

文章编号 : 1672-2892(2010)01-0019-04

采用电磁带隙和磁性材料的 PCB 电源结构

李 杰, 卞正才*, 张婧婧, 王志良

(复旦大学 通信科学与工程系, 上海 200433)

摘 要: 在印制电路板的设计中, 供电系阻抗谐振所引起的噪声和电磁干扰问题一直是设计人员关注的焦点。已有的研究显示, 适当的电磁带隙(EBG)结构可以有效地降低供电系的电磁干扰。本文通过运用基于快速算法和分解元法的计算机仿真, 研究供电系 EBG 结构中采用磁性材料后的阻抗特性。研究表明, 在供电系内侧增加磁性材料涂层, 能在原有基础上进一步抑制电磁干扰。

关键词: 印制电路板; 电磁带隙; 腔模模型; 供电系阻抗快速算法; 分解元法; 磁性材料
中图分类号: TN304.9 **文献标识码:** A

A power bus structure in PCBs using EBG and magnetic materials

LI Jie, BIAN Zheng-cai*, ZHANG Jing-jing, WANG Zhi-liang

(Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Power bus noise problem and Electromagnetic Interference(EMI) problem caused by resonant impedance have become a major concern for Electromagnetic Compatibility(EMC) engineers engaged in Printed Circuit Board(PCB) design. Previous researches have shown that proper Electromagnetic Band-Gap(EBG) structure would contribute to the EMI reduction for the power bus. In this study, the impedance characteristics of PCB power buses which magnetic materials had adopted in EBG structures were investigated by simulation based on the fast algorithm and segmentation method. It was found that coating the magnetic material onto the inner sides of a power bus could further contribute to the EMI reduction.

Key words: Printed Circuit Board(PCB); Electromagnetic Band-Gap(EBG); cavity-mode model; fast algorithm for power bus impedance; segmentation method; magnetic material

多层印制电路板中, 由电源层和接地层所构成的一对平行金属平面, 称之为供电系。电源层-接地层因谐振引起的高阻抗不仅导致较大的电磁干扰辐射, 而且会产生开关噪声, 影响高速数字电路的信号完整性。为了增强高速信号的完整性, 改善产品的电磁兼容性能, 期望找到能降低 PCB 供电系电磁干扰的方法。

1987 年 Yablonovitch 教授提出光子晶体^[1]概念后, 光子带隙结构(Photonic Band-Gap)特性及其应用为近年来国际研究的热点。把来自光子的概念延伸到微波频率, 称作电磁带隙(EBG)结构。不同介质、金属以及混合体等单元按周期性排列的 EBG 结构, 对特定频率的电磁波具有带阻特性, 能有效地抑制阻带范围内的电磁波, 可以用于抑制电磁干扰。

起源于微波平面电路理论的全腔模模型(Full Cavity-mode Model), 可将矩形供电系表征成一个微波平面多端网路。基于此腔模模型, 作者已发展了用于高效准确计算矩形供电系阻抗的一种快速算法^[2-4]。结合分解元法^[5-7], 这一快速算法能适合于由矩形和直角三角形单元组合而成的形状复杂的供电系几何^[8-9]。

在文献[10]里, 将 EBG 结构应用于 PCB 电源供电系, 并结合上述快速算法和分解元法对其进行仿真, 结果表明, 适当的 EBG 结构也可应用于 PCB 设计中, 能有效地降低 PCB 供电系的电磁干扰。另外, 根据文献[11], 在 PCB 电源供电系采用磁性材料涂层能达到增大表面阻抗的效果, 从而抑制了电磁波的辐射, 也能达到降低供电系电磁干扰的目的。本文中, 结合 EBG 结构和磁性材料涂层, 对 PCB 供电系进行设计分析, 以便进一步抑制电磁波辐射, 降低 PCB 供电系的电磁干扰。

