

三个传输零点的三阶 LTCC Ka-band 窄带滤波器

金煜峰 王志刚 延波 徐锐敏
(电子科技大学电子工程学院, 成都 611731)

摘要: 本文介绍了一种基于 LTCC (低温共烧陶瓷) 技术的 Ka 波段三阶窄带滤波器, 中心频率 35.78GHz, 带宽 0.8GHz (2.24%), 带内插损小于 0.1dB (未考虑介质和金属损耗)。并且在输入输出端口、各枝节之间引入交调耦合分量, 在带外形成三个传输零点, 带外抑制 EM 仿真结果为: >20dB@>36.9GHz, >30dB@<34.9GHz。此滤波器可用于毫米波收发组件中, 对镜频信号和杂波进行抑制。

关键词: 低温共烧陶瓷; 带通滤波器; Ka 波段; 传输零点

A Ka-Band Third-Order LTCC Narrow Bandpass Filter with Three Transmission Zeros

JIN Yu-feng, WANG Zhi-gang, YAN Bo, XU Rui-min

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: A LTCC (low-temperature co-fired ceramic) narrow bandpass filter of Ka-band is presented. The filter has a 2.24% fractional bandwidth with the center frequency at 35.78GHz, and its Insertion Loss is better than 0.1dB (any metal or substrate loss is ignored). With increasing the cross-coupling among stubs, the input and output ports, the filter has three transmission zeros. Using the EM simulation, the excellent depression is higher than 20dB above 36.9GHz, and higher than 30dB below 34.9GHz. This filter is used in the millimeter-wave T/R module for rejecting the mirror frequency and spurious responses.

Key words: LTCC (low-temperature co-fired ceramic); bandpass filter; Ka-band; transmission zero

引言

近年来, 随着无线通信技术的高速发展, 对带通滤波器的集成度、小型化的要求越来越高。LTCC 采用多层生瓷带, 是三维布局的立体结构, 可以充分利用空间优势, 实现系统的小型化与集成化^[1]。

对于工作在 8mm 的滤波器, 最近的一些研究主要集中在 SIW (介质集成波导) 上, 因为它有很高的 Q 值并且可以集成在平面电路中。但受到国内 LTCC 加工工艺的限制, 电路基板上的通孔呈不规则形状并且对于孔径和孔间距有很高的工艺要求, 所以一种相对具有高 Q 值的传输形式-带状线成为毫米波窄带滤波器研究中的重要对象。

本文利用 LTCC 的特点, 设计了一种带有三个传输零点的毫米波窄带滤波器, 中心频率 35.78GHz, 带宽 0.8GHz (相对带宽 2.24%), 带内插损 0.1dB (未考虑介质和金属损耗); 带外抑制 >20dB@>36.9GHz, >30dB@<34.9GHz。信号以带状线的形式传输, 最后通过同层带状线-微带的过渡, 将输入输出过渡到微带。

1 滤波器的理论分析

1.1 带通滤波器设计原理

集总元件低通原型滤波器是现代网络综合法设计微波滤波器的基础, 低通、高通、带通和带阻微

波滤波器的传输特性大都是根据此原型推导出来的^[2]。文献[3]给出了谐振器加 K(J)变换器的设计原理。本文主要用外部 Q_e 值和耦合系数 M 的设计方法进行设计。

所谓终端的外界 Q_e 值, 就是终端电阻反射到第一个串联谐振器 (或第 n 个) 中所得出的 Q 值。因此两端的外界 Q_e 值为 (R_A 、 R_B 代表终端负载) :

$$(Q_e)_A = \frac{\chi_1}{K_{01}^2/R_A} = \frac{g_0 g_1}{bw} \quad (1)$$

$$(Q_e)_B = \frac{\chi_n}{K_{n,n+1}^2/R_B} = \frac{g_0 g_1}{bw} \quad (2)$$

式(1)中, g_0 、 g_1 为低通原型初值, bw 为相对带宽。

中间任意两个相邻谐振器的耦合系数 $M_{j,j+1}$, 其定义是两相邻谐振器间的耦合阻抗 $K_{j,j+1}$ 与它们感抗斜率的几何平均值 $\sqrt{\chi_j \chi_{j+1}}$ 之比, 即式(3):

$$M_{j,j+1} = \frac{K_{j,j+1}}{\sqrt{\chi_j \chi_{j+1}}} = \frac{bw}{\sqrt{g_j g_{j+1}}} \quad (3)$$

