

文章编号 1005-0388(2002)05-0490-05

## 割裂大地对数字信号的影响<sup>①</sup>

于学萍 吕英华 冯晓俊 黄永明

(北京邮电大学,北京 100876)

**摘要** 着重研究的是数字信号在跨越割裂大地的印制线上传输的问题。计算过程中采用 FDTD 方法对此问题的电磁场分布进行了模拟。并第一次定量地分析了数字信号在传输过程中所发生的变化。并从信号完整性的角度给出了割裂大地的缝宽与时钟信号上升沿时间,以及时钟信号周期同信号传输过程中所发生的畸变的关系,进一步分析了产生这种畸变的原因。文中所得出的数据和结论对实际的 PCB 设计以及与此相关的一些工程实现具有指导意义。

**关键词** 印刷电路板, 时域有限差分法, 完全匹配媒质层

**中图分类号** TM5 **文献标识码** A

### The effects on digital signals of slotted ground

YU Xue-ping Lü Ying-hua FENG Xiao-jun HUANG Yong-ming

(Training Center, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** In this paper, we the effects on digital signal on trace with slotted ground. We use FDTD method to simulate the electromagnetic distributing. Quantitatively we analysis the variety of digital signal in transmission process quantitatively. We obtain the relationship of the variety of signal with slot width, signal rise-time and the period of signal. We also analysis the mechanism of the process that results in the varieties of the digital signals. Simulation result of this paper is very useful for the PCB design and other correlated works.

**Key words** PCB, FDTD, PML

## 1 引言

在印制板的设计中,常常遇到如图 1 所示的情况,多个通孔(through-hole)在地平面上产生了一条缝。由于在地平面上有缝隙存在,印制线条的射频电流的镜像电流就不会是射频电流在地平面上的投影,因为镜像电流不能跨越不导电的缝隙<sup>[1]</sup>。其结果是使得产生高频辐射的回路面积增大,最直接的后果是导致了对外辐射的增加,使得系统的电磁兼容性能恶化<sup>[2]</sup>。近些年来,为提高系统的电磁兼容性,割断系统内外干扰信号传播的途径,许多通信设备的输入/输出端大地与其它电路之间的大地在电路板上完全分割开,而它们的地各自同机壳连接。

在电路板上输入/输出端是一个“孤岛”(如图 2 所示,图 3 还给出了作者拍摄的 ATI Rage128 显卡的地分割图),它能为电路板提供一块“干净”的地。在这种极端的情况下,对在跨越裂缝的印制线上传输的信号的影响是十分巨大的。而以往对此类问题的研究多考虑对外辐射的变化,但是须注意的是地平面上存在缝隙时,信号线上信号的完整性问题同样是一个值得关注的问题。迄今为止找不到关于信号线穿越大地上的裂缝时信号所发生变化的理论上的定量分析资料,只有一些相关的实验数据。为了确切地找到数字信号通过大地上的裂缝时,信号的上升沿时间、信号幅度的变化量同大地上裂缝的几何尺度之间的对应关系,针对这种典型情况进行物理建

① 收稿日期:2001-07-18.

基金项目:华为自然科学基金支持

模和计算机数值模拟。尤其着重对“孤岛”这种极端情况进行了研究。本文的研究的方法和结论对设计印刷电路板的工程师有一定的指导意义,对估算数字信号通过割裂大地时信号所发生的变化具有十分重要的参考价值。