收稿日期: 2009-08-25; 修回日期: 2009-10-27

*通信作者: jasonleedn@gmail.com

1 基于全腔模模型的快速算法

全腔模模型给出了供电系阻抗矩阵的一种解析表述。因为在大多数印制电路板中,电源层和接地层的间距与波长相比都很小,所以只需应用腔模理论来求解满足第二类边界条件(即完全磁壁)的二维亥姆赫兹方程的格林函数^[12],从而通过亥姆赫兹问题的本征函数和本征值求解阻抗矩阵。

考虑如图 1 所示长度为 a 宽度为 b 的矩形供电系结构,在文献[2]中,已发展了一种快速算法用于矩形供电系阻抗的高速计算。快速算法的核心是计算矩形供电系上两个端口之间转移阻抗的一个单重级数表示式。它由矩形供电系阻抗最初由全腔模理论导出的一个双重级数表示式利用傅里叶数的求和公式简化得到,具体可写为:

$$Z_{ij}^{(rec)} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\omega \mu_d h a}{j 2 b} C_n \cos(k_{yn} y_i) \cos(k_{yn} y_j) \text{sinc}^2(k_{yn} w) \frac{[\cos(\alpha_n x_i) + \cos(\alpha_n x_j)]}{\alpha_n \sin \alpha_n} \quad (1)$$

式中: $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$; $k_{yn} = n\pi/b$; $\alpha_n = a\sqrt{\kappa^2 - k_{yn}^2}$; $x_{\pm} = 1 - (x_i \pm x_j)/a$; (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 分别是第 i 个和第 j 个端口在 x 和 y 方向的中心坐标; w 表示比波长小得多的端口的半宽(已假定 x 和 y 方向的相同); h 是电源层和接地层之间的间距,即介质层的厚度; ω 是角频率; 常数 C_n 在 $n=0$ 时为 1, 在 $n \neq 0$ 时为 2; 复量 κ 是考虑了电源层和接地层的导体损耗后的横向波数,考虑由于导体、介质和辐射所产生的损耗, $\kappa = \sqrt{\omega^2 \mu_d \epsilon_d - j 2 \omega \epsilon_d Z_s / h}$, 此处 μ_d 和 ϵ_d 分别是介质的导磁系数和介电常数, Z_s 是导体的表面阻抗。

在文献[2]中介绍了一种解析技巧,使式(1)单重级数的收敛得到进一步加速,只需要计算几项即可达到满意的精度。在双重级数简化为单重级数时,由于近似而产生的误差也可通过两种方法进行补偿。因此,矩形供电系的阻抗可以采用快速算法进行高效准确的计算。

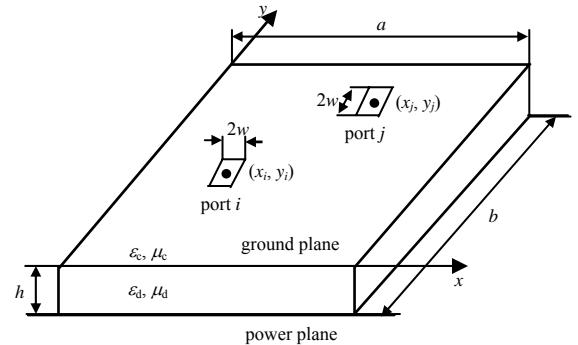


Fig.1 Geometry of a rectangular power bus structure
图 1 矩形供电系几何结构

2 增加磁性材料后的供电系阻抗计算

已经证明^[3],在一定的工作频率下,如果电源层和接地层导体(金属板)的厚度远大于趋肤深度,那么,单位长度和单位宽度下导体的表面阻抗满足:

$$R_s = \sqrt{\pi f \mu_c / \sigma_c} \quad (2)$$

增加了磁性材料涂层后,假设涂层的厚度为 d ,复合层的表面阻抗为^[3]:

$$Z_s = (1+j)R_{sm} \frac{\sinh(x) + \frac{R_{sc}}{R_{sm}} \cosh(x)}{\cosh(x) + \frac{R_{sc}}{R_{sm}} \sinh(x)} \quad (3)$$