采用这种设计方法, 一方面由低通原型归一化元件值与设计目标参数计算出外部 Q 值和耦合

系数 M 值, 另一方面选取合适的耦合结构来实现这样的端耦合和级间耦合, 完成设计指标。该过程可借助



图 1 传统端耦合滤波器结构图

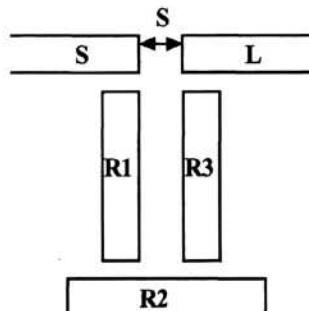


图 2 折叠型端耦合滤波器结构图

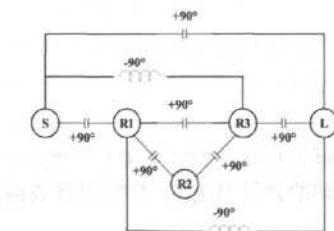


图 3 折叠型端耦合滤波器交叉耦合原理图

HFSS 软件来完成。

1.2 折叠端耦合带通滤波器分析

端耦合带通滤波器属于电容间隙直接耦合半波长滤波器。它利用半波长传输线作为并联谐振器, 端电容为耦合结构。本文对传统端耦合滤波器^[4](图 1)进行改进, 对第一、三谐振器进行折叠, 结构图如图 2。这样在输入 (S)、输出 (L) 端口, 第一谐振器 (R1)、第三谐振器 (R3), S 与 R3, R1 与 L 之间引入多路径传输, 形成传输零点。

下面以耦合相位关系来说明通过引入交叉耦合在滤波器带外高端产生了传输零点。我们一般认为串联电感引入-90 度相差, 串联电容引入+90 度相差, 并联谐振器在谐振点处相移为零, 在谐振频率低端呈现+90 度相差而在谐振频率高端呈现-90 度

相差。交叉耦合越强, 传输零点离通带越近^[5]。

图 3 示意了该滤波器的传输相位关系^[6]。主传输路径为 S-R1-R2-R3-L, 当 $f < f_0$ 时, 相移为 $7*90^\circ = 630^\circ = -90^\circ$, $f > f_0$ 时相移为 $4*90 + 3*(-90) = 90^\circ$; 交叉耦合传输路径 S-R1-R3-L 在 $f < f_0$ 时, 相移为 $4*90 + (90) = 540^\circ = 90^\circ$, $f > f_0$ 时相移为 $3*90 + 2*(-90) = 90^\circ$ 。两条路径在频率 $f < f_0$ 时, 相位相反, $f > f_0$ 时相位相同, 便会在通带低端产生一个传输零点。同样的方法分析其他的传输路径, 路径 S-L 可在通带高端产生一个传输零点, 路径 S-R3-L 和 S-R1-L 由于结构的对称性, 在通带低端产生一个传输零点。

2 滤波器的实现

此滤波器采用 8 层陶瓷结构从上而下 4 至 6 层埋置金属, 衬底材料 Ferro A6, 相对介电常数 ϵ_r 为 5.7, 陶瓷基片厚度 0.094mm。根据带通滤波器的设计理论进行仿真设计, EM 仿真模型如图 4 所示, 其中输入输出结构埋置在第 5 层的上表面, 第一、三谐振器埋置于第 6 层的上表面, 第二谐振器埋于第四层的上表面。

由于增加了多路径传输, 滤波器拥有三个传输零点, 传输零点的位置与一、三谐振器的间距 S 有关, 图 5 反应了间距 S 与传输零点位置的关系。间距 S 越大, 通带左右的两个传输零点离通带越远, 本文滤波器中 $S=0.7\text{mm}$ 。

