

平面波照射下屏蔽腔内滤波器的分析

范颖鹏, 杜正伟, 龚克, 张肃

(清华大学 电子工程系, 微波与数字通信技术国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 电磁波会通过屏蔽腔上的孔缝耦合到腔内并在电路板上激励起干扰电压, 影响电子器件的正常工作。该文采用时域数值仿真, 计算了一个微带线耦合滤波器分别在自由空间和屏蔽腔内时, 在平面波的照射下端口电压响应, 并通过 Fourier 变换得到频域响应。计算了不同入射电场方向、滤波器在屏蔽腔内的不同摆放位置对端口电压的影响, 得到了各种情况下端口电压随频率的变化曲线。结果表明, 放置在屏蔽腔中时, 受屏蔽腔谐振特性的影响, 滤波器的散射参数会变差, 端口电压的频率响应也由自由空间的连续分布变为分立的谐振峰。在放置电路板时应尽量避免使滤波器的走线方向和开缝的方向垂直, 同时还要考虑不同位置对端口电压的影响。

关键词: 屏蔽腔; 微带滤波器; 耦合; 电压响应

中图分类号: TN 822.8; TN 813

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2005)10-1344-04

Analysis on microstrip filter in the shielding enclosure illuminated by a plane wave

FAN Yingpeng, DU Zhengwei, GONG Ke, ZHANG Su

(State Key Laboratory on Microwave and Digital Communications,
Department of Electronic Engineering, Tsinghua University,
Beijing 100084, China)

Abstract: Electromagnetic waves couple into shielding enclosures through slots and apertures to induce voltages on the circuit board that interfere with the electric components. This paper presents an analysis of the port voltage of a microstrip filter in the free space and in the enclosure illuminated by a plane wave. Time domain simulation is used, and the frequency response is calculated using Fourier transform. The influences of various electric field directions and positions in the enclosure are also analyzed to calculate the voltage variations with frequency. The results show that the resonance characteristics of the enclosure adversely affect the scattering parameter, with the port voltage frequency response varying from continuous to a group of individual resonant peaks. Circuit boards should be placed so that the filter microstrip is not perpendicular to the slot. The influence of the various positions in the enclosure should also be considered.

Key words: shielding enclosure; microstrip filter; coupling; voltage response

电磁波对屏蔽腔内电子电路的干扰是电磁兼容研究中的一个重要内容。电磁波会通过屏蔽腔上的孔缝进入到腔内, 并耦合到电路板上, 激励起干扰电压, 影响电子系统的正常工作。对开有孔缝的屏蔽腔的研究工作有很多^[1,2], 如矩量法(MOM)^[3,4], 时域有限差分法(FDTD)^[5,6], 等等。研究结果表明, 电磁波穿过孔缝时, 会有共振效应和增强效应^[7], 增加了对屏蔽腔内的干扰。但是, 对于在屏蔽腔内放有电路板的研究却较少。本文计算了一个耦合滤波器在自由空间及屏蔽腔内时, 在平面波照射下的端口电压响应, 以及在屏蔽腔中不同位置时, 端口电压响应的变化, 以便对可能产生的危害进行预测和预防。

1 自由空间中滤波器的端口电压响应

图 1 所示为计算用的耦合滤波器, 介质板的厚度为 1 mm, 介电常数为 $\epsilon_r=4.3$, 介质板的大小为 110 mm \times 20 mm。激励源为沿 z 轴入射的平面波, 电场方向分别取为与 x 轴和 y 轴平行。入射脉冲幅度为 1 V/m, 随时间的变化为高斯脉冲, 采用时域数值仿真并通过 Fourier 变换来计算频域端口电压。滤波器的输入和输出端口都接有 50 Ω 的电阻(通带匹配), 用来模拟实际电路中的负载。为了保证计算精度, 每波长内划分 15 个网格, 并采用非均匀网格划分, 最大与最小网格尺寸之比为 10。