式中, $x = (1+j)d/\delta_{sm}$; 趋肤深度 $\delta_{sm} = \sqrt{1/(\pi f \mu_m \sigma_m)}$; 磁性材料涂层的表面电阻 $R_{sm} = \sqrt{\pi f \mu_m / \sigma_m}$; 电源和接地层导体铜的表面电阻 $R_{sc} = \sqrt{\pi f \mu_c / \sigma_c}$ 。因此 $R_{sc}/R_{sm} = \sqrt{\mu_c \sigma_m / (\mu_m \sigma_c)}$, 将这些代入式(3),然后利用供电系阻抗的快速算法^[2],将上述复合层的表面阻抗式(3)代入,即可快速计算增加了磁性材料涂层后的供电系阻抗 Z_{ij} 。

3 仿真方案

图 2 是仿真中采用的 PCB 电磁带隙结构示意图,电路板的尺寸为 $315 \text{ mm} \times 210 \text{ mm}$, 端口 i, j 在 $(15 \text{ mm}, 15 \text{ mm})$ 和 $(300 \text{ mm}, 15 \text{ mm})$ 处, 端口半宽的尺寸为 $W=0.3 \text{ mm}$, 电源层和接地层之间的介质层厚度为 $h=1.6 \text{ mm}$ 。电源层和接地层的导体假定为铜,其导电率为 $\sigma_c = 5.92 \times 10^7 [\text{S/m}]$, 供电系电源和接地面之间的介质层损耗角正切为 0.02。根据文献[11],取磁性材料相对磁导率为:

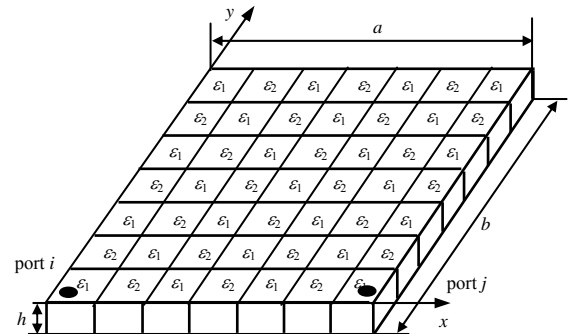


Fig.2 Illustration of EBG structure
图 2 PCB 电磁带隙结构示意图

$$\mu_{\text{m}}(f) = \begin{cases} 50, & 0.001 \text{ GHz} < f < 0.1 \text{ GHz} \\ 55 - 50f, & 0.1 \text{ GHz} < f < 1 \text{ GHz} \\ 5, & 1 \text{ GHz} < f < 2 \text{ GHz} \end{cases} \quad (4)$$

式中： μ_{m} 为相对磁导率，是频率 f 的函数，此种材料的最佳磁性材料涂层厚度 $d = d_{\text{opt}} = 3.5 \mu\text{m}$ 。

根据文献[2]，当频率大于 2 GHz 时，供电系阻抗谐振峰的个数相对较少，阻抗值也相对较小，因此在仿真过程中将计算范围限定在阻抗值较大、谐振峰较多且震荡剧烈的 0 GHz ~ 2 GHz 的频率范围内。

另外，对两端口间的干扰而言，转移阻抗 Z_T 幅频特性的改善显得尤为重要，如果在端口 1 处接入电流源 I_1 ，当源处产生一个小干扰 ΔI_1 ，那么在终端口 M 处所激励起的干扰电压为 $\Delta V_M = Z_T \Delta I_1$ ，在某一频率 f 上， Z_T 越小则 ΔV_M 越小，即产生的干扰越小。因此，当 Z_T 在所考虑频带范围内的谐振峰数越少，带阻特性越明显，则优化效果越好。