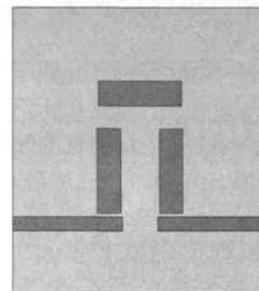


图 4 滤波器 EM 仿真结构图

为了利于滤波器在电路中的应用, 本文将输入输出结构采用同层带状线-微带过渡到微带^[7], 微带采用四层 LTCC 陶瓷基片, 并且在滤波器的四周加上射频通孔, 实现滤波器的良好电磁兼容, 整体仿真模型及结果如图 6 所示。仿真结果显示, 通带 35.25~36.05GHz, 带内 $S_{11} < -20\text{dB}$, 插损小于 0.1dB (未考虑介质、金属损耗), 带外传输零点位于 32.03GHz、34.84GHz 和 37.75GHz 处, 带外抑制良好。

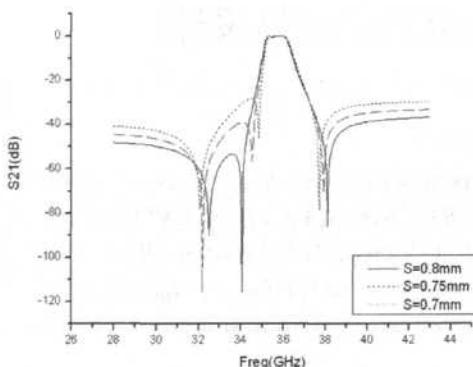
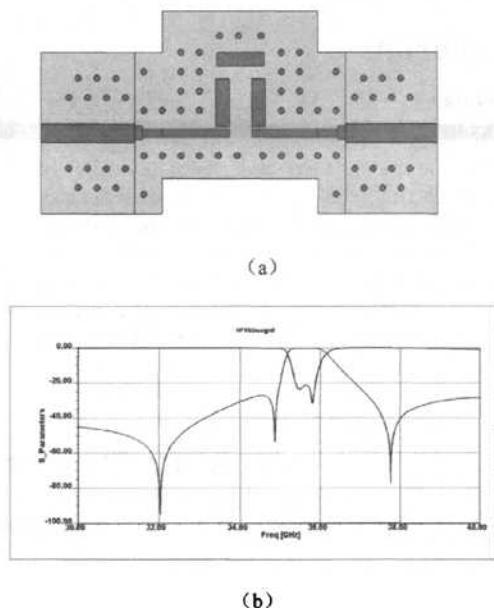
图 5 枝节间距 S 与滤波器传输特性

图 6 滤波器最终结构和仿真结果

3 结论

本文对传统的端耦合滤波器结构进行改进, 通过将谐振单元折叠放置, 并且调节枝节之间的间距在带外形成三个传输零点, 在不增加枝节的情况下增加了阻带的抑制度, 并且利用 LTCC 多层特性,

将枝节放置于不同的层, 结构紧凑, 便于滤波器的实际应用。本文通过一个同层带状线-微带的过渡, 将八层带状线过渡到四层微带线输入输出。该滤波器带宽 2.24%, 带外抑制陡峭, 在毫米波收发组件镜频抑制和杂波抑制中有一定的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Tang Ching-Wen, Lin Yin-Ching, Chang Chi-Yang, Realization of Transmission Zero in Combine Filter Using an Auxiliary Inductively Coupled Ground Plane[J]. IEEE, Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(10):2112-2117.
- [2] Prakash Bhartia. 微波固态电路设计[M]. 郑新, 赵玉洁, 刘永宁等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006: 176-192.
- [3] 张凯. 毫米波 LTCC 收发组件研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
- [4] 李平. 毫米波精确制导收发前端 LTCC 技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [5] 沈大力. 一种 LTCC 毫米波折叠形端耦合带通滤波器 [J]. 西安: 全国微波毫米波会议文集, 2009.
- [6] J.Brian Thomas. Cross-Coupling in Coaxial Cavity Filter-A Tutorial Overview[J]. IEEE, Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003, 51(4): 1368-1376.
- [7] 徐鑫. LTCC 毫米波集成传输线的过渡及寄生模式的分析与建模[J]. 成都: 电子科技大学, 2009.

金煜峰 男, 1986 年生, 在读硕士研究生。主要研究方向: 微波毫米波集成电路与系统。

E-mail: doublenessjin@163.com

徐锐敏 男, 1958 年生, 博士生导师, 教授。主要研究方向: 微波毫米波电路与系统, 尤其是非线性固态电路研究。

E-mail: rmxu@uestc.edu.cn

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>