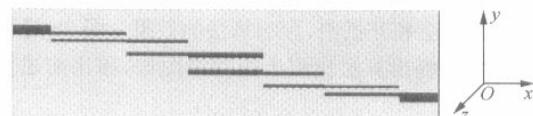


图 1 耦合滤波器示意图

图 2 所示为此滤波器的散射参数 S_{21} , 其通带

收稿日期: 2004-11-16

基金项目: 国家“八六三”高技术项目

作者简介: 范颖鹏(1976-), 男(汉), 江西, 博士研究生。

通讯联系人: 龚克, 教授, E-mail: gongk@tsinghua.edu.cn

的中心频率为 2.23 GHz, 而且在频率为 4.36 GHz 处还有一个高阶的通带。滤波器在平面波照射下的端口电压响应如图 3 所示。可以看出, 不同入射电场方向下, 端口电压的频率响应很不一样。对于入射电场方向平行于 x 轴, 即和滤波器的走线方向一致时, 在 2.048 GHz 处电压响应有一个峰值, 幅度为 12 mV, 这个峰值正好处于滤波器的通带边缘上, 幅度较大。在 1.143 GHz 处还有一个较小的峰值, 幅度为 4.4 mV。这两个干扰电压都比较大, 若入射脉冲是一幅度为 1 kV/m 的高功率微波脉冲, 则干扰电压可以达到 12 V 和 4.4 V。对于一些低功耗的电子设备, 其正常工作电压一般也只有 3 V 左右, 这样大的干扰电压完全可能影响到它的正常工作。当入射电场方向平行于 y 轴, 即和滤波器的走线方向垂直

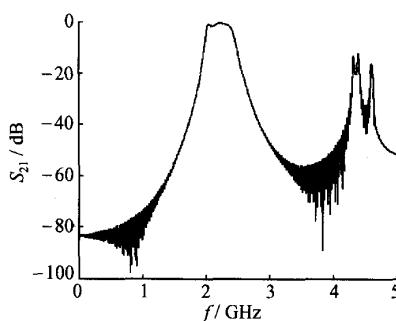
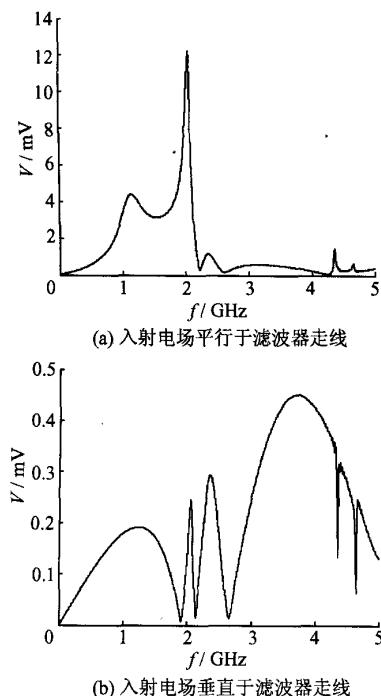
图 2 滤波器的 S_{21} 参数

图 3 滤波器端口负载电压随频率的变化曲线

时, 激励起来的端口电压最大值为 0.45 mV, 远小于入射电场方向平行于 x 轴的情况, 而且在滤波器的阻带激励起来的电压要大于在通带内激励起来的电压, 这和电场方向平行于 x 轴时是相反的。

2 滤波器放入屏蔽腔内时的端口电压响应

在实际应用中, 更为普遍的情况是滤波器放在屏蔽腔中, 研究这种情况下端口电压响应也更有实际意义。滤波器放在屏蔽腔中的示意图如图 4 所示, 即把图 1 所计算的滤波器放置于一个开有窄缝的屏蔽腔内, 窄缝位于屏蔽腔前壁中央, 滤波器电路板与 z 轴垂直, 位于 xy 平面的中心, 长边平行于 x 轴, 短边平行于 y 轴。屏蔽腔大小为 300 mm \times 160 mm \times 300 mm, 滤波器在屏蔽腔内的位置可以沿 z 轴变化。入射波设为平面波, 电场极化方向设为和 x 轴平行和 y 轴平行两种情况, 滤波器的参数不变。

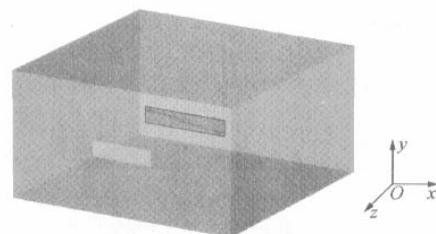
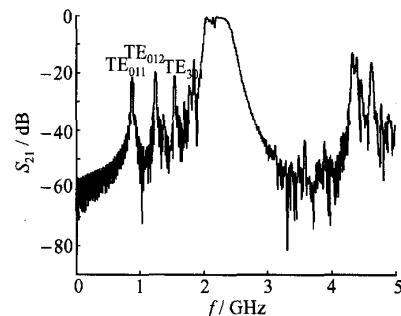


图 4 滤波器放入屏蔽腔内示意图

图 5 所示是将滤波器放置在屏蔽腔的中央时, 滤波器 S_{21} 参数的变化。与图 3 相比, 可以看出, 低频时滤波器的阻带抑止变差, 减小了约 20 dB, 而且受屏蔽腔谐振模式的影响, 出现了一些谐振峰。前三个谐振峰的频率为 0.89 GHz、1.25 GHz 和 1.55 GHz, 分别对应本征模 TE_{011} 、 TE_{012} 和 TE_{301} 。受屏蔽腔内滤波器的影响, 这三个谐振峰的频率和理想谐振腔相比, 分别向低频方向移动了 0.17 GHz、0.12 GHz 和 0.03 GHz。