文献[1]中，选择了一些介电常数数值具有代表性的材料进行计算分析。结果表明， ϵ_1 与 ϵ_2 的差值越大，所达到的阻带特性越好，所选方案中， $\epsilon_1 = 4.25$ (石英树脂)， $\epsilon_2 = 106$ (二氧化钡) 时的设计方案的谐振峰抑制效果最好，因此选用此种设计结构进行仿真。为了进一步改进设计，我们考虑在实端口处加上一个退耦电容以进一步抑制谐振峰。退耦电容的电容值及寄生等效电感(包括引线和过孔两部分的贡献)和电阻分别为 0.1 μF 、1.4 nH 和 0.2 Ω 。

4 结果与讨论

图 3 是各种情况下的仿真结果：

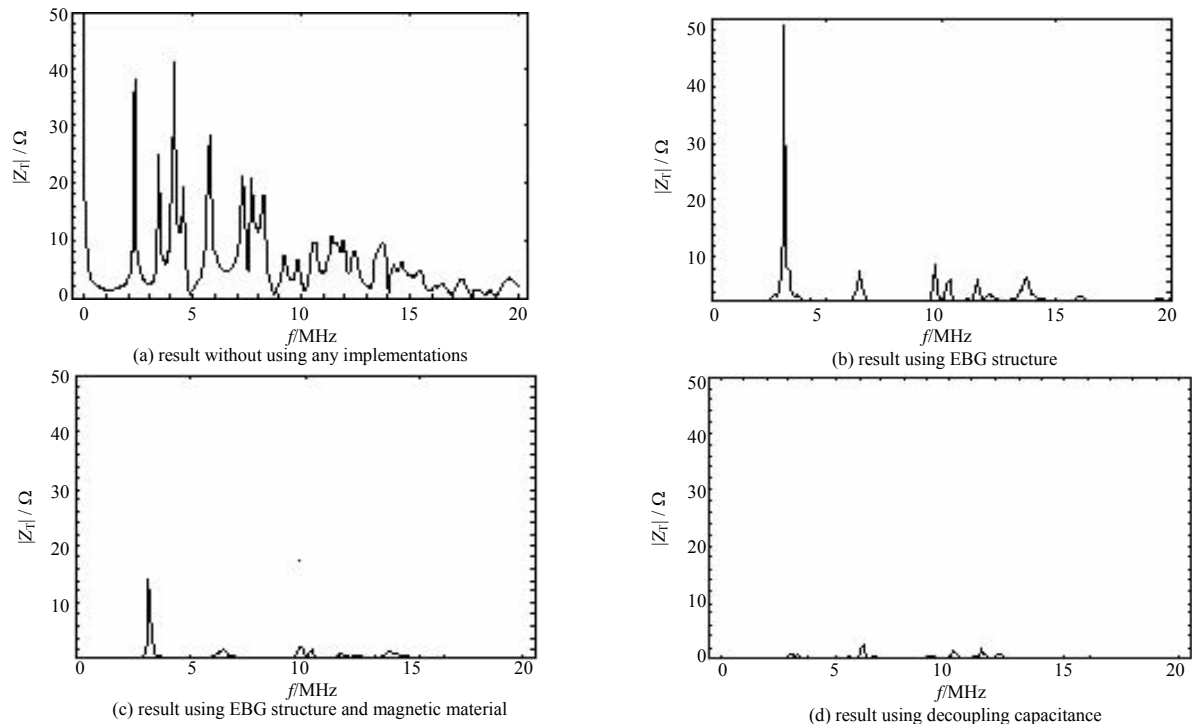


Fig.3 Amplitude-frequency characteristics of Z_T for various cases

图 3 不同情况下的转移阻抗幅频特性

通过对比图 3(a)与图 3(b)，可以发现，采用图 2 所示的“7×7 型”EBG 结构设计的 PCB 板的 Z_T 的阻带特性相当好，除了在 300 MHz 附近有一谐振峰外，其余的频带范围内都呈很强的阻带性。

