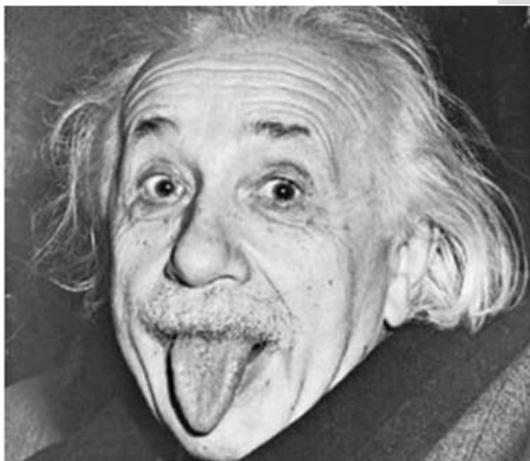


【高速先生原创|基础理论系列】串扰探秘系列（共七篇）

作者：陈德恒 一博科技高速先生团队成员

串扰探秘-串扰的形成

知识越丰富，对知识的敬畏就越深。思维愈发严谨，说话也愈发谨慎，越来越像个老学究，很难再向初学者那样思路广欢乐多了。而普罗大众喜欢的是简单易懂，所以老舍巴金不如韩寒小四，研究雾霾的专家不如柴静的穹顶之下，各种明史学者也敌不过当年明月的一本明朝那些事。但严谨与娱乐也许并不对立，将其结合的最好的应该就是我们伟大的科学家爱因斯坦先生了吧。不信？来张图让大家感受一下。



it depends

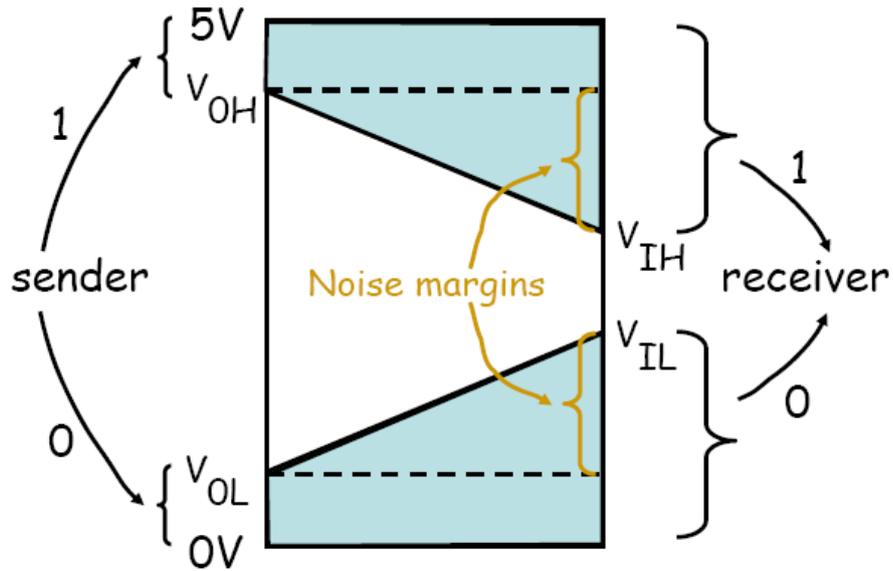
嗯。大家好，我是 Mr.S，上图是我的偶像。不出意外的话串扰将会像反射一样用一系列的文章来说明。在这里小编将尽力用简单的图像来表明串扰的一系列影响，希望大家能耐心的读下去。

集成电路的发展很大一部分是建立在数字信号的发明上，使用数字信号通信大大提高了信道的噪声裕量。以 DDR3 信号为例，其接收端的判决电平通常为 $V_{inH}=900mV$ ， $V_{inL}=600mV$ ，也就是说，如果输出为标准 0-1.5V 信号的话，在信道上能够容忍的噪声裕量达到了 600mV，相当于信号电平的 40%。这 40% 的裕量将被反射，损耗，电源噪声，串扰等问题瓜分。

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





在这里，高速先生抛出第一个结论：大部分数字信号可能比大家想象中的要强壮得多（心の OS：不要再让我们一条信号一条信号的给你们仿真啦！）。

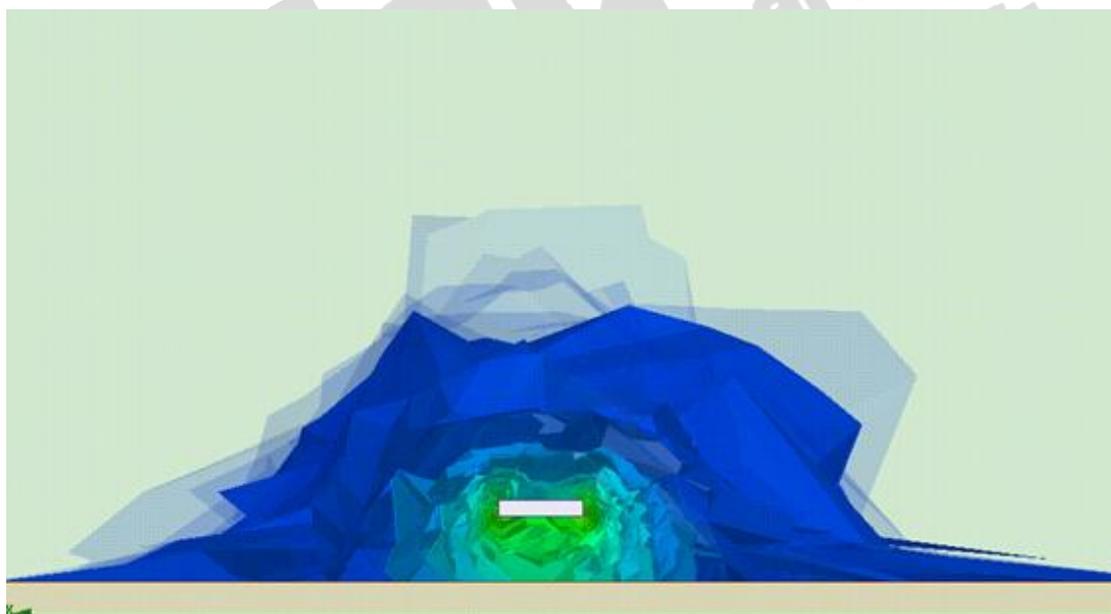
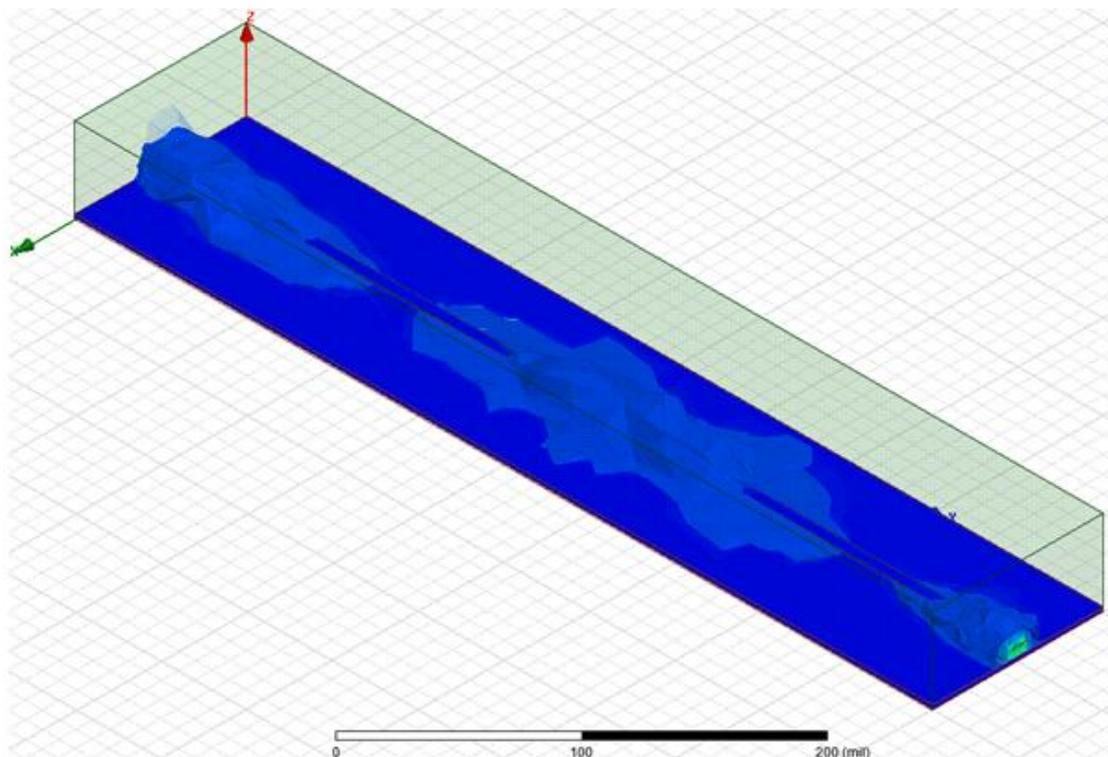
当然，信号的强壮不是我们为所欲为的资本。尽量提高信号质量与系统的稳定性是我们攻城狮的职责。

