

网孔状地参考面上高速互连的信号完整性分析

张 华, 洪 伟

(东南大学无线电工程系毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘 要: 本文主要基于实验研究, 并结合三维全波电磁和电路系统仿真在频域和时域对高速多层 PCB 板中网孔状接地层或电源层上高速互连的信号完整性性能进行了测试和仿真分析, 并对网孔状地参考面的周期性结构所呈现的频率带通(带阻)特性进行了理论分析. 指出, 参考面中的网孔会对跨越网孔的信号线传输特性产生较大扰动, 甚至在信号频谱范围内产生局部的阻带, 影响高速信号传播. 最后, 给出了网孔状地参考面高速互连的设计规则.

关键词: 高速互连; 网孔状地参考面; 信号完整性; 周期性结构; 带通(带阻)特性

中图分类号: TN811 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372 2112 (2006) 12 2218 03

Analysis of Signal Integrity of High-Speed Interconnects on Meshed Ground Plane

ZHANG Hua, HONG Wei

(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: The signal integrity (SI) of high speed interconnects on meshed ground/power reference plane in high speed multi-layer PCB is investigated both by measurement and simulation. The analysis is mainly based on experimental measurement which incorporated 3D full wave EM and circuit and system simulation in frequency and time domain. The frequency characteristics of band pass (band stop) is theoretically analyzed which caused by the periodic structure of the meshed ground plane. The results are shown that the transmission characteristics of signal lines across the meshes are largely affected by the meshes on the reference plane. Even the band stop can appear in the frequency ranges of the transmission signal in part, which can degrade the quality of high speed signal. Finally, the design rules for high speed interconnects on the meshed ground plane are derived from the results obtained.

Key words: high speed interconnects; meshed ground reference plane; signal integrity; periodic structure; band pass (band stop) characteristics

1 引言

高速电路的 PCB 板中, 由于多层布线的需要, 电源层 (power plane) 和接地层 (ground plane) 必须为网孔 (mesh) 形状以提供层间的过孔通路^[1]. 电源层或接地层中的网孔实际上就是信号返回路径中的不连续性, 会引起反射、串扰、地反弹噪声等信号完整性问题^[25]. 从信号完整性的观点来看, 作为一种信号返回路径中的不连续性, 电源层或接地层中的网孔应当避免; 然而在高速多层 PCB 的实际布线中, 电源层或接地层不能隔绝信号布线层之间的联系, 它们做成网孔状是不可避免的, 网孔状电源层或接地层提供层间的通孔, 可以保证各层布线通过通孔进行连接. 同时, 一些信号线仍然必须跨越网孔状参考面传输, 为电路提供必要的信号输入/输出. 因此, 当网孔状不完整电源或地平面作为信号参考面时, 跨越这些不完整平面的高速信号的信号完整性问题就变得非常重要.

本文主要基于实验研究, 并结合三维全波电磁及电路系

统仿真在频域和时域对网孔状地参考面上高速互连线的信号完整性性能进行测试和仿真分析, 得到了一些有益的结论, 为这种高速互连结构的工程优化设计提供了参考.

2 网孔状地参考面微带线特性的研究

网孔状地板互连线结构如图 1 所示, 其地参考面呈周期性结构. 采用 FR4 的 PCB 板, 介电常数为 $\epsilon_r = 4.6$, 厚度为 $h = 0.8\text{mm}$; PCB 板长宽尺寸为: $50 \times 40\text{mm}$, 微带线线宽 $W = 1.47\text{mm}$, 特性阻抗 $Z_0 = 50\Omega$; 其中图 1(a) 为信号线没有穿越网孔, (b) 为信号线穿越网孔. 各网孔之间均匀相间, d_1 和 d_2 分别为横向和纵向的网孔间距, 网孔尺寸如图 1 中所示.

分析两种情况的网孔状地参考面上互连线的传输特性: 一种是 $d_1 = 5\text{mm}$, $d_2 = 4\text{mm}$, 对应于图 1(a) 和 (b) 的网孔数分别为 5×4 和 5×5 ; 另一种是 $d_1 = 2\text{mm}$, $d_2 = 2\text{mm}$, 对应于图 1(a) 和 (b) 的网孔数分别为 8×6 和 8×7 .

