

文章编号 1005-0388(2005)05-0566-04

低温共烧陶瓷(LTCC)四级低通滤波器设计*

墨晶岩 马哲旺

(上海大学通信与信息工程学院, mojingyan@sohu.com, 上海 200072)

摘 要 提出了一个结构紧凑,具有两个传输零点和优良频响特性的四级 LTCC 低通滤波器,并用场路结合的方法完成其设计。在经典切比雪夫四级低通滤波器的并联电容支路中增加一个电感,并进一步在 1、3 级串连电感支路之间引入交叉耦合,成功地在滤波器的通带附近产生了两个传输零点,形成了陡峭的衰减曲线。传输零点的位置可以通过改变谐振支路的 L、C 值或控制 1、3 级串连电感的间距来灵活移动,实现了通常需要五级椭圆函数低通滤波器才能达到的频响特性。提出的电路结构减少了电路元件的个数和复杂性,降低了滤波器的插入损耗。在分析集总参数等效电路的基础上,最后用电磁场仿真软件完成了整个电路的设计和频响分析。

关键词 低通滤波器,低温共烧陶瓷,传输零点,阻带

中图分类号 TN91

文献标识码 A

Design of an LTCC four-pole lowpass filter with two transmission zeros in its stopband

MO Jing-yan MA Zhe-wang

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University,
mojingyan@sohu.com, Shanghai 200072, China)

Abstract a novel low temperature co-fired ceramic (LTCC) four-pole lowpass filter with compact size and excellent frequency property is designed in this paper. Two transmission zeros are introduced in its stopband. In the conventional equivalent circuit of a four-pole Chebyshev lowpass filter, an inductor is added to the shunt capacitor to form a series L-C resonator, which produces the first transmission zero nearby the passband and makes a sharp rate of attenuation. The second transmission zero is yield by moving the first and third inductors closer so that cross couplings occur between these two inductors. The positions of the two transmission zeros can be adjusted easily, and a frequency response better than that of a five-pole elliptic filter is obtained with a smaller number of circuit elements, a simpler circuitry, and lower insertion losses. The physical dimensions of the filter and its frequency response are obtained by using a full-wave electromagnetic simulator.

Key words LPF, LTCC, TZ, stopband

1 引 言

近年以移动电话为代表的无线通信得到了快速

发展和普及。为了有效利用有限的频谱资源,提高通信质量,研制高性能的射频与微波滤波器便成为一项紧迫的技术课题和市场需求。利用低温共烧陶

* 收稿日期:2004-06-13. 基金项目:国家自然科学基金资助项目(GP60271029)

瓷技术(LTCC)制造的各种高频器件,包括射频与微波滤波器,由于尺寸小、性能好、可靠性高、成本低等优点,近年来受到众多关注^[1~5]。

无线双频通信系统中,在设计用于分开两个通信频段的开关模块时,需要设计一个独立的低通滤波器。该文设计考虑的低通滤波器工作在 GSM900 和 DCS1800 的频段,具体的指标要求是:在 960MHz 以下的低通频段,插入损耗小于 0.5dB,驻波比低于 1.6;在 1710MHz~1880MHz 阻带频段,衰减大于 20dB。该文结合 LTCC 技术来完成这个滤波器的设计,所用陶瓷材料的相对介电常数是 27,损耗正切是 0.001(由国内某电气公司提供材料数据)。

2 滤波器的设计

根据上面提出的指标要求,从低通原型滤波器^[6]出发,设计截止频率为 960MHz,带内波纹为 0.01dB,级数为 4 级的切比雪夫低通滤波器。得到的集总等效电路如图 1 所示,图中各元件值如下: $L_1 = 5.909\text{nH}$, $C_2 = 3.98\text{pF}$, $L_3 = 10.95\text{nH}$, $C_4 = 2.147\text{pF}$ 。等效电路的频率响应曲线如图 2 所示。

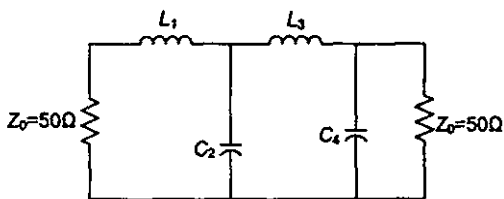


图 1 四级切比雪夫响应低通滤波器集总参数电路

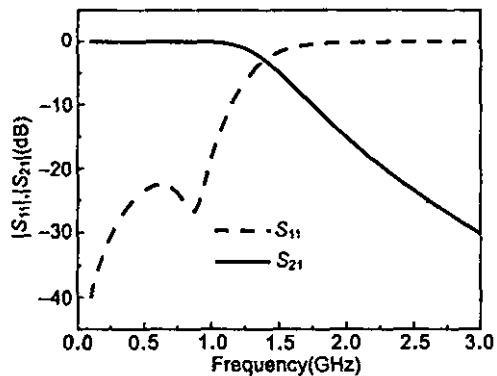


图 2 四级切比雪夫低通滤波器频响曲线

图 2 的频响特性显示,虽然在通带内信号反射损耗在 20dB 以下满足指标要求,但是在要求的阻带范围内,传输衰减没有达到 20dB 的指标要求。为此考虑在阻带内引入传输零点来改善滤波器在阻