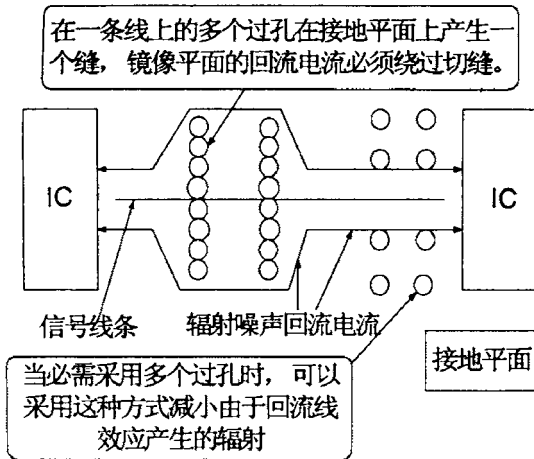


图 1 多个过孔在地平面上产生了一条缝

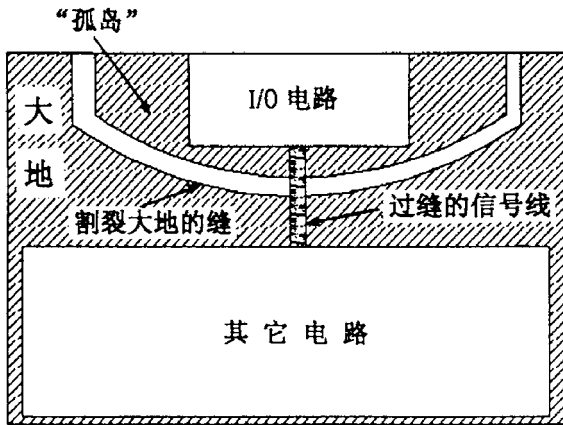


图 2 电路板上的“孤岛”

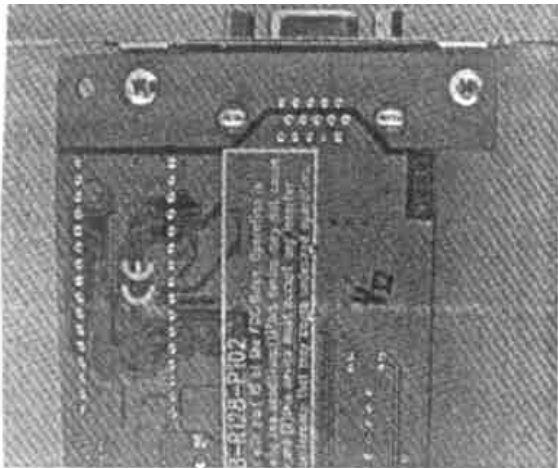


图 3 ATI Rage128 显卡的地分割

本文将主要针对上述问题做定量的计算和模

拟,在以后的各部分将阐述研究和建模的原理,以及计算的数值结果。

## 2 研究方法

鉴于此问题的特殊性,用传输线理论等传统的方法已经很难得出精确的结果,且实施起来技术难度很大。因为印制板的接地平面开了一个缝,接地层不再是电均匀体,所以就必须要求得接地板上及附近的电磁场分布,才能进一步求得印制线条上的信号波形、幅度和上升时间。对这种着重分析具有复杂边界情况下的近区场分布的电磁场的问题,通常都采用时域有限差分法进行建模和计算机模拟。

FDTD<sup>[3]</sup>是近些年才发展起来的一种数值模拟技术,它的计算精度十分高,而且能利用一次计算就给出一个宽频带的结果<sup>[4]</sup>。在解决上述问题时可以直接用时域信号进行计算。

然而对于开放区域的电磁学问题,就需要设置特殊的吸收边界条件以便于计算机的运算。设置这个边界条件的目的在于吸收外行波。使得能够用有限的计算机资源来模拟开放空间。为了吸收外行波,过去的几十年发展了多种边界条件技术用于计算机模拟。在 1994 年, Jean Pierre Berenger 提出了吸收边界条件(PML: perfectly matched layer)<sup>[5]</sup>。PML 吸收边界条件一出现就得到了极大的推广,相继解决了一些过去难以求解的问题。在随后的几年中, PML 技术又得到了进一步的发展, Stephen D. Gedney 提出了各向异性的 PML 吸收媒质<sup>[6]</sup>。这种吸收媒质避免了在吸收媒质中对磁场的劈裂,它不仅保留了原 PML 技术的长处,而且进一步降低了 PML 技术对计算机内存的需求,并且使计算机编程计算更容易实现。本文所采用的是各向异性的吸收媒质。

## 3 问题建模

由于实际问题的物理形状在局部很不规则,这种情况下是很难直接进行计算的。这就需要对实际问题做一些简化制成样板,以便于计算机进行数值计算和实际应用。但需注意的是,这种简化必须是合理的,即只能忽略那些对结果影响不大的条件,做到能精确地表示其物理特性。