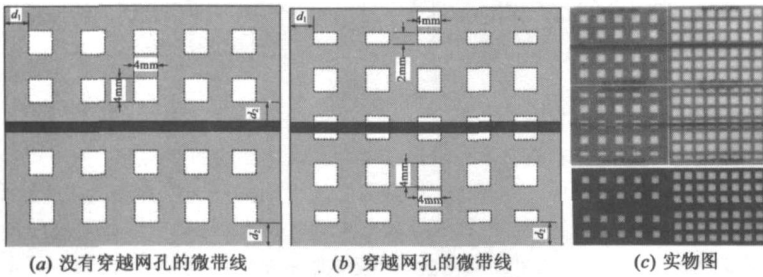


图 1 网孔状地参考面微带线示意图

采用 Agilent E8363B PNA 矢量网络分析仪, 在 0.110GHz 的频率范围(对应数据传输速率最高可达 4Gb/s 以及 2GHz 的时钟频率)对图 1 所示结构进行测量. 我们给出如图 1(b) 所示微带线穿越网孔的结构在 $d_1=5\text{mm}$ 、 $d_2=4\text{mm}$ 和 $d_1=2\text{mm}$ 、 $d_2=2\text{mm}$ 两种情况下的 CST 软件仿真和测试结果比较, 如图 2 所示; 其中 CST 仿真考虑了 2.4mm 同轴接头和测试支架的影响^[6]. 由图 2 可知, 仿真与测试结果相当吻合.

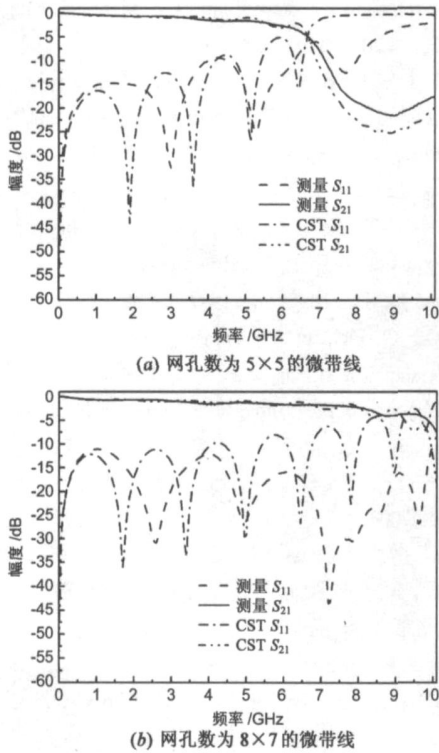


图 2 两种网孔间距结构微带线的仿真和测试结果比较

图 3 给出了 $d_1=5\text{mm}$ 、 $d_2=4\text{mm}$ 和 $d_1=2\text{mm}$ 、 $d_2=2\text{mm}$ 两种情况下微带线穿越与没有穿越网孔的四种结构以及 $Z_0=50\Omega$ 的同样基片材料标准微带线的 S_{21} 和 S_{11} 测量曲线的比较.

由图 3 可知, 无论是 $d_1=5\text{mm}$ 、 $d_2=4\text{mm}$ 还是 $d_1=2\text{mm}$ 、 $d_2=2\text{mm}$ 的两种情况中, 与没有穿越网孔的微带线相比, 穿越网孔微带线的插损和反射明显增大. 这是因为对于没有穿越网孔的微带线, 信号线下方的地参考面是连续的, 电流返回路径最短, 沿长度变化时受网孔扰动较小故分布参数的起伏也较小; 而对于穿越网孔的微带线, 由于信号线正对着网孔, 其下方的地参考面是不连续的, 电流返回路径变长, 引入了更多的传

线阻抗不连续性, 并且沿长度变化时受网孔的扰动较大, 分布参数的起伏也大^[7]. 对于没有穿越地参考面网孔的微带线, 由于其传输线阻抗的连续性, 网孔数量的变化对微带线的插入损耗和反射影响不大.