如我们一直强调的，信号传输的并不是电压与电流，而是电磁场。通过电场与磁场的不断转换，信号以光速从发送端传到接收端。当信号传输时，走线附近的电磁场分布如下图：

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





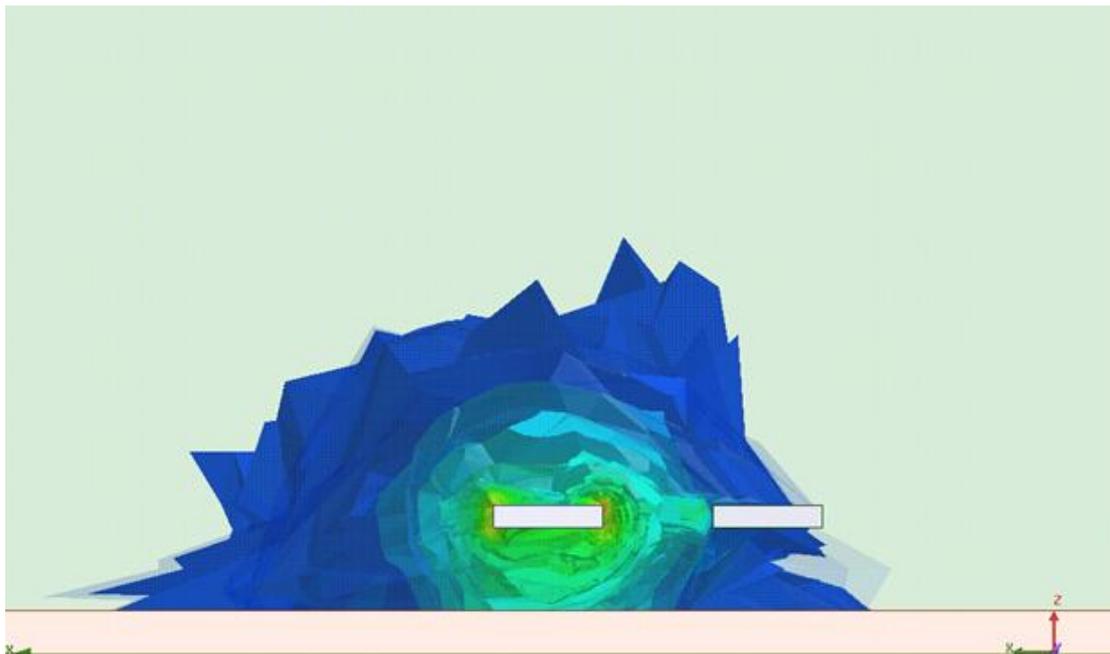
可以看到，大部分的电磁场分布在信号线以及回流路径之间。

当另一根线闯入了这片电磁场区域时：

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





一部分的电磁场被吸走了。于是串扰出现了。

问题来了

从信号传播的横截面上可以看到，信号线两边的电磁场强度会强于中间区域。为什么？

高速先生欢迎您和我们进行交流，关注微信名（高速先生），直接将答案通过会话回复，参与互动答题即有机会获得奖品，回复关键词“奖品”查看更多。

串扰探秘-耦合途径

场与路都是助我们理解问题，解决问题的手段。能用路解决的问题，坚决不用到场。

——Mr.S

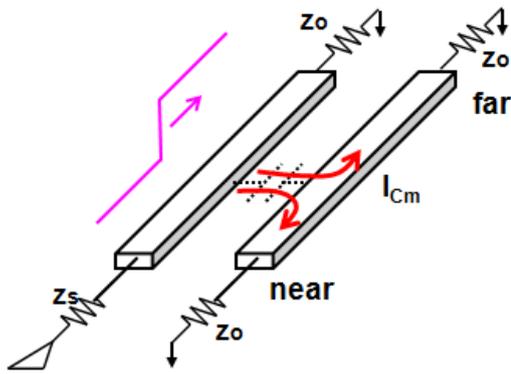
虽然说串扰是电磁场的耦合，但是使用电容与电感就可以理解他。

我们都知道两个导体会构成一个电容，当电容两端的电压发生变化时，会有电流从电容中流过：

如何关注

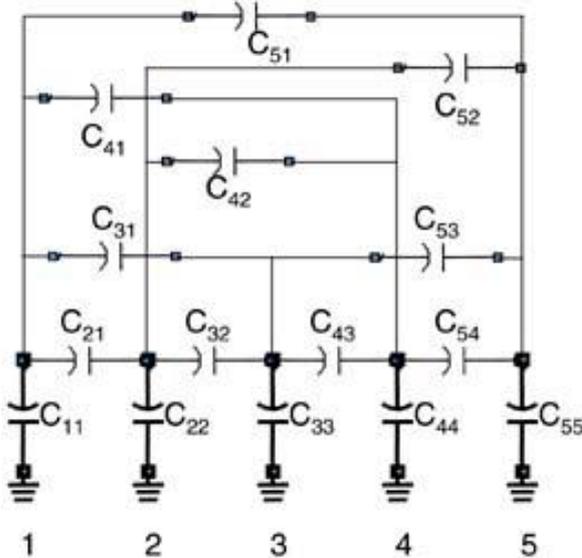
- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





$$I_{Cm} = C_m \frac{dV}{dt}$$

这个电容耦合不止发生在我们的信号线与信号线之间，同时也发生在信号线与回流平面之间。让我们来看一下下面拓扑的电容矩阵：

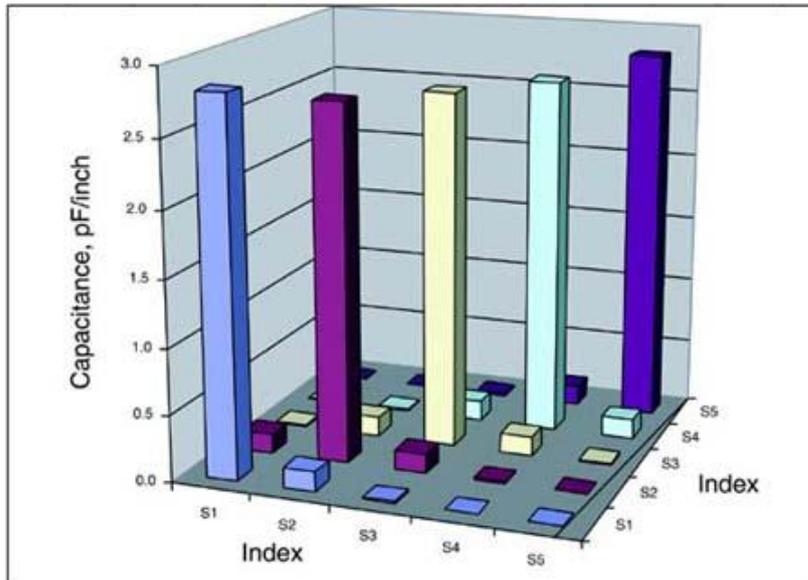


C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}
C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}
C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}	C_{35}
C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}	C_{45}
C_{51}	C_{52}	C_{53}	C_{54}	C_{55}