图 5 放入屏蔽腔中的滤波器的 S_{21}

考虑滤波器放置在屏蔽腔底部时端口电压的变化,即滤波器的接地面和屏蔽腔的后壁重合。设腔壁上开有大小为 $80\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的单孔。图 6 是滤波器的走线和 x 轴平行,即与窄缝长边平行时,不同入射电场方向下滤波器的端口电压随频率的变化曲线。图 7 是将滤波器旋转 90° ,使滤波器的走线和 y 轴平行,即与窄缝长边垂直时,不同入射电场方向下滤波器的端口电压随频率的变化曲线。

可以看到,此时的频谱分布特性和自由空间很不一样。在自由空间时是连续分布的,但放入屏蔽腔后,由于只有屏蔽腔的本征模才能存在于屏蔽腔内,因此端口电压的频谱分布也变为分立的。图中大的谐振峰都对应屏蔽腔的本征模。

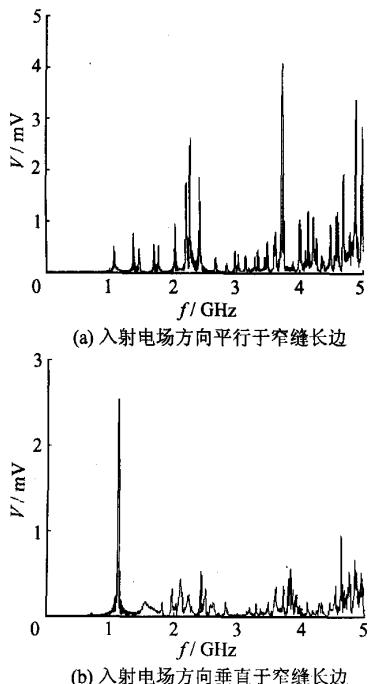


图 6 滤波器走线平行于窄缝长边时端口电压随频率的变化曲线

比较以上不同结果可以看出,当滤波器的走线方向和窄缝方向平行时,无论入射电场方向是平行于窄边还是垂直于窄边,激励起来的端口电压最大值相差并不大,分别为 4.06 mV 和 2.52 mV ;而当滤波器的走线方向和窄缝长边垂直时,入射电场垂直于窄缝长边时激励起来的端口电压最大值为 28.8 mV ,远大于入射电场平行于窄缝长边的情况 (0.419 mV)。因此,在屏蔽腔上开有长窄缝时,应尽量避免让滤波器的走线和窄缝长边垂直,因为这

样可能激励起来很大的干扰电压,会严重干扰电子系统的正常工作。

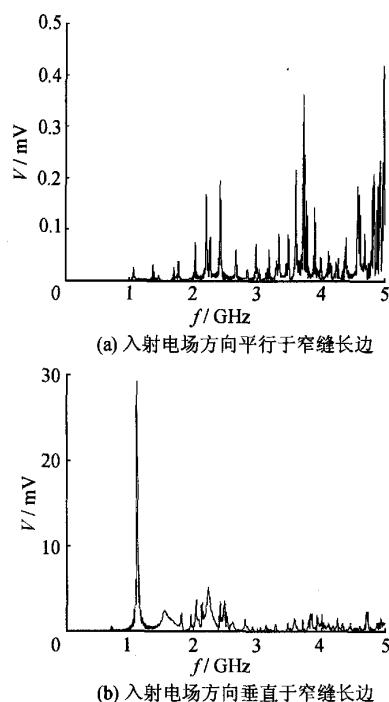


图 7 滤波器走线垂直于窄缝长边时端口电压随频率的变化曲线

3 滤波器位置变化时对端口电压响应的影响

滤波器在屏蔽腔中放置时,位置可能是变化的,并不会固定放在某一位置。因此,保持滤波器在 xy 平面的位置不动,令滤波器的走线平行于 x 轴,并沿着 z 轴移动。在屏蔽腔前壁中心处开有 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的方孔,令 d 表示滤波器离开孔的距离,取 d 分别为 200 mm 、 150 mm 、 100 mm 、 50 mm ,入射电场方向与 x 轴平行,所得结果如图 8 所示。

从以上结果可以看出,在滤波器的通带内都有比较大的谐振峰。 $d=150\text{ mm}$,即滤波器位于屏蔽腔中央时,激励起来的端口电压最大,最大幅度为 15.6 mV ,基本是滤波器在其他位置时电压最大幅度的两倍。可见,在屏蔽腔内放置电路板时,必须充分考虑不同位置对端口电压的影响。