带内的频响特性。如图 3 所示,将滤波器电路中第 4 级的 C_4 替换成一个由 L'_4 和 C'_4 串联的谐振支路,其谐振频率 $f_{p1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'_4C'_4}}$ 为欲引入的在阻带低端附近的传输零点频率。为避免电路变形后通带内的反射损耗增大很多,替换时要保持替换前后支路的阻抗在截止频率 $f_c = 960\text{MHz}$ 上不变,即

$$\frac{1}{2\pi f_c C_4} = \frac{1}{2\pi f_c C'_4} - 2\pi f_c L'_4$$

当设定 f_c 为 1.5GHz 时,得到 $L'_4 = 8.881\text{nH}$, $C'_4 = 1.268\text{pF}$ 。图 4 是电路做过替换之后的频率响应曲线。

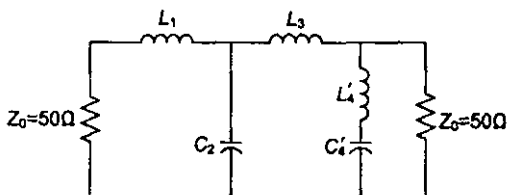


图 3 引入一个传输零点的低通滤波器电路

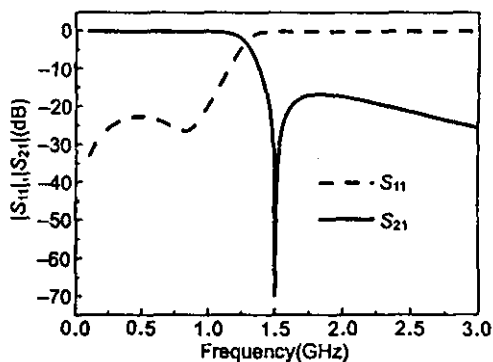


图 4 在 1.5GHz 引入一个传输零点后的滤波器频响曲线

由图 4 中的频响曲线可以看出,正如预期在 1.5GHz 出现了一个传输零点。由于在把电容支路替换成 LC 谐振支路时,变换前后在截止频率处的支路阻抗保持不变,所以与 4 级切比雪夫低通滤波器的频响(图 2)相比,截止频率以下的通带内频率响应变化不大。但是,尽管在传输零点 1.5GHz 附近信号衰减很大,但是随着频率的增大, $|S_{21}|$ 的曲线很快就上升到 -20dB 以上。 $|S_{21}|$ 低于 -20dB 的频带很窄,仍然不能很好地满足滤波器在阻带的带宽指标要求。而且在实际电路制作过程中,加工误差会使零点位置有所偏移,难以保证产品的合格率。当然可以用同样方法将 C_2 也替换成由 L'_2 和 C'_2 组成的第二个串联谐振支路来产生第二个传输零点,或者通过增加低通滤波

器的级数来达到增加衰减的目的。但是无论是增加谐振支路个数还是增加低通滤波器的级数,都需要在现有的电路上增加元件的个数,从而会进一步增加电路的复杂性和产品的制造成本。

在利用多层 LTCC 技术构建小型电路器件时,由于元件的排列非常紧密,互相之间的电磁耦合作用较强,往往会造成电路特性的恶化,在设计与制作中需要特别加以注意。在这个低通滤波器的设计中,反过来充分利用元件间的电磁耦合,以便在阻带内产生第二个传输零点。具体来说就是将电感 L_1 和 L_3 靠近排列,从而引入交叉耦合,这样可以在阻带内产生另一个传输零点而不额外增加电路元件。

用电磁场全波分析软件 Sonnet em^[7] 构建的多层 LTCC 低通滤波器的一部分如图 5 所示。图中实线是该层电感导线的排列,虚线是其他层电路元素排列的投影。图中左边的螺旋为电感 L_1 ,右边的螺旋为电感 L_3 ,两个螺旋的长边相互靠近,间距为 d ,通过电磁场相互耦合。这个物理电路的等效集总电路示于图 6,其中 M_{13} 代表 L_1 、 L_3 间的电磁耦合。通过引入交叉耦合 M_{13} ,从而可以产生另外一个传输零点。而且可以改变图 5 中间距 d 的大小控制 L_1 、 L_3 之间交叉耦合的强弱,进而调节由此产生的传输零点的位置。