如何关注

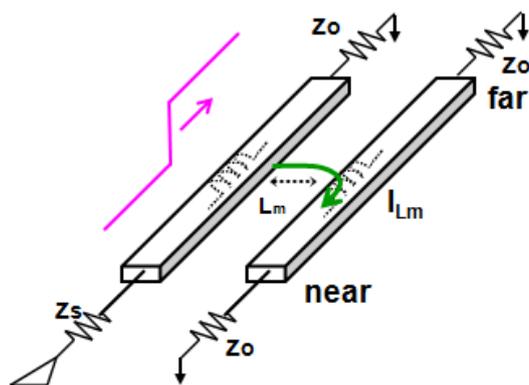
- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





可以看到，信号路径与回流路径之间的互容远远大于不同信号路径之间的互容。我们知道，电容越大阻抗越低，而信号会选择低阻抗的路径回流。所以更多的能量耦合到了回流路径上，是的，这句话的意思是，信号的回流与信号的串扰是同样的道理，只不过能量在回流路径上我们叫它回流并且去保护它，在其他信号上时我们叫他串扰，需要去避免它。当回流路径阻抗很高时，信号可以通过附近的其他信号进行回流，这时串扰就非常非常高了。

除了以上的容性耦合之外，同样有着感性耦合：



$$V_{Lm} = L_m \frac{dI}{dt}$$

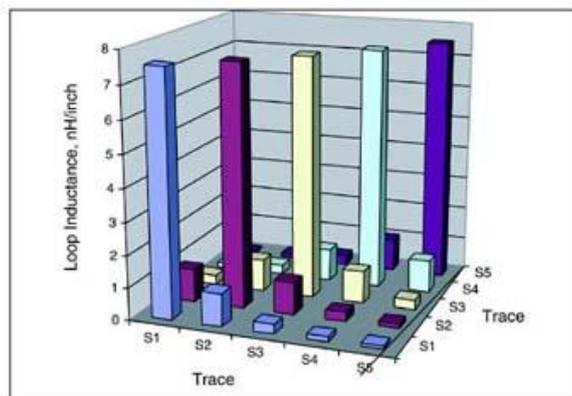
耦合的程度同样可以用一张互感矩阵表示。如你所想，他的趋势与互容矩阵无二：

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习



1	2	3	4	5
7.517	1.012	0.292	0.137	0.088
1.012	7.464	0.996	0.287	0.138
0.292	0.996	7.456	0.995	0.296
0.137	0.287	0.995	7.454	1.008
0.088	0.138	0.296	1.008	7.496



在这里，我们只需要将其理解为一个变压器。回流路径电感较大，匝数较多，而其他信号的电感较小匝数较少。所以更多的能量耦合到回流路径上了。感性耦合会比较难理解，需要想清楚电感的定义 $L=N/I$ 。

好了，耦合途径我们都搞清楚了，不过是传输线之间的互容与互感而已，这个互容互感其实也就是传输线之间的阻抗。减小互容与互感，加大传输线之间的阻抗，传输线之间的串扰也就随之减小了。

问题来了

如何减小信号之间的互容与互感？

高速先生欢迎您和我们一起进行交流，关注微信名（高速先生），直接将答案通过会话回复，参与互动答题即有机会获得奖品，回复关键词“奖品”查看更多。

如何关注

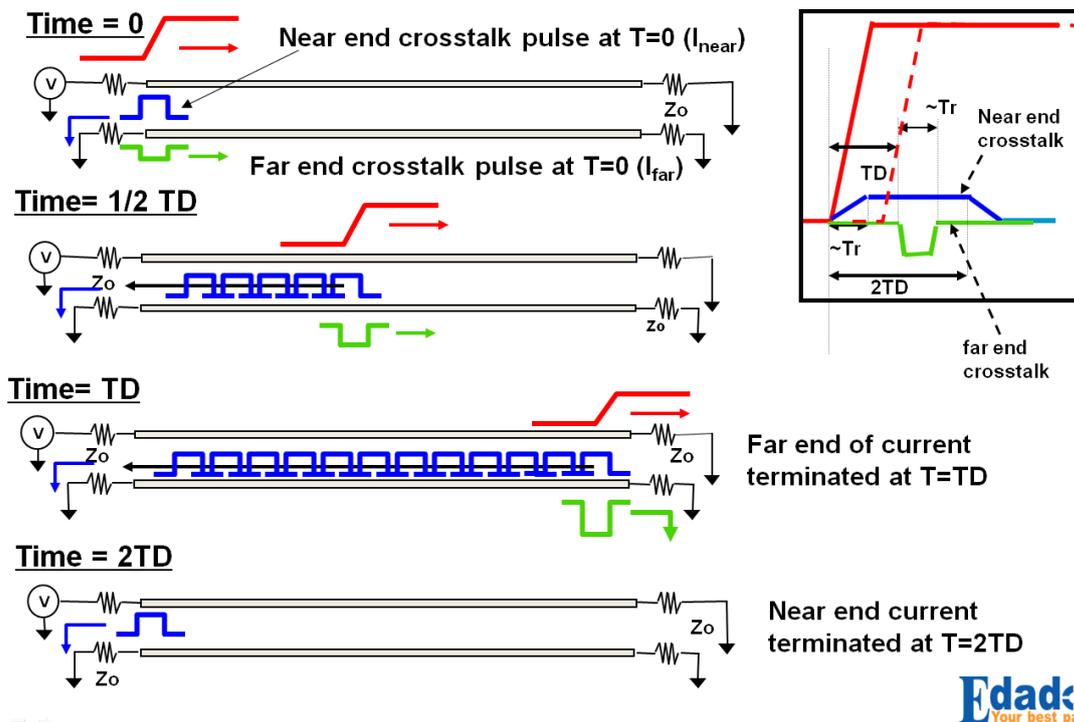
- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习



串扰探秘-近端串扰与远端串扰

大家应该都有接触过 Intel 等公司的 Designguide，对于串行总线，他们一般会有一要求是 TX 与 TX 走一起，RX 与 RX 走一起，或者规定如果 RX 与 TX 在同一层的话需要非常大的间距。为什么会有这样的要求呢？那我们就需要弄清楚近端串扰与远端串扰了。

如上一章所见，容性耦合产生的电流分成两半，一半往近端一半往远端，而感性耦合产生一个往近端的电流。于是，我们会看到一个这样的现象：



近端得到了一个持续的噪声，而由于累加的原因，远端得到了一个类似于脉冲的噪声。

$$\text{近端噪声的幅值为 } V_{near} = \frac{V_{input}}{4} \left[\frac{L_{12}}{L_{11}} + \frac{C_{12}}{C_{11}} \right];$$

$$\text{而远端噪声的幅值为 } V_{far} = \frac{V_{input}(X\sqrt{LC})}{2T_{rise}} \left(\frac{L_{12}}{L_{11}} - \frac{C_{12}}{C_{11}} \right)。$$