由于印制线条宽度和通孔的直径都很小,而在它所传输的数字信号的频谱中,即使信号包含的最大频率的电磁波的波长也远远大于印制线条宽度和通孔的直径。在这种情况下,可以把一排通孔看作是一条长方形的缝,这条缝把大地割裂开来。简化

后的物理模型如图4所示。对于“孤岛”的情况,可以近似地认为缝长是无限长的。

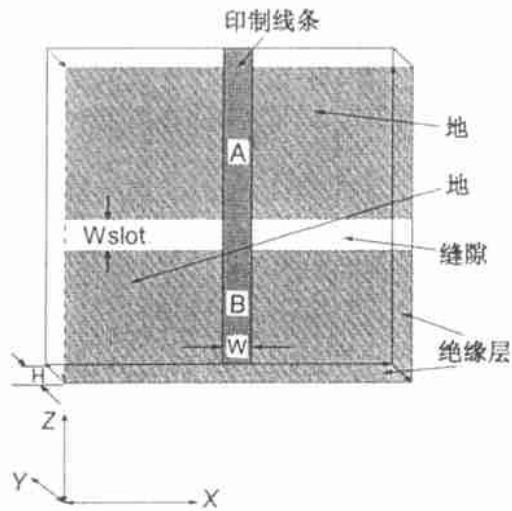


图4 印制线条穿越带有裂缝的地平面问题的模型

在模型中忽略了印制线条的电阻,认为层间绝缘材料厚度均匀。印制线条一端加数字信号,信号源内阻等于印制线条的波阻抗;印制线条另一端终接与印制线条的特性阻抗相匹配的负载。针对这个问题,采用长方体网格将金属地面、印制线条、印制线条与金属地面之间的绝缘材料、以及印制线条周围和上方的空间进行分割。

#### 4 计算机数值模拟

图4所示的计算参数:

微带线线宽  $W:8\text{ mil}$  缝宽  $:50\text{ mil} \times n$

印制板厚度  $H:8\text{ mil}$  有效介电常数  $:4.4$

印制线上采样点 A、B 距离  $:1\text{ in}$

源的设置:

1) 上升沿时间  $1\text{ ns}$ ; 保持时间  $3\text{ ns}$ ; 占空比  $50\%$ ; 重复周期  $100\text{ M}$ 。

2) 上升沿时间  $500\text{ ps}$ ; 保持时间  $4\text{ ns}$ ; 占空比  $50\%$ ; 重复周期  $100\text{ M}$ 。

PCB在计算区域中的位置如图5所示,PCB的端头都插入到PML媒质层中。这样就等效于信号在无限长的印制线上传输。而印制线无限长的情况也就等效于印制线终端负载匹配的情况。下面将把主要的计算机数值模拟结果列出,并对模拟结果进行必要的说明。

