片上焊有贴片电感 (0603 型, ATC 公司), 电感器的一端直接与引线连接, 另一端的连接有两种情况:

1) 与引线相连接, 对应图 3(a) 的 CQ 结构 (见图 6(a))。

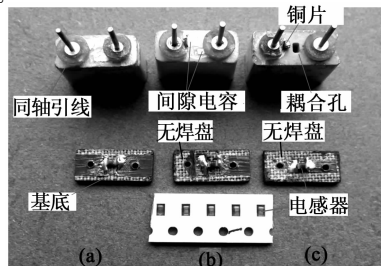


图 6 感性交叉耦合介质滤波器的照片

2) 与内导体伸出来的薄铜片相连接(见图6(b)、(c)),分别对应于图3(c)、(b)的CT结构。用矢量网络分析仪(Agilent E570B)测试滤波器的频响曲线,如图7所示。测试结果表明,传输零点的位置与仿真设计相一致。

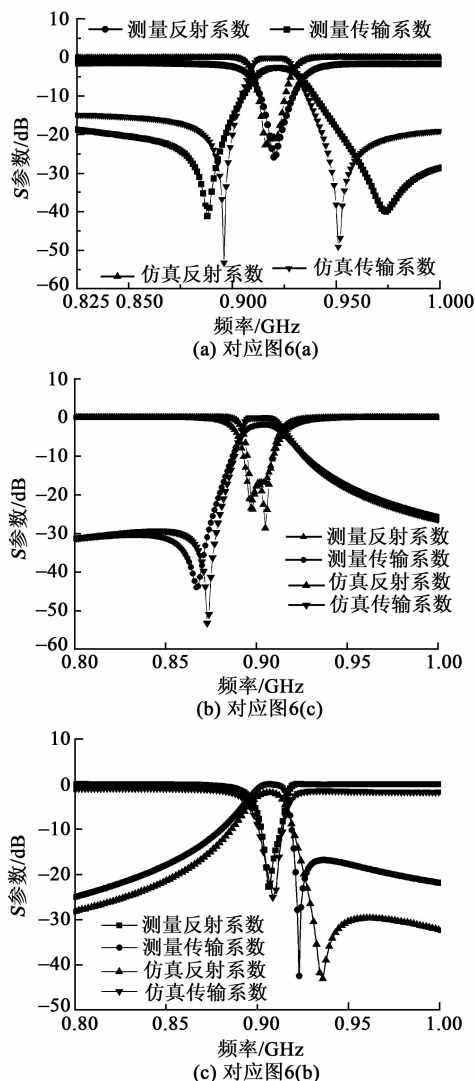


图7 滤波器的仿真与测试曲线

3 结束语

将源和负载看作准谐振器,以贴片电感器作为源与负载或源与第二个谐振器间的交叉耦合元件,两个准谐振器与两个介质谐振器可构成级联四节结构(CQ),可以在阻带两边各产生一个传输零点,一个准谐振器与两介质谐振器可构成级联三节结构(CT),可以在阻带的高端或低端产生一个传输零点,这种处理方法可简化滤波器的设计,滤波器只需按传统方法计算相邻谐振器间的耦合和外部品质因数,采用相位差可快速判断传输零点的位置,不需要编程综合 $(N+2)$ 阶耦合矩阵。采用介电常数为80

的介质陶瓷制作了3个两级滤波器,以贴片电感器作交叉耦合元件,测试结果表明,传输零点的位置与仿真设计相一致。该方法有望推广到三级及以上滤波器的设计。

参考文献:

- [1] HONG J S, LANCASTER M J. Microstrip filters for RF/microwave applications[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 2001.
- [2] WANG H, CHU Q X. An inline coaxial quasi-elliptic filter with controllable mixed electric and magnetic coupling[J]. IEEE Transactions on Microwave and Techniques, 2009, 57(3): 667-673.
- [3] CHEN F C, HU H T, QIU J M, et al. Cascaded triplet filter using mixed electric and magnetic coupling structure with wide stopband performance[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2014, 56(12): 2937-2940.
- [4] LI X, YOU C, YU H, et al. Substrate integrated folded waveguide controllable mixed electric and magnetic coupling structure and its application to millimetre-wave pseudo-elliptic filters[J]. Int J RF Microw Comput Aided Eng, 2016, 27(4): 1-10.
- [5] CAO L, LI Z, CHEN R. Analysis of transmission zeros for coaxial filter with capacitive cross coupling[J]. International Journal of Electronics Letters, 2017, 5(1): 1-12.
- [6] THOMAS BRIAN J. Cross-coupling in coaxial cavity filters—a tutorial overview[J]. IEEE Transactions on Microwave and Techniques, 2003, 51(4): 1368-1376.
- [7] TORABI A, FOROORAGHI K, MANOOCH E H R, et al. Compact microstrip bandpass Filters using dual-mode stubloaded resonators and capacitive/inductive source-load coupling[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2011, 53(9): 2111-2116.
- [8] BASTIOLI S, SNYDER R V. Inline pseudoelliptic-mode dielectric resonator filters using multiple evanescent modes to selectively bypass orthogonal resonators [J]. IEEE Transactions on Microwave and Techniques, 2012, 60(12): 3988-4001.
- [9] CAMERON R J. Advanced coupling matrix synthesis techniques for microwave filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(1): 1-10.
- [10] 曹良足, 殷丽霞. 输入输出电容对孔耦合同轴滤波器性能的影响[J]. 压电与声光, 2012, 34(1): 69-73.
CAO Liangzu, YIN Lixia. Effect of I/O capacitor on properties of two-pole dielectric coaxial filter coupled with a hole[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(1): 69-73.
- [11] 张龙, 刘良芳, 陈世钗, 等. 1 616 MHz 微波介质滤波器的设计及制作[J]. 压电与声光, 2011, 33(4): 509-512.
ZHANG Long, LIU Liangfang, CHEN Shichai, et al. Design and fabrication of microwave dielectric filter application at 1 616 MHz[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(4): 509-512.
- [12] 胡雅洁. 一种混合滤波器组 ADC 对时序误差敏感度研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2016(3): 99-103.
- [13] 吴坚强. 高可靠性贴片式介质滤波器的设计与制作[J]. 压电与声光, 2009, 31(5): 664-666.
WU Jianqiang. Design and manufacture of SMD dielectric filter with high reliability[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(5): 664-666.