其中 L_{12} 与 C_{12} 是信号之间的互感与互容， L_{11} 与 C_{11} 是信号与回流路径之间的电感与互容。

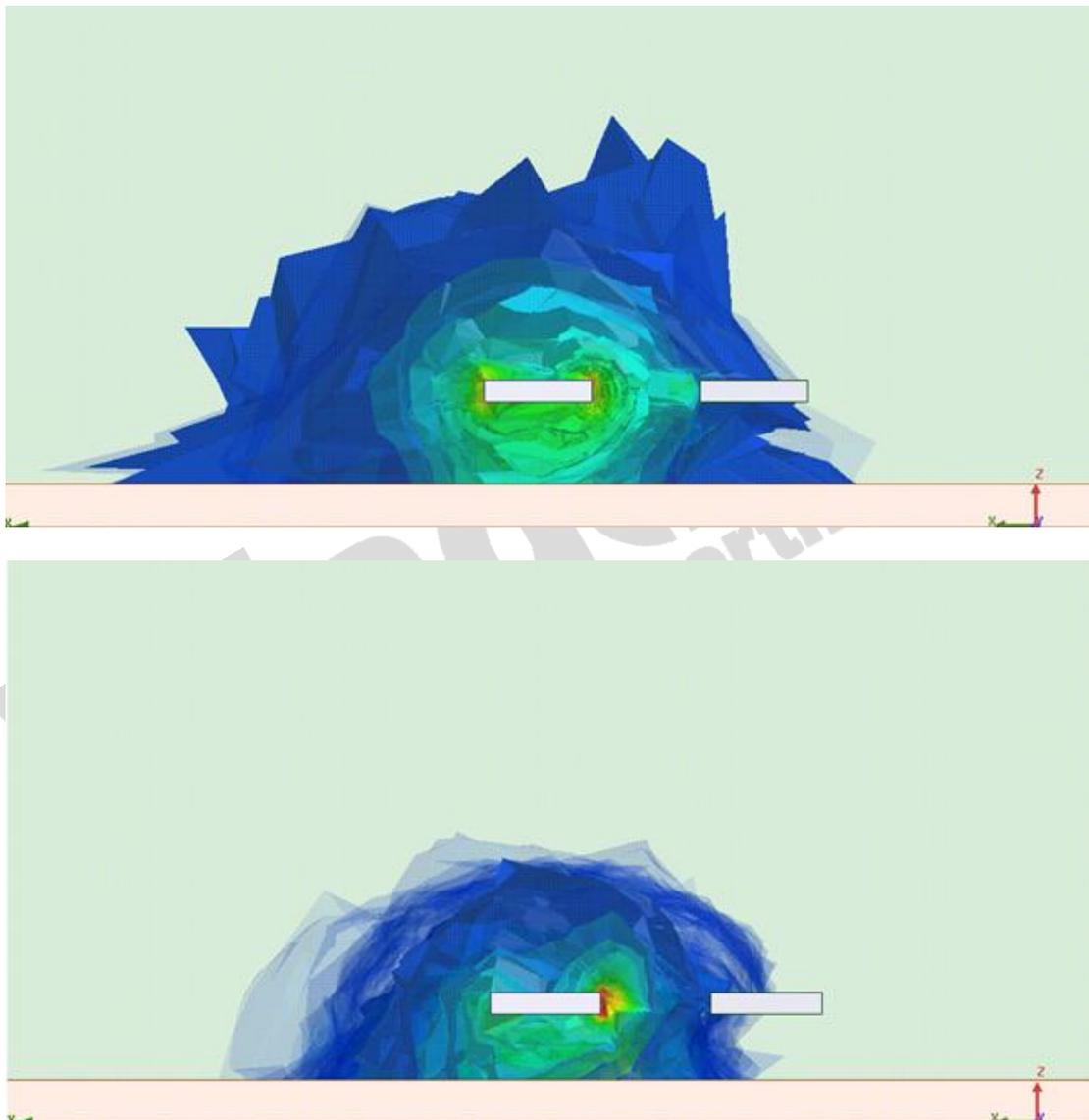
如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习



关于两个公式，我们不需要去记住，我们只需要知道它告诉了我们什么：攻击信号的幅值影响着串扰的大小；减小串扰的途径就是减小信号之间的耦合，增加信号与其回流平面之间的耦合。

有图为证：



两张图的线宽与线距是相同的。区别在于第二张图走线与参考平面更近。

还有一点很重要的隐藏在公式中，如果两线附近为同一种介质的话，有 $\frac{L_{12}}{L_{11}} = \frac{C_{12}}{C_{11}}$ ，

也就是说，带状线是不存在远端串扰的！而串行总线的输入阻抗与输出阻抗通常都为 100Ω ，这样近端串扰就不会由源端反射至接收端。所以，将串行总线的 RX 与 TX 分开，能减小串扰对串行总线的影响。

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习



问题来了

例举还有那些 designguide 中的要求是为了规避串扰的。

高速先生欢迎您和我们一起进行交流，关注微信名（高速先生），直接将答案通过会话回复，参与互动答题即有机会获得奖品，回复关键词“奖品”查看更多。

串扰探秘-3W 原则与串扰的估值

据说数学家很痛恨物理学家，因为数学家辛辛苦苦推导出来的结论居然和物理学家猜出来的结论是一样的。当然这只是一个笑话，但的确身为应用工程师的我们，很多时候需要知道的应该是一个东西是怎么来的以及它的趋势，而不需要像科学家一样去完全推导他们。

那让我们来看看 3W 原则，如下图所示：

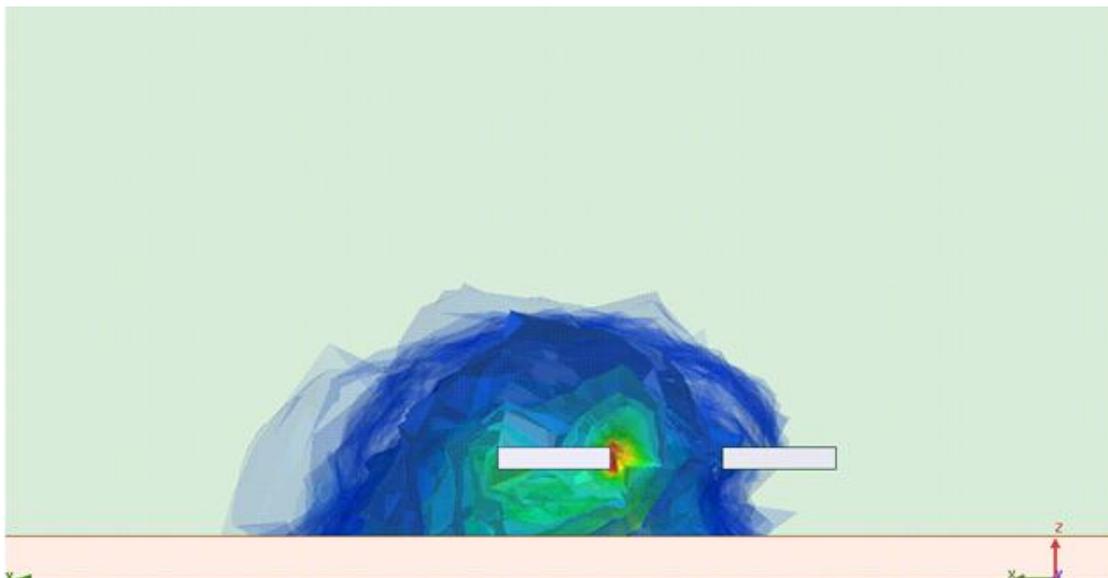


保证线的中心距大于三倍线宽，就是我们通常所说的 3W 原则。其实严谨的来说，3W 原则应该改成 3H 原则，这个 H 指的是走线与参考平面的距离，如图所示，当走线达到 3H 时，耦合到静态线上的边缘场已经非常少了，大部分的电磁场被包裹在了走线与回流平面之间。