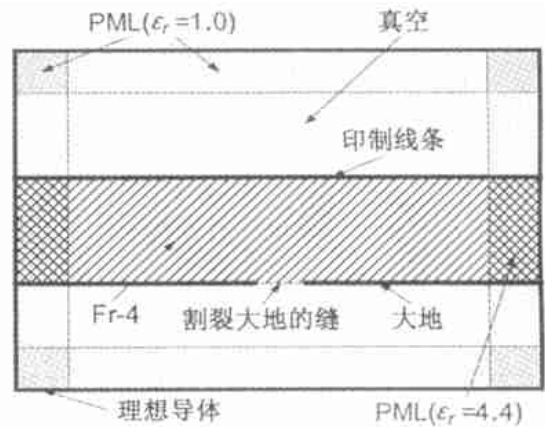


图5 PCB在计算模拟区域的位置剖面图

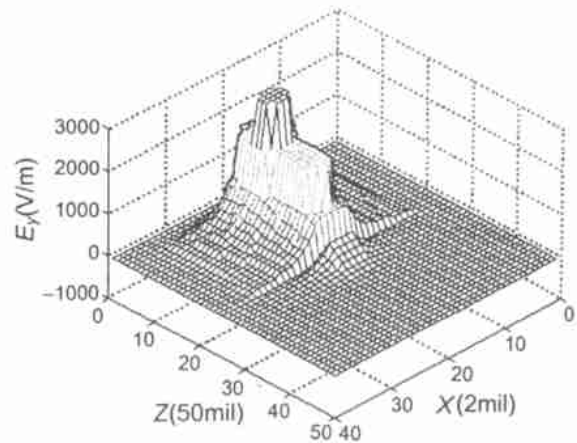


图6 数字信号在具有割裂地的信号线上传播的  $E_y$  分布

#### 5 分析

因为“孤岛”和其它电路的大地是通过机壳连接在一起的,在这种情况下,地回路中的镜像回路必须绕过裂缝通过机壳连接形成回路,这就使得印制线附近的场减小了,而远处的辐射场则由于高频电流回路增大而增加。但是由于大地的裂缝可以看成增加了电容器件串联在镜像回路中,且地回路通过机壳实现“孤岛”地与其它电路的地互连的情况,也可以等效成在电流的地回路中串联了一个电阻。如果源的频率很高且电流回路很长时,电阻就表现为感抗,且值很大。从物理图象上可以理解为缝隙的存在等效于在信号传输回路中串联了由  $R_{slot}$  与  $C_{slot}$  并联的分压电路,所以印制线条上只获得高频源的部分电压和功率。其等效电路可以用图14表示。所以电流的输出总量会略有减少。

图7~9所表示的均为上升沿时间为  $1\text{ ns}$  的情况,由图8B点的波形图可以看到,信号的上升沿趋

缓,这说明信号中的高频成分有所降低。这是由于在高频下,  $C_{slot}$  表现为阻抗特性,  $C_{slot}$  吸收了一部分高频成分的能量,使得信号中的高频成分有所降低。

由图 8 给出信号线条上的信号跨越裂缝区时信号完整性被破坏的情形。信号在跨越裂缝区时,幅度发生了跳变,跳变的幅度与缝宽有关。在设计跨越裂缝区的印制线条时,可以用图 14 的等效电路

