

高速电路中的信号完整性问题

许致火

(07级信号与信息处理 学号 307081002025)

1 信号完整性问题的提出

一般来讲,传统的低频电路设计对于电子工程师并不是多么复杂的工作。因为在低于30MHz的系统中并不要考虑传输线效应等问题,信号特性保持完好使得系统照常能正常工作。但是随着人们对高速实时信号处理的要求,高频信号对系统的设计带来很大的挑战。电子工程师不仅要考虑数字性能还得分析高速电路中各种效应对信号原来面目影响的问题。

输入输出的信号受到传输线效应严重的影响是我们严峻的挑战之一。在低频电路中频率响应对信号影响很小,除非是传输的媒介的长度非常长。然而伴随着频率的增加,高频效应就显而易见了。对于一根很短的导线也会受到诸如振铃、串扰、信号反射以及地弹的影响,这些问题严重地损害了信号的质量,也就是导致了信号完整性性能下降。

2 引起信号完整性的原因

2.1 传输线效应

众所周知,传输线是用于连接发送端与接收段的连接媒介。传统的比如电信的有线线缆能在相当长的距离范围内有效地传输信号。但是高速的数字传输系统中,即使对于PCB电路板上的走线也受到传输线效应的影响。如图1所示,对于不同高频频率的PCB板上的电压分布是不同的。

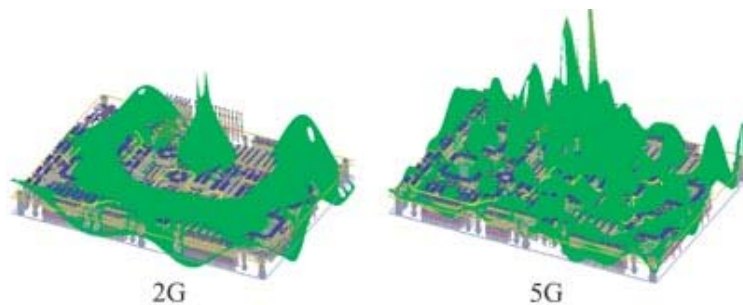


图 1 PCB 在不同频率上的电压波动

因为低频电路可以看成是一个没有特性阻抗、电容与电感寄生效应的理想电路。高速电路中高低电平的快速切换使得电路上的走线要看成是阻抗、电容与电感的组合电路。其等效电路模型如图2所示。导线的阻抗是非常重要的概念，一旦传输路径上阻抗不匹配就会导致信号的质量下降。

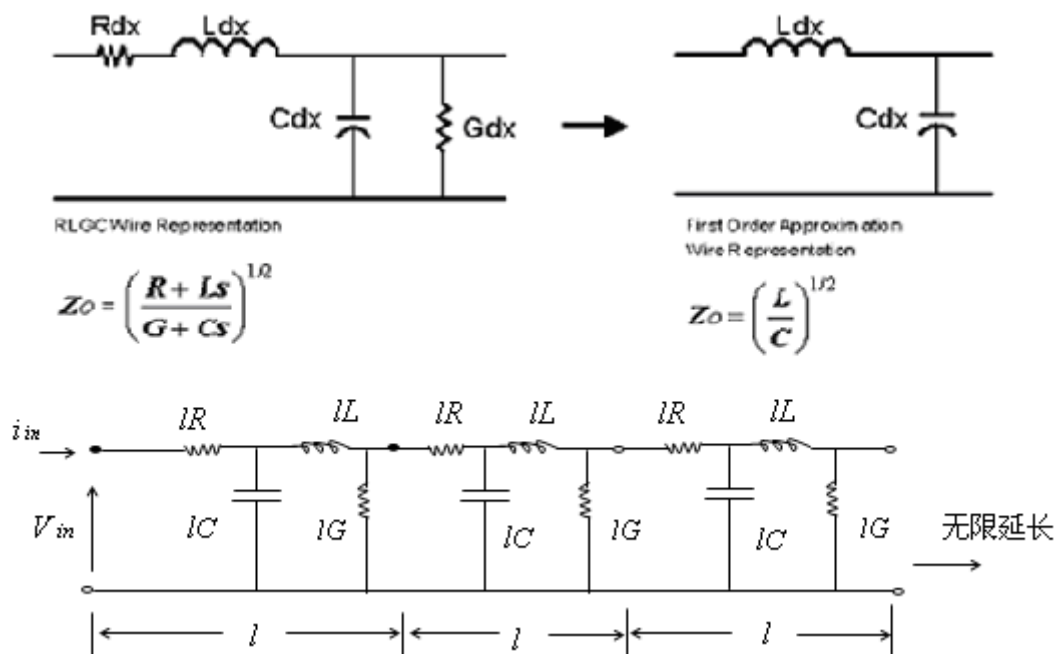


图 2 传输线等效电路模型

由图2的模型可得电报方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(z,t)}{\partial z} &= Ri(z,t) + L \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial i(z,t)}{\partial z} &= Gu(z,t) + C \frac{\partial u(z,t)}{\partial t} \end{aligned}$$

2.2 阻抗不匹配情况

信号源输出阻抗（ Z_s ）、传输线上的阻抗（ Z_0 ）以及负载的阻抗（ Z_L ）不相等时，我们称该电流阻抗不匹配。也这是说信号源的能量没有被负载全部吸收，还有一部分能量被反射回信号源方向了。反射后又被信号源那端反射给负载，除了吸收一部分外，剩下的又被反射回去。这个过程一直持续，直到能量全部被负载吸收。这样就会出现过冲与下冲（Overshoot/Undershoot）、振铃（ring）、阶梯波形（Stair-step Waveform）现象，这些现象的产生导致信号出现错误。