对于穿越地参考面网孔的微带线, 这里我们做单独的分析. 从图 3 的 S 参数结果来看, 在 6GHz 以上的高频段, 网孔数为 5×5 的微带线 S_{21} 值陡然下降, S_{11} 值骤然上升, 显然这种现象呈现出明显的频率带通(带阻)

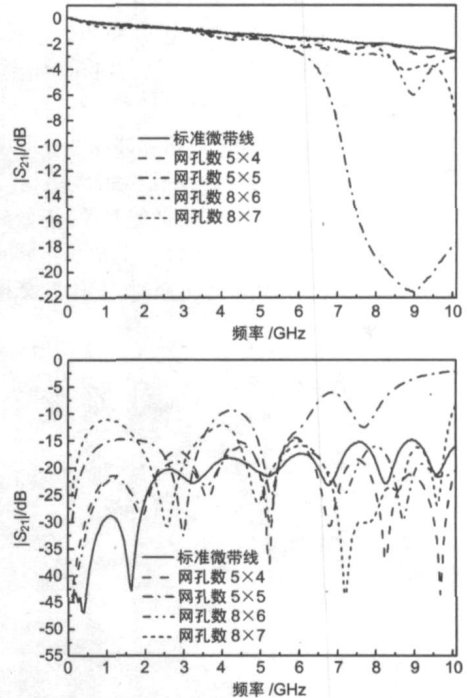


图 3 网孔状地参考面的微带线与标准微带线的 S_{21} 和 S_{11} 测量曲线的比较

特性. 正如图 1(b) 所示, 接地板上存在网孔, 会对传输线电磁场产生扰动, 可将其考虑为分布参数不均匀的传输线; 此外, 网孔在接地板上呈规则的均匀分布, 因此传输线受到的扰动是周期性的, 可将其视为具有周期性结构的非均匀传输线. 由于这种传输线结构的接地板为周期结构, 它是横截面沿传输方向为周期性不均匀的传输系统. 根据周期系统理论, 周期结构中某一传输模式的 n 次谐波的相位常数 β_n 为^[7]:

$$\beta_n = 2\pi / (\lambda_g)_n = n\pi / l$$

或 $l = n \cdot (\lambda_g)_n / 2, n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ (1)

其中, λ_g 为相波长. 当满足上述关系时, 工作模式的电磁波通过周期为 l 的不均匀系统时, 由不均匀性所产生的反射波, 由于往返行程正好是 $(\lambda_g)_n$ 的整数倍, 所以都是同相叠加, 结果形成了波的全反射, 于是不再传播电磁能量.

因此周期结构中传输的波每经过一个空间周期, 能量就反射一部分, 经过多个空间周期就会形成全反射, 并形成周期结构的阻带, 这种分布式的反射称为布拉格反射(Bragg reflection). 因此在实际周期结构中存在许多通带, 其间是阻带, 每

一个通带对应结构中的一种模式. 每个模式都是由各个空间谐波叠加而成的振幅沿 z (纵向) 呈周期性变化的非正弦分布的行波^[8]. 所以微带线在穿越网孔数为 5×5 的地参考面时, 波沿周期性分布的网孔传播, 在 $0.1 \sim 10\text{GHz}$ 的频率范围内, 6GHz 以下的频率呈现出带通特性, 而在 6GHz 以上呈现出带阻特性. 同理穿越网孔数为 8×7 的地参考面的微带线也有频率带通(带阻)特性, 只不过因为其空间周期(网孔及其相邻的网孔导体)的物理尺寸比网孔数为 5×5 的微带线的空间周期物理尺寸要小, 所以它的通带截止频率要比网孔数为 5×5 的微带线的通带截止频率(6GHz)高, 超出了我们所观察的频率范围. 但是在 $0.1 \sim 10\text{GHz}$ 的频率范围内仍然可以看出在 9GHz 的频率左右, 网孔数为 8×7 的微带线的 S_{21} 幅值开始急剧下降, 已经出现带阻的趋势. 由此可见, 网孔状地参考面微带线的阻带带宽与网孔的空间周期尺寸相关.