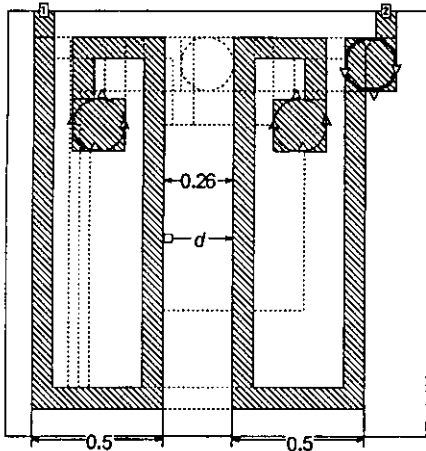


图 5 电磁场仿真软件中电感 L_1 与 L_3 的排列

根据图 6 所示的等效电路,由 Sonnet em 构成的低通滤波器结构如图 7 所示。整个电路物理模型完成的尺寸为 $1.6 \times 1.6 \times 0.7 \text{mm}^3$,共计 4 层,在电路的设计中:线宽最小为 0.1mm ,通孔直径为 0.2mm ,最小间距为 0.1mm ,模型的四周和上下底面是接地屏蔽的金属面。这种精度的电路尺寸利用现有 LTCC 的工艺完全可以制成。图 7 电路中的对地电容 C_2 、

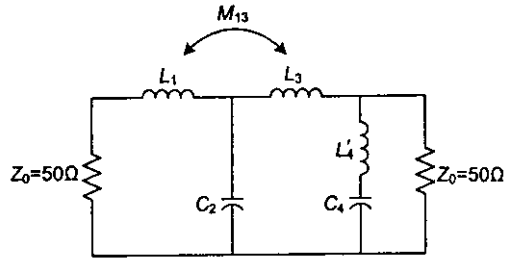


图 6 具有两个传输零点的低通滤波器等效电路

C_4 是利用大面积低阻贴片与地之间的耦合区域来实现的。电感 L_1 、 L_3 分别是用两层高阻线(线宽 0.1mm)绕制的螺旋构成,螺旋之间由通孔连接。两电感平行并排放置,距离很近($d=0.26 \text{mm}$)使得由两个电感产生的电磁场互相耦合,由此产生电路需要的交叉耦合 M_{13} 。滤波器第四级的串联谐振电路中的 L_4 用一段高阻线的电感构成。

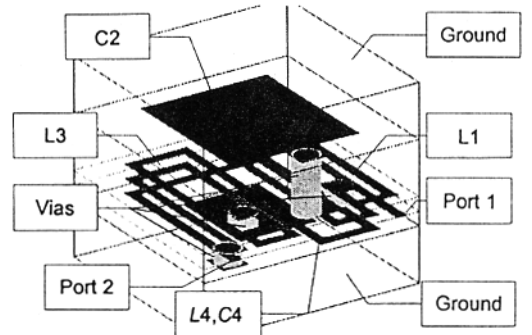


图 7 电磁场仿真软件中具有两个传输零点的四级 LPF 的结构

在用 Sonnet em 完成图 7 中滤波器各部分元素 L、C 的计算设计后,得到各部分的尺寸。进一步用 Sonnet em 计算端口 1(port1)和端口 2(port2)之间滤波器的频响特性,得到图 8 所示曲线。可以看到,除在 1.6GHz 出现了由串联谐振支路产生的第一个传输零点之外,在 1.9GHz 还出现了由交叉耦合产生的第二个传输零点。 $|S_{21}|$ 的衰减大于 20dB 频率范围是 $1.48 \text{GHz} \sim 2.2 \text{GHz}$,在设计指标指定的频段 $1.71 \text{GHz} \sim 1.88 \text{GHz}$ 范围内, $|S_{21}|$ 的衰减已大于 30dB ,完全满足了指标在阻带的要求;同时在 960MHz 以下的通带范围内,反射损耗虽有所增大,但也仍然满足指标。

由于可以通过控制 L_1 、 L_3 之间的交叉耦合强度来改变第二个传输零点的位置,所以最后改变 L_1 、 L_3 的间距 d 来考察传输零点位置的变化。如图 9 所示,