当传输媒介的特性阻抗与负载终端匹配时，阻抗就匹配了。对于PCB板来说，我们可以选取合适的负载终端策略及谨慎地选择传输介

质。

2.3 信号衰减

传输线受负载接收终端对信号判断能力的干扰大，高频信号很容易在传输线上衰减。表1列出了携带信号的传输媒介信号衰减的原因。

表 1 传输媒介信号衰减的原因	
原因	描述
介质损耗	高频信号会使绝缘介质极化，极化分子吸收能量。这样导致信号的强度减小。介质吸收能量的多少与PCB板用的材料有很大的关系。谨慎合理选择好材料对克服介质损耗有利。
趋肤效应	交流信号的快速变化，其电流分布趋向于导体的表面。这样结果是媒介的高频自感效应加强，大部分电荷分布在导体表面。导体面积的损耗增加，信号衰减。增加媒介的宽度可以缓解趋肤效应，但实际应用中考虑到体积、布线密度等这是不太可能的。图4对这个问题有详细的描述。

2.4 串扰

一个电流流经一根导线，导线的周围就会有磁场分布。如果两根导线平行放置在一起，两导线产生的两个磁场互相作用产生互感效应，两导线上的信号的能量就会耦合，这就是串扰影响。容性耦合引发耦合电流，而感性耦合引发耦合电压。表 2 说明了不同的引起串扰的因素。

表 2 不同的耦合引起串扰	
耦合形式	描述
互感耦合	导线的自身的感应电流以及被其他导线互感引起的感应电流都以磁场的形式分布在导线上。互感使距离其最近的导线上起点产生正波形，负波形出现在最接近传输线的负载终端，导致串扰。
互容耦合	两个耦合的电场，电流与电压的比值受被耦合的导线影响而不同。互容在两导线的终点都产生正的波形。

3 保持信号完整性的方法

3.1 阻抗匹配方法

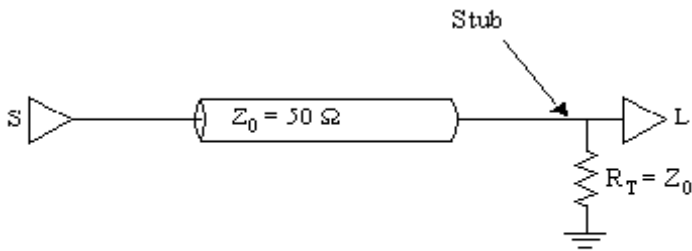


图 3 简单的并联负载终端匹配

对于不同的应用，不同负载终端策略被用于克服阻抗不匹配的问题。其中之一简单的并联负载终端匹配法（如图3）可用在复杂的阻抗与电容负载匹配。图中的RC网络相当于一个高通滤波器，滤除低频成分，高频成分却可以通过。

尽管外围器件同样能提供滤波等作用，但是PCB板还得有一些附加的措施用来克服一些其他的干扰。

3.2 克服信号衰减

认真选择绝缘材料和布线的合理布局，是克服信号衰减问题的有效方法。表3 以Stratix® GX 上的FPGA电路为例列出了如何克服信号衰减。

表 3 Stratix® GX 上的FPGA电路克服信号衰减方法	
原因	描述
预加重	一味地增加信号强度来克服高频信号衰减是行不通的，因为这样信号里的噪声成分也被放大了。预加重是对于在同一电平传输级上的两个电平信号，对第一个电平信号进行加强，另外一个保持不变。举个例子：如果一个信号是由3个高电平信号组成的，只有第一个电平被加放大，其余两个保持原样进行传输（见图4）。如果只有一个高电平的信号，就照常被放大传输。预加重也是克服抖晃现象（比如幅度损耗，时间错位以及冗余信号边缘）效应的有些方法之一。
接收端均衡	精心设计的接收端电路用于减缓高频信号的衰减，在接收端的接收器可以对损耗的信号补偿。Stratix GX 器件能对 20"和40"的传输线进行可编程的均衡。



图 4 两个时隙内的预加重

3.3 减轻串扰的影响

事先对PCB板精心设计，可以使串扰显著减轻。对于微带线或是带状线的布线，我们可以通过以下的步骤减轻串扰。

- 1 在布线限制的允许范围内尽可能地加大信号线之间的间距；
- 2 导线与地平面的距离尽可能地短。这样增强传输线与地参考面的耦合度，减轻与其他邻近信号的耦合。对于PCB板的关键线路，最后使用不同的布线技术；
- 3 把信号线布线在不同的层上，对有很大耦合可能的导线使用正交布线；
- 4 平行放置的导线长度应尽量短，使平行的部分的耦合能达到最小。

参考文献

- [1] http://www.csee.umbc.edu/vlsi/reports/si_chapter.pdf
- [2] <http://www.altera.com/technology/signal/fundamentals/basics/sgl-basics.html>
- [3] <http://www.engineerlive.com/european-electronics-engineer/19630/electrical-signal-integrity.shtml>
- [4] 姚振东教授. DSP 技术课件: EMC 与电子设计.
- [5] 张士贤. 信号完整性基础知识. 中兴通讯上海第一研究所.

射频和天线设计培训课程推荐

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,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、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。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>