另外，通过对比图 3(b)与图 3(c)，可以发现，磁性材料能在 EBG 结构产生的效果上进一步改善 PCB 供电系的电磁干扰。因此，横向的电磁带隙结构以及纵向的磁性材料涂层相结合，可以将谐振峰值控制在非常低的水平，改善的效果非常显著。

对比图 3(c)与图 3(d)发现，加上退耦电容后，前面方案中 300 MHz 附近的谐振峰被抑制了，使得 Z_T 在整个所考虑的频段范围内呈现极强的抑制特性，从而达到几乎完全抑制 PCB 供电系的电磁干扰的效果。

以上结论可以用作 PCB 电磁兼容性设计的理论指导，以便在电路板的早期设计阶段就能对供电系的阻抗及由于阻抗谐振所导致的电磁干扰辐射与信号完整性的影响进行准确有效的预测和预防。

参考文献：

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys. Rev. Lett., 1987,58(20):2059-2062.
- [2] Wang Z L,Wada O, Toyata Y,et al. Convergence acceleration and accuracy improvement in power bus impedance calculation with a fast algorithm using cavity modes[J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat., 2005,47(1):2-9.
- [3] Wang Z L,Wada O,Toyata Y,et al. Reducing Q-factors of resonances in power/ground planes of multilayer PCBs by using resistive metal films Trans[J]. IEE Japan, 2001,121-A(10):928-932.
- [4] Wang Z L,Wada O,Toyata Y,et al. An improved closed-form expression for accurate and rapid calculation of power/ ground plane impedance of multilayer PCBs[C]// Proc. Symp. Electromagn. Theory, Toyama, Japan. 2000,EMT-00(68):17-23.
- [5] Sorrentino R. Planar Circuits, Waveguide Models, and Segmentation Method[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1985,33(10): 1057-1066.
- [6] Wang Z L,Wada O, Toyata Y,et al. Virtual port parameter in segmentation method for modeling power bus structures in multilayer PCBs[C]// Digest of the 10th International Symposium in Microwave and Optical Technology, 2005,8:112.
- [7] Wang Z L,Wada O,Toyata Y,et al. Application of segmentation method to analysis of power/ground plane resonance in multilayer PCBs[C]// Proc. 3rd Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2002,5:775-778.
- [8] Wang Z L,Wada O,Toyata Y,et al. Efficient calculation of power bus impedance using a fast algorithm together with a segmentation method[J]. Trans. IEE Japan, 2004,124(12):185-1192.
- [9] Wang Z L,Wada O,Toyata Y,et al. Modeling of gapped power bus structures for isolation using cavity modes and segmentation[J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat., 2005,47(2):210-218.
- [10] Li J, Wang Z L. Resonance suppression for power bus in printed circuit boards using EBG structures[C]// ICMMT 2008. 2008,2: 499-502.
- [11] 张婧婧,李杰,王志良. 印刷电路板供电系磁性材料涂层的应用[J]. 信息与电子工程, 2009,1(7):52-55.
- [12] Helszajn J. Green's Function, Finite Elements and Microwave Planar Circuits[M]. New York:John Wiley & Sons Inc., 1996.

作者简介：



李 杰(1984-), 男, 武汉市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 PCB 电磁兼容、粗糙面波散射、微带贴片天线.email:jasonlee1984831@gmail.com.

卞正才(1951-), 男, 江苏省扬州市人, 硕士, 主要研究方向为无线及移动通信.

张婧婧(1984-), 女, 上海市人, 硕士, 主要研究方向为 PCB 电磁兼容、粗糙面波散射、微带贴片天线.

王志良(1965-2008), 男, 浙江省绍兴市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为随机媒质及粗糙表面的电磁波散射、电磁场数值方法、集成光波导分析与设计、微波输能、电磁兼容等, 2008年4月30日不幸在上海与世长辞, 特表哀悼.