图 4 给出了 CST 仿真的一个高斯脉冲在基片厚度中间位置的平面上沿图 1(b) 所示的穿越网孔微带线结构传播的场型分布图, 其场强的幅度为电场强度的绝对值. 正如前面所解释的那样, 从图 4 可以看出, 对于包含一定频率分量的激励脉冲沿穿越网孔数为 8×7 的微带线传播时, 要比沿穿越网孔数为 5×5 的微带线所引入的反射小.

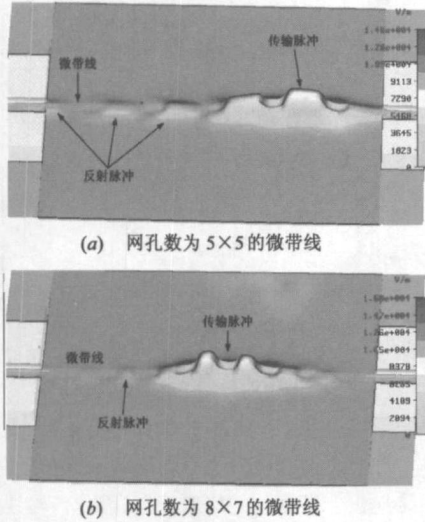


图 4 穿越网孔的微带线在基片厚度中间位置平面上的电场分布图

将这四种网孔状地参考面微带线的实测频域 S 参数数据输入至 ADS 软件^[9], 在时域进行 TDR 分析. 图 5 给出这四种情况的 TDR 仿真波形. 由图可知, 在信号跳变处与信号线没有穿越网

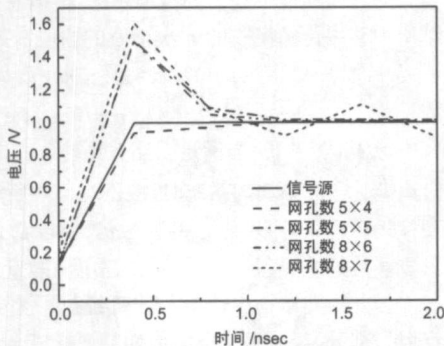


图 5 不同网孔数地参考面微带线的 TDR 仿真波形

孔的情况相比, 信号线穿越网孔时的 TDR 响应波形的过冲幅值较大.

3 结论

本文对网孔状地参考面上高速互连的特性进行信号完整性分析. 综上所述, 在网孔状参考面的高速电路布线设计中, 应尽量避免互连线穿越参考面的网孔, 保持传输线阻抗的连续性; 如果无法避免, 则应尽量减小空间周期(网孔及其相邻的网孔导体)的物理尺寸, 以获得较高的通带截止频率, 避免在高速脉冲信号包含的频率范围内出现带阻现象.

参考文献:

- [1] 李征帆, 曹毅. 微波与高速电路中的电磁场理论及其数值方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] Lin Y H, Wu T L. Investigation of signal quality and radiated emission of microstrip line on imperfect ground plane: FDTD analysis and measurement[A]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility[C]. Montreal, Kue, Canada: IEEE Press, 2001. 319-324.
- [3] Liaw H J, Merkelo H. Signal integrity issues at split ground and power planes[A]. IEEE Electronic Components and Technology Conference[C]. Orlando, FL, USA: IEEE Press, 1996. 752-755.
- [4] Liaw, H J, Merkelo H. Crossing the planes at high speed Signal integrity issues at split ground and power planes[J]. IEEE Circuits and Devices Magazine, 1997, 13(6): 22-26.
- [5] Schuster C, Fichtner W. Parasitic modes on printed circuit boards and their effects on EMC and signal integrity[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2001, 43(4): 416-425.
- [6] 张敏. CST 微波工作室用户全书[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2004.
- [7] 水启刚. 微波技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [8] 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论, 第 2 版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [9] Agilent Advanced Design System (ADS) 2002: user's manual [EB/OL]. Agilent Technol. Inc., Palo Alto, CA, 2002.

作者简介:



张 华 男, 1974 年 1 月出生于贵州都匀, 博士生, 主要研究方向为无线通信中的射频技术. E-mail: huazhang@emfield.org

洪 伟 男, 1962 年 10 月出生于河北张家口, 现为东南大学无线电工程系教授、博士生导师, 在国内外发表学术论文 200 余篇.

E-mail: weihong@emfield.org