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





这里大家要记得一个值，当走线达到 $3W$ 的时候，串扰率大约在 2% 左右（近端串扰）。

可能有人不禁会问了，难道我不同的 W ，只要符合了 $3W$ 原则，他们的串扰率都差不多吗？

没错，他们的串扰率还真是差不多的。当然，这是在我们平时 FR4 材料，阻抗控制在 50 欧姆的情况下。

如果 W 减小，两线的实际距离变近，串扰会变大，但是要保持 50 欧姆阻抗，走线必须更靠近参考平面，这样串扰会变小。一来一回之间串扰率变化是没有多少变化的。 W 变大的情况同理。

记住了 $3W$ 时的串扰率，我们就只要知道走线的中心距与串扰率的变化关系是多少就能对走线之间的串扰进行估值了。

中心距离变化改变的不就是两线之间的互容与互感么？脑子里面是不是 duang 的

冒出了一个这样的公式： $C = \epsilon_0 \frac{A}{H}$ ？

电容大小跟距离成反比，那是不是说距离增大一倍，串扰减小一半？

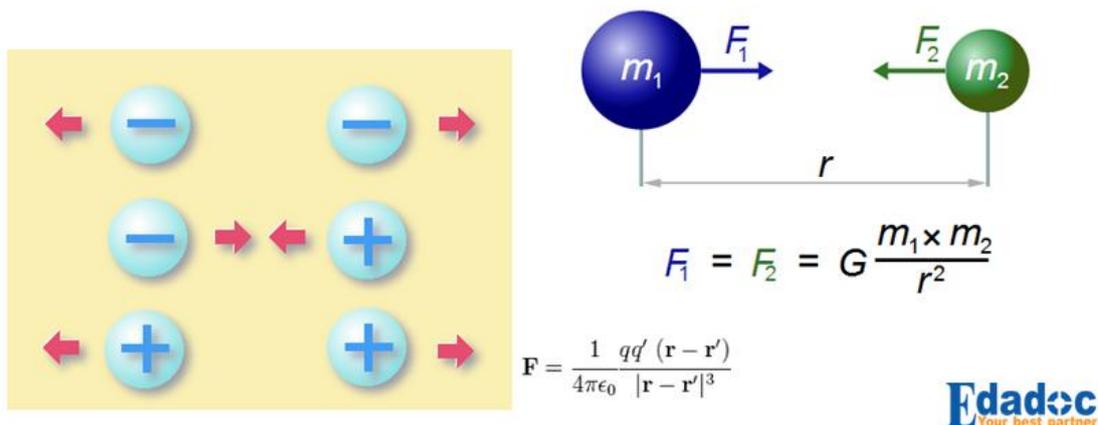
NONONO， $C = \epsilon_0 \frac{A}{H}$ 是平板电容的公式，但实际上我们的走线是立体的，应该是

距离变成 n 倍，串扰变成 $1/n^2$ 。就像洛伦兹力与万有引力一样。

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





注意这里的距离指的都是中心距哦。

当然，实际的串扰还与损耗，反射，介电常数，耦合长度等因素有关。不过这样的一个估算的方法也足够应对大部分情况了。毕竟如第一章所说，大部分数字信号可是比我们想象中的要强壮的多呢。

问题来了

当空气间距达到 5W 时，串扰率大约是多少？

高速先生欢迎您和我们一起进行交流，关注微信名（高速先生），直接将答案通过会话回复，参与互动答题即有机会获得奖品，回复关键词“奖品”查看更多。

串扰探秘-包地与串扰

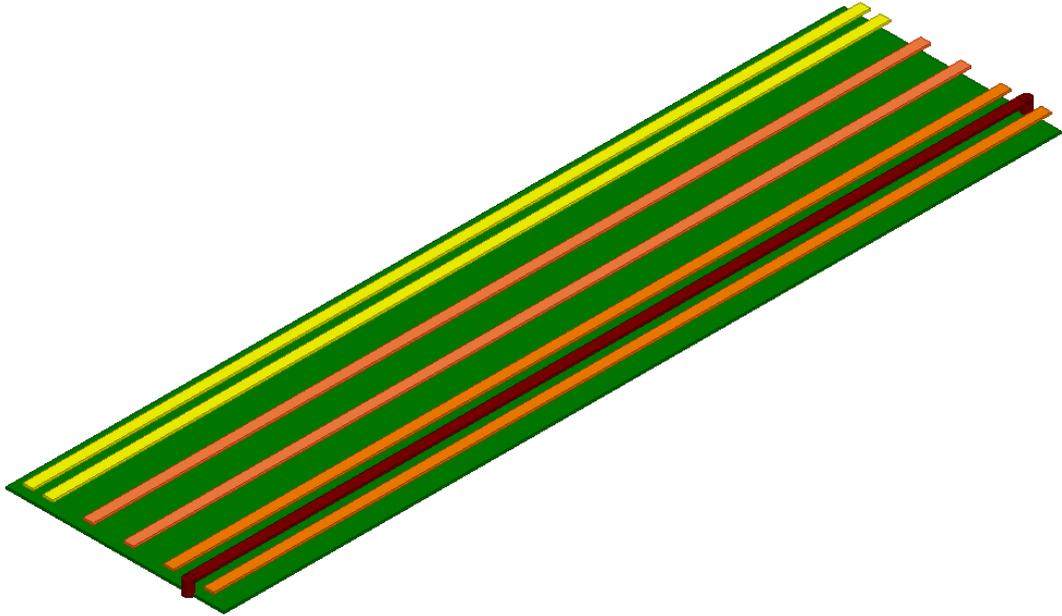
包地与串扰一直是业界非常关心的一个问题，围绕着它的争论非常多，那到底包地好还是不包地好呢？高速先生尝试着从理论和实际测试上来给大家做一个分析。

为了验证他，高速先生做了以下几种情况：

如何关注

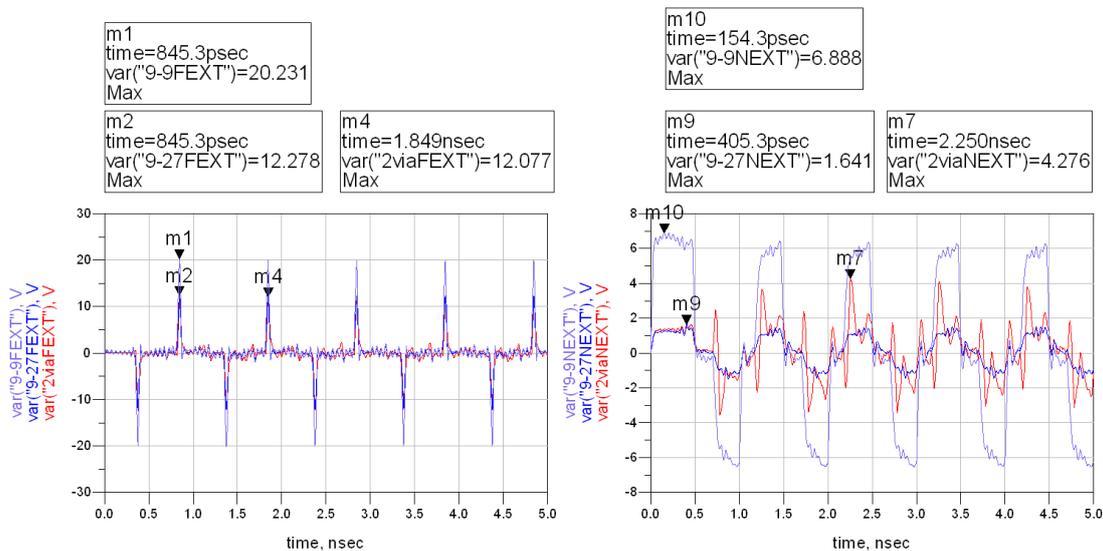
- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