4 结 论

本文采用电磁场数值计算的方法,计算了一个耦合滤波器受平面波照射时,在自由空间和屏蔽腔内两种情况下的端口电压响应。在自由空间时,响应

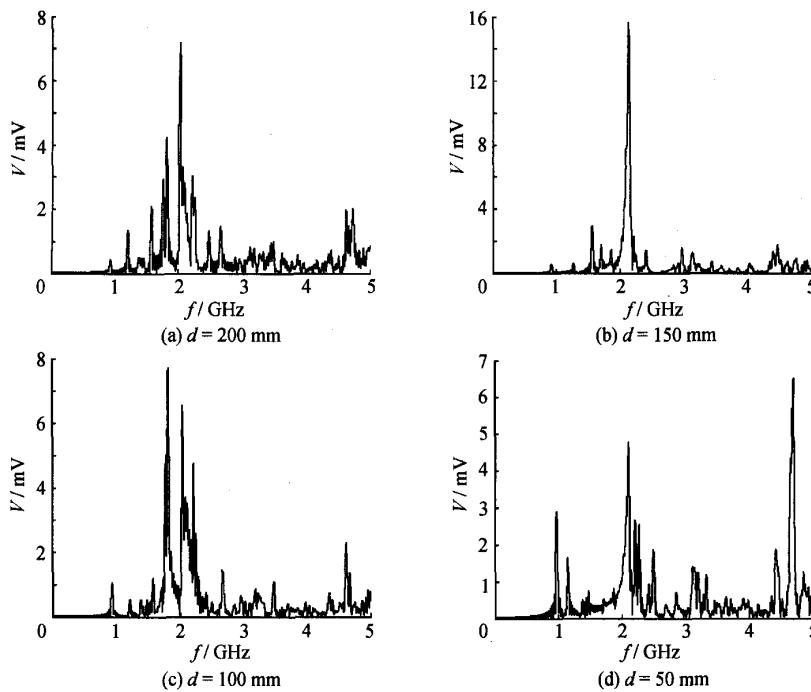


图 8 滤波器端口电压响应随频率的变化曲线

电压频谱为连续的变化,而且入射电场方向与滤波器走线方向平行时,激励起来的端口电压远大于电场方向垂直于滤波器走线的情况。而在屏蔽腔内时,只有在本征模的频率处才会激励起端口电压,频谱分布变为分立的。而且在屏蔽腔内时,低频时的阻带抑止恶化约 20 dB,而且会出现谐振峰,在谐振峰处的抑止更差。可见在屏蔽腔中时,屏蔽腔的谐振特性起主要作用。

当屏蔽腔上开有窄缝时,窄缝方向和不同的入射电场方向对激励起来的端口电压都有影响。当滤波器走线的方向和窄缝的方向垂直时,若入射电场方向垂直窄缝,此时耦合进屏蔽腔内的场较大,而且屏蔽腔内激励起来的电场也平行于滤波器走线方向,因此激励起来的端口电压很大;而当滤波器的走线方向和窄缝长边平行时,激励起来的端口电压都较小。可见,在屏蔽腔放置滤波器时,应尽量避免使滤波器的走线方向和窄缝的方向垂直,同时要考虑不同位置对端口电压的影响。

参考文献 (References)

- [1] Mendez H A. Shielding theory of enclosures with apertures [J]. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 1978, **20**(2): 296-303.
- [2] Li M, Nuebel J, Drewniak J L, et al. EMI from cavity modes of shielding enclosures-FDTD modeling and measurements [J]. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2000, **42**(1): 29-38.
- [3] Audone B, Balma M. Shielding effectiveness of apertures in rectangular cavities [J]. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 1989, **31**(1): 102-106.
- [4] Harrington R F, Mautz J R. Characteristic modes for aperture problems [J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1985, **33**(6): 500-505.
- [5] 王建国, 屈华民, 刘如玉, 等. 孔洞厚度对高功率微波脉冲耦合的影响 [J]. 强激光与粒子束, 1994, **6**(2): 282-286. WANG Jianguo, QU Huamin, FAN Ruyu, et al. Effects of slot depth on couplings of high power microwave pulses [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1994, **6**(2): 282-286. (in Chinese)
- [6] 陈修桥, 张建华, 胡以华. 电磁脉冲与窄缝腔体耦合共振特性分析 [J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(5): 481-484. CHEN Xiuqiao, ZHANG Jianhua, HU Yihua. Analysis on resonant characteristic of electromagnetic pulse coupling into narrow slot and cavity with slot [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(5): 481-484. (in Chinese)
- [7] 王建国, 刘国治, 周金山. 微波孔缝线性耦合函数的研究 [J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(11): 1093-1099. WANG Jianguo, LIU Guozhi, ZHOU Jinshan. Investigations on function for linear coupling of microwaves into slots [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(11): 1093-1099. (in Chinese)

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>