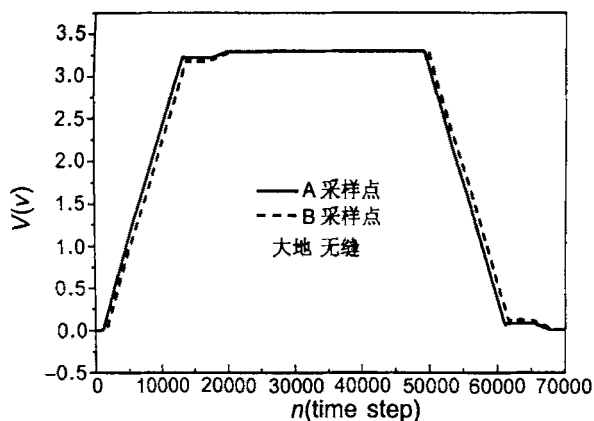


图 7 大地无缝时 A、B 两采样点的信号波形

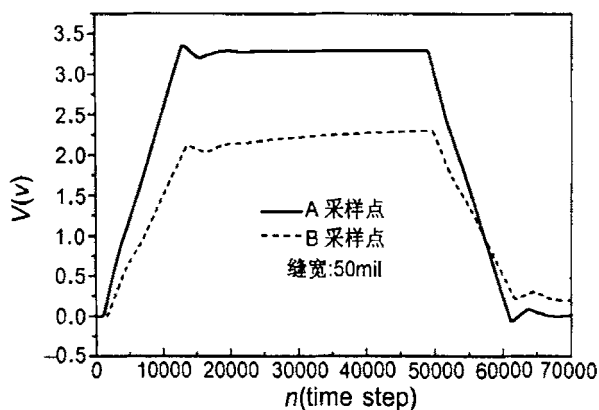


图 8 “孤岛”情况下缝宽 50 mil 时的 A、B 采样点的波形

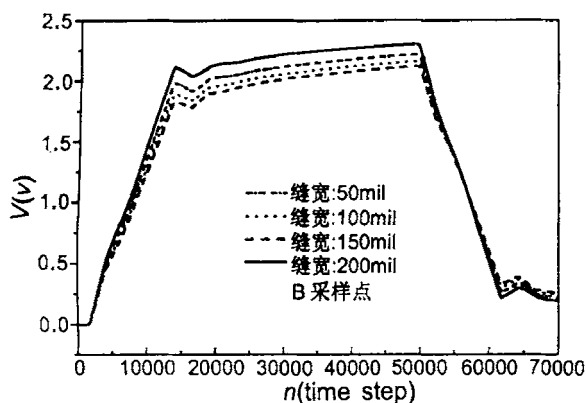


图 9 “孤岛”情况下不同缝宽 B 采样点的波形

估计信号幅度发生的跳变的数值。图 9 表明,信号在割裂大地缝上的压降是随缝宽的增加而增加的,但这种趋势随着缝宽的增加而减弱。由图 10 可知,信号上升沿时间变化后,此规律依然有效。图 11 给出了信号上升沿时间为 500ps 时,信号通过割裂大地缝的情况。图 12 表明,信号的上冲随着信号上升沿 0 时间的减小而增加,也就是说,信号的上升沿愈陡峭,信号通过缝时受到的影响愈大。

对于有限长的缝(近似模拟图 1 的情况) Morrtrose 给出了试验数据<sup>[7]</sup>(见表 1)。由于本文假设导体为理想导体,  $R_{slot} = 0$ ,所以在 AB 两点间无压降。而在实际情况下,压降也十分小,完全可以忽略。因此 A、B 两采样点的波形是基本相同的,只是信号通过缝时,产生了抖动(jitter)(见图 13)。这种抖动在实际的电路中可以用示波器观察到。它会影响信号时序,严重时会造成电子设备的误动作。