所有的走线都是 9mil 的微带线，从左到右第一组走线的空气间距为 9mil，第二组间距为 27mil，为 27mil 的间距并且在中间加了一组地线。

将信号线的两端端接，并给干扰线加上一个 1GHz 的周期信号时，测试结果如下：



可以很明显的看到，加入地线后，近端串扰反而加大了，出现了类似于远端串扰的脉冲信号。

这是由于实际上地线也是线，端接到地的点会产生一个反射系数为-1 的反射。

由于近端串扰是连续的，假如传输线无损，并且传输延时足够长的话，这个-1 反射系数会让传输线上的近端串扰抵消。

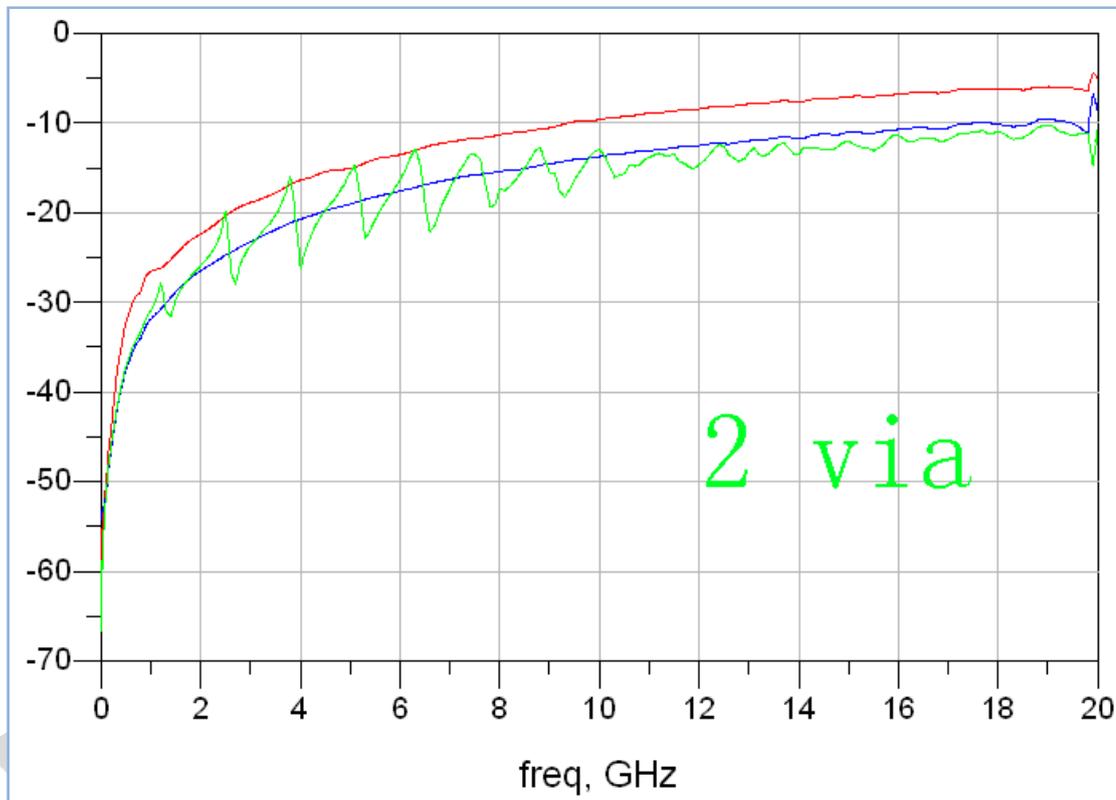
如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习



但是远端串扰是一个类脉冲信号，这个-1的反射系数使得远端串扰在地线上来回反射，并且不断的影响着静态线的近端接收。

从S参数中，我们可以很明显的看出这样一个周期性的来回反射对静态线的影响：



图中红色为 9-9 走线，蓝色为 9-27 走线，绿色为地线后的走线。

所以高速数字信号走微带线并且包地完全就是作死的节奏啊。

注意前文中的一句话，近端串扰实际上是被抵消掉的，所以上下介质层介电常数基本相同的带状线包地还是可以对串扰进行一定的抑制作用。

问题来了

我们一直说 PCB 设计是一门平衡的艺术，那双面板 DDR 走线附近使用地线是在走线串扰与什么之间做平衡？

高速先生欢迎您和我们一起进行交流，关注微信名（高速先生），直接将答案通过会话

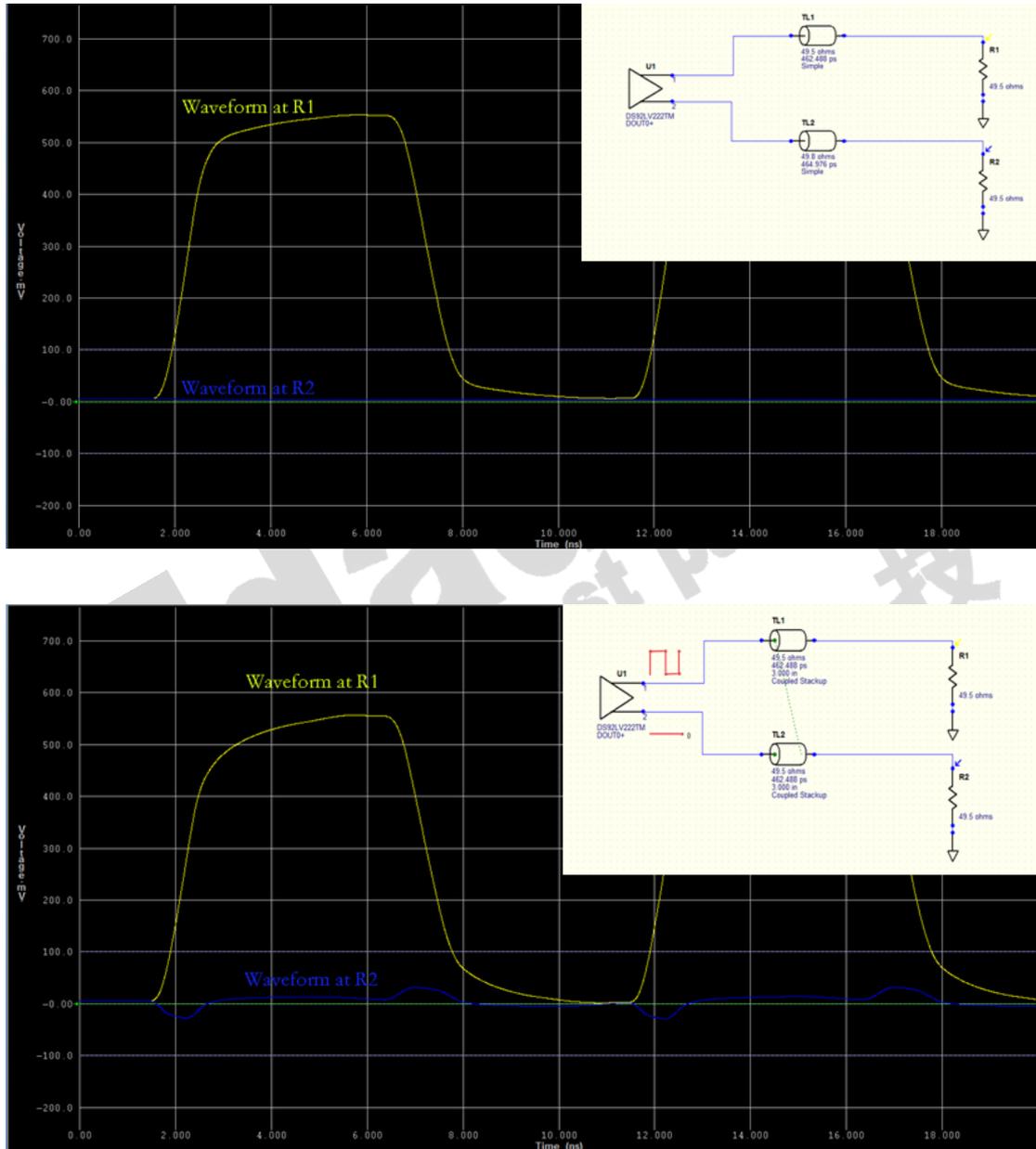
如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习