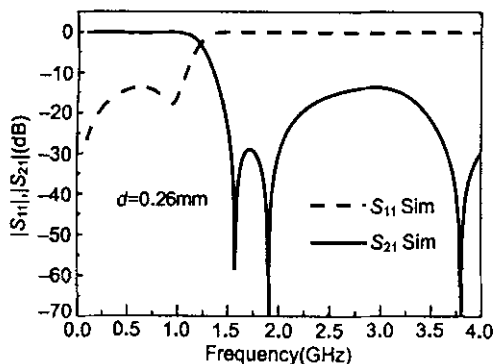


图 8 具有两个传输零点的低通滤波器的频响特性

当 L_1 、 L_3 之间间距 d 从 0.35mm 减小到 0.2mm 时, 随着耦合的加强, 传输零点频率由低向高移动, 同时阻带内 $|S_{21}|$ 衰减在 20dB 以上的范围从 1.48GHz~2.12GHz(频宽 0.64GHz)变化到 1.48GHz~2.29GHz(频宽 0.81GHz)。另外在通带内的反射损耗 $|S_{11}|$ 随着电感间距的变化几乎没有出现什么变化。

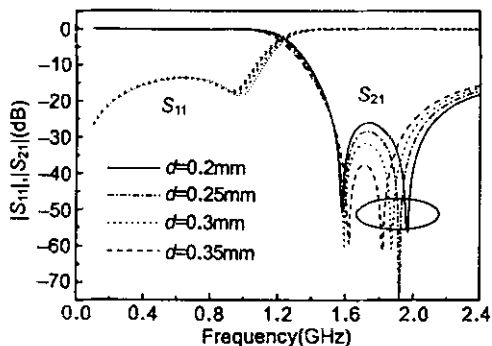


图 9 利用传输零点调整低通滤波器的阻带衰减特性

3 总结

用电磁场全波分析软件成功地设计了一个具有两个传输零点的小型多层 LTCC 低通滤波器。通过对四级切比雪夫低通滤波器作适当变形, 在保证通带内良好频率响应的同时, 用引入谐振支路和引入交叉耦合两种形式在阻带内要求的频率上产生了两个传输零点。第一个传输零点可以设置在通带附近, 从而产生陡峭的频响曲线。而第二个传输零点的位置可以方便地通过改变两个电感的间距来调整, 从而获得需要的阻带宽度。电感间距的变化基本上不影响通带内的频率响应特性。这样的电路结构在设计上有很大的自由度, 在实际调节上也很方便; 很容易产生具有阻带带宽为 810MHz (1480MHz~2290MHz), 阻带衰减大于

20dB 的低通滤波器。拥有这么宽的阻带带宽使得这个低通滤波器可以广泛地使用于 GSM 和 DCS-1800、PCS-1900、CDMA2000 等多种通信系统中。

参考文献

- [1] M F T Ishizaki, H Kagata, T Uwano, *et al.*. A very small dielectric planar filter for portable telephones [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1994, 42(11): 2017~2022.
- [2] J W Sheen. LTCC-MLC duplexer for DCS-1800 [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1999, 47(9): 1883~1890.
- [3] S K H Miyake, T Ishizaki, K Ogawa, *et al.*. A Laminated band elimination filter using coupled line resonators suitable for compact portable telephones[C]. Asia Pacific Microwave Conference Digest, 1998, TU1b-4: 85~87.
- [4] R Lucero, W Qutteneh, A Pavio, *et al.*. Design of an LTCC switch diplexer front-end module for GSM/DCS/PCS applications[C]. 2001 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium Digest, 2001, TUE3F-3: 213~216.
- [5] 王学东, 李英, 姬五胜. 带有耦合电容的多层陶瓷带通滤波器[J]. 电波科学学报, 2003, 18(5): 550~552. X D Wang, Y Li, W S Ji. Multilayer ceramic bandpass filter with coupling capacitor[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(5): 550~552.
- [6] G L Matthaei, L Young, and E M T Jones. Microwave filter, Impedance-matching network, and coupling structures [M]. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [7] Sonnet. Suite, Ver. 8. 0. Liverpool, NY: Sonnet Software, Inc., 2002.

墨晶岩 (1977—), 男, 江苏人, 在上海大学攻读电磁场与微波技术硕士学位, 从事微波滤波器的小型化及天线开关模块的研究工作。

马哲旺 (1964—), 男, 安徽人, 教授, 博士。多年来一直从事计算电磁学, 微波毫米波电路, 以及微波毫米波介质材料和高超导电子学的研究。任美国 IEEE Transactions on MTT 以及 IEEE Microwave and Wireless Components Letters Editorial Board 委员、日本电子信息通信学会期刊 IEICE Transactions on Electronics Editorial Board 委员, 日本电子信息通信学会微波专业委员会委员, 日本微波仿真专业委员会委员。1998APMC(亚太地区微波国际会议)技术委员会委员, 2002APMC 执行委员会委员。

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，致力和专注于微波、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/>