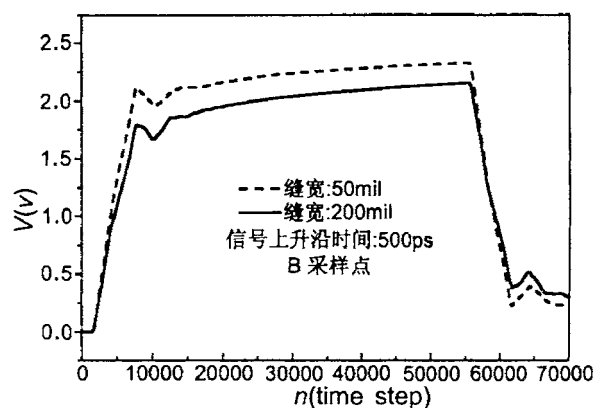


图 10 “孤岛”情况下信号上升沿时间是 500ps 时不同缝宽 B 采样点的波形

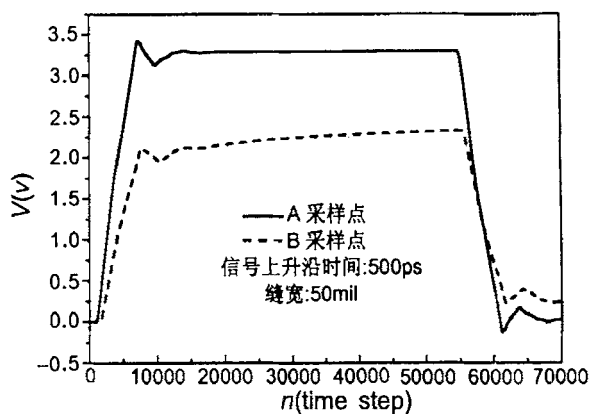


图 11 “孤岛”情况下信号上升沿是 500ps 缝宽 50 mil 时 A、B 采样点的波形

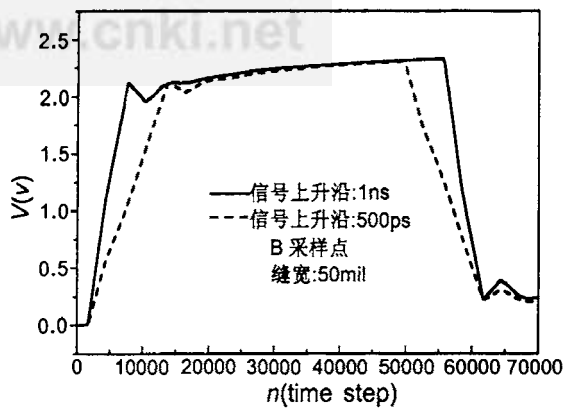


图 12 “孤岛”情况下缝宽 50mil 时不同信号上升沿时间 B 采样点波形

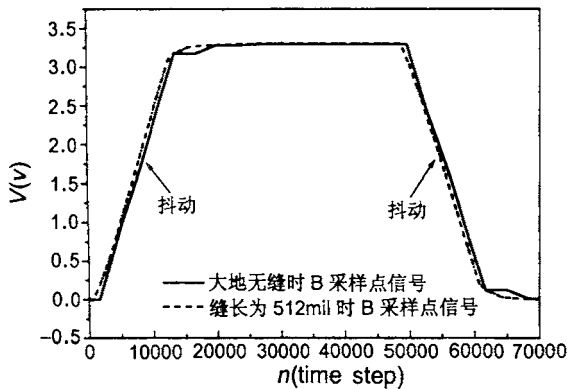


图 13 有限长度的缝对信号造成的抖动

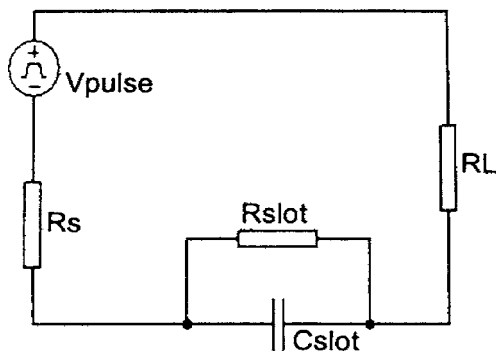


图 14 跨越裂缝区的信号传输等效电路

表 1

缝长 (in)	0	0.25	0.5	1.0	1.5
AB 点间的压降 (mV)	15	20	26	49	75

缝宽 :25mil 信号线宽 :50mil AB间距 :1in 信号上升沿 :3ns

## 6 结论

1. 对于“孤岛”情况,信号线跨越带裂缝的地平面时,沿该线传输的信号会产生压降,导致信号幅度

的衰减。随着缝宽的增加,衰减幅度会加大,但衰减的程度会变慢。当信号的电平降低很大的时候,会导致电路逻辑错误。

2. 对于“孤岛”情况,信号线跨越带裂缝的地平面时,沿该线传输的信号上升沿会变缓,上升时间会增加,增加量与缝宽有关。

3. 对于有限长裂缝的情况,对信号的影响可以忽略。需要考虑的只是由于回路面积增大而导致的对外辐射增强和信号通过割裂大地的缝时所造成的抖动。

## 参考文献

- [1] Howard W. Johnson and Martin Graham HIGH - SPEED DIGITAL DESIGN [M]. 1993 by Prentice Hall PTR
- [2] 吕英华,王昕玮. 多层印制板电磁兼容设计[J]. 电子科技导报, 第十一期, ISSN005 - 8230, 1997年11月.
- [3] K S Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. IEEE Tran. 1966, AP-14:302 ~ 307.
- [4] 高本庆编. 时域有限差分法 [M]. 北京:国防工业出版社, 1995.
- [5] J P Berenger. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. J. Compute. Phys., Oct, 1994, 1(144):185 ~ 200.
- [6] Stephen D Gedney. An anisotropic perfectly matched layer-Absorbing medium for the truncation of FDTD lattices [J]. IEEE Trans. on AP, December 1996, 44(12):1630 ~ 1639.
- [7] Montrose, M I. Printed circuit board design techniques for EMC compliance [M]. IEEE Press, 1996.



于学萍 (1971-),男,吉林人,北京邮电大学电磁场与微波技术专业博士研究生。从事 PCB 的数值模拟技术方向的研究工作。



吕英华 (1948-),男,辽宁人,北京邮电大学教授、博士生导师。从事电磁兼容方向的研究工作。