串扰探秘-串扰的应用

串扰这玩意，可是个损人不利己的东西，他将自己的能量耦合到别的走线上，不仅干扰了别人，还损耗了自己。下面两幅图展示了有无串扰时波形区别：



可以看到，能量耦合到另一条线上之后，信号本身的上升沿上出现了一个缺口，而静态线出现了一个负的远端串扰。

那如果如果在静态线上加上一个与攻击线大小相等，方向相反的信号，让两线相互耦合，会出现什么情况呢？是的，对方的远端串扰刚好将自己损失掉的那一部分能量给补上了。

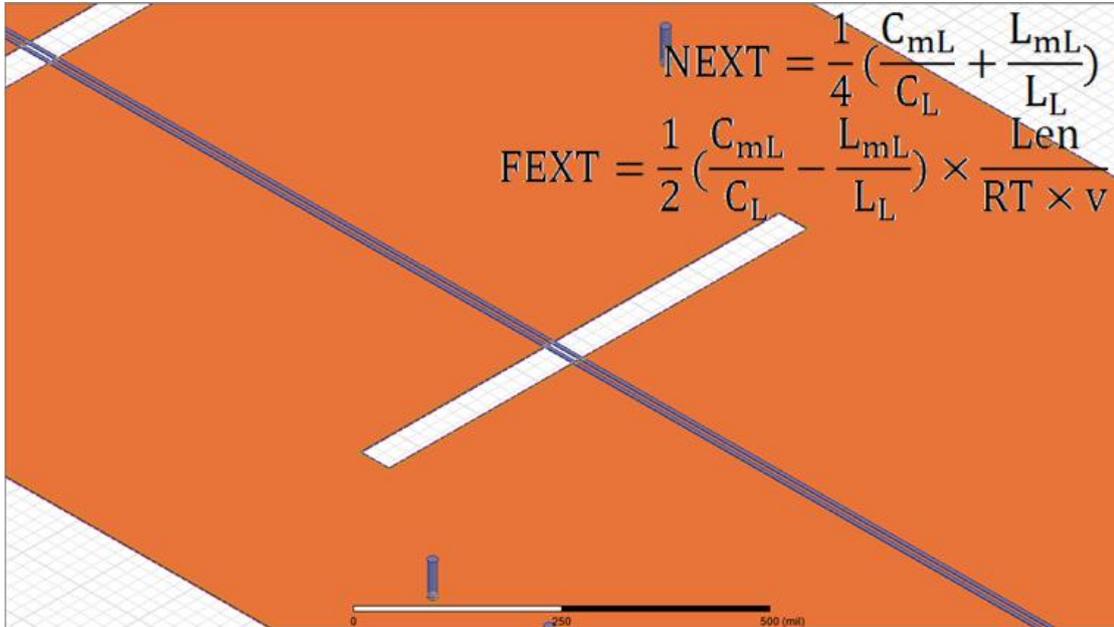
如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习



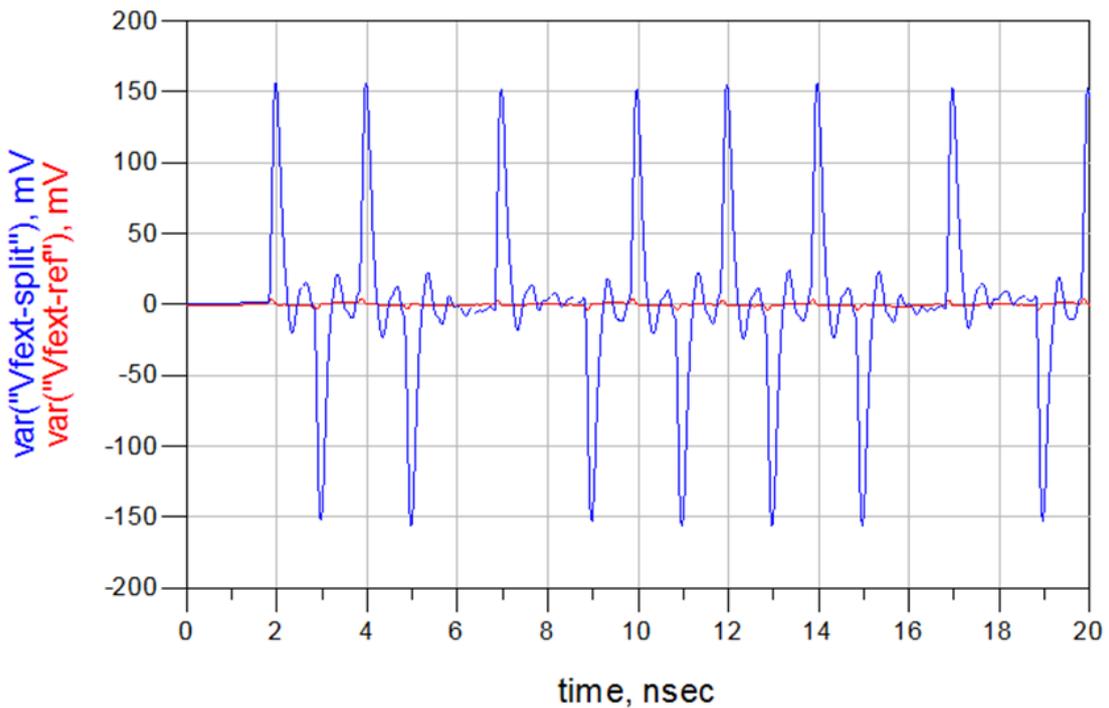
这不就是我们的差分线吗？难道高速先生这篇文章就只说点这玩意？

当然不是，让我们来看一下下面这种情况：



是的，就是我们常说的跨分割。虽然说带状线没有远端串扰，但是碰到跨分割时，站在悬崖边信号当时应该是这样想的：这悬崖刚好跟你身高一样宽耶，绕路走太远啦，朋友对不住了，借你身体一用……

于是出下了下面这张图：



如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习



(红色为不跨分割时远端串扰，蓝色为跨分割时的远端串扰)

而由于大量能量变成了远端串扰，原信号路径上传送到接收端的能量寥寥无几：



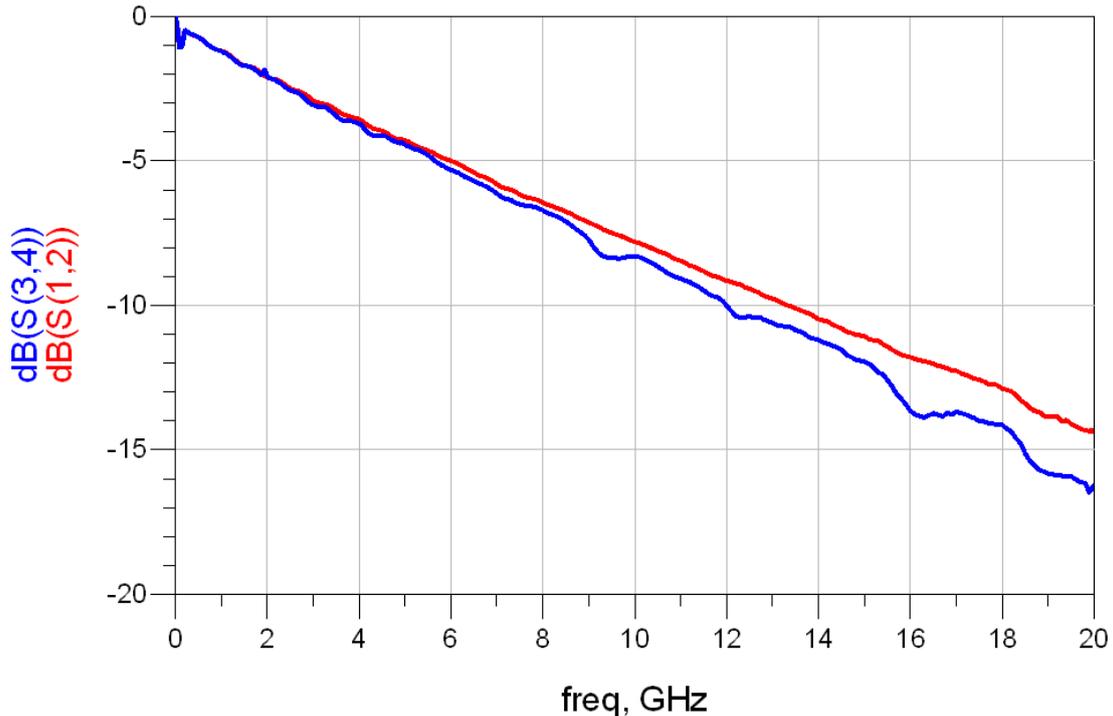
(红色为不跨分割单线插损，蓝色为跨分割单线插损)

这时，伟大的创世工程师将两根信号线变成了兄弟，你是 N 来我是 P，小 N 在过完悬崖之后回头拉了小 P 一把。于是神奇的事出现了：

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





(红色为不跨分割差分插损，蓝色为跨分割差分插损)

大部分的跨分割区域不会太宽，看过《反射详解》的兄弟们知道这样的宽度不会带来太大的影响。其实跨分割最大的影响在于串扰与 EMC。而差分线，能应付各种复杂路况。毕竟兄弟同心，其利断金。这就是串扰的运用。

问题来了

还有那些结构是利用串扰传输信号的？

高速先生欢迎您和我们进行交流，关注微信名（高速先生），直接将答案通过会话回复，参与互动答题即有机会获得奖品，回复关键词“奖品”查看更多。

串扰探秘-包地与串扰(2)

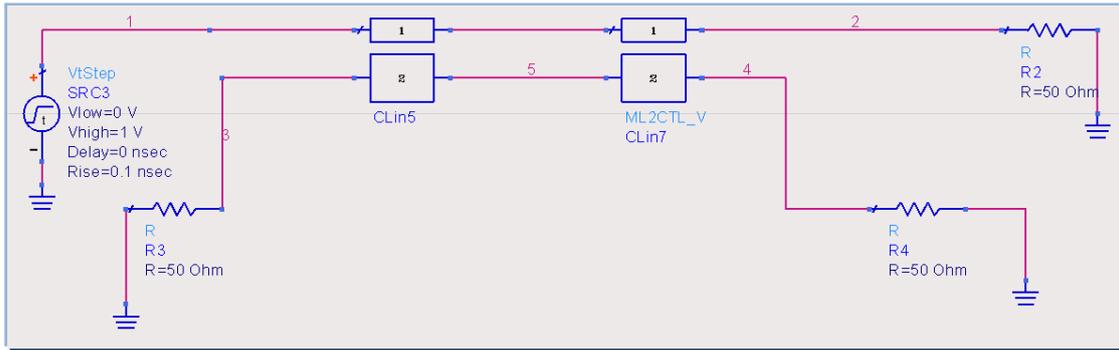
许多朋友反馈说包地与串扰有点没看明白，的确如果不是对近端串扰、远端串扰的现象以及反射理论非常熟悉的话，光看那一段文字是有点绕。小陈在这里追加一篇图文详解，看是否能为大家拨开迷雾。

我们所熟悉的串扰拓扑是这样的：

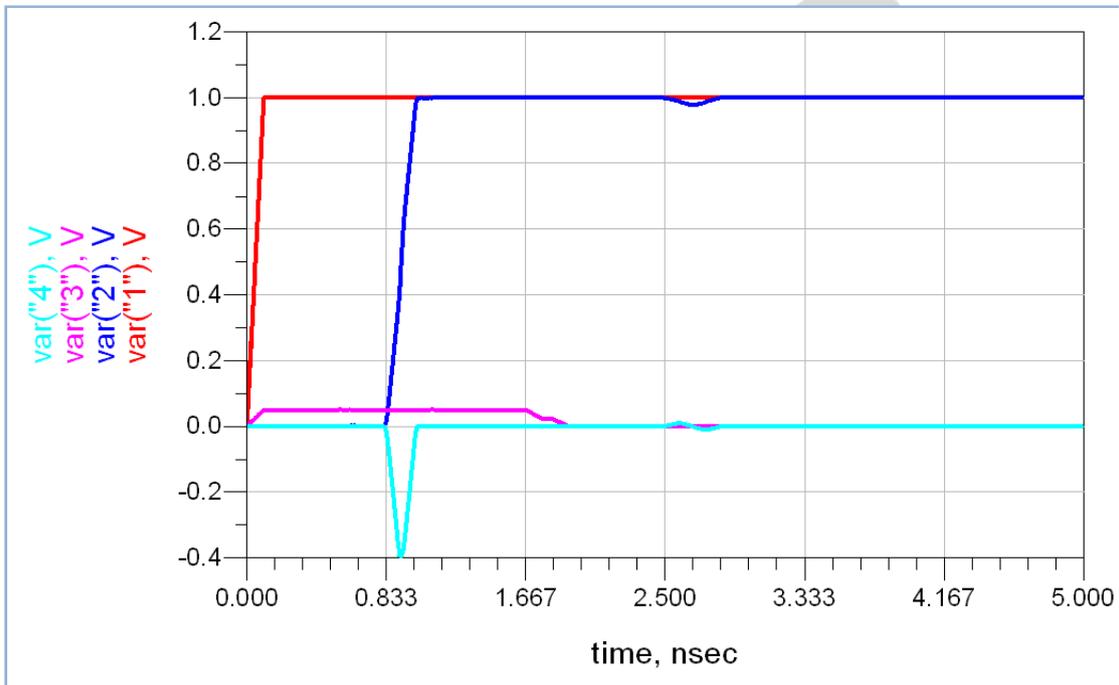
如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习

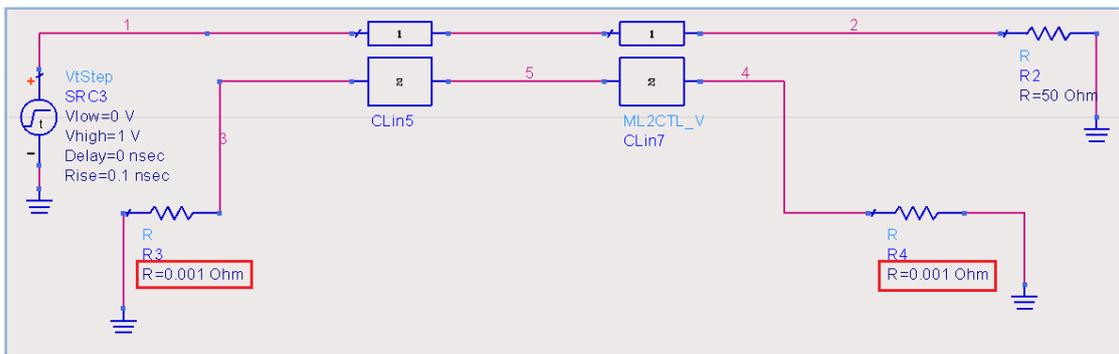




注意图中的数字：发送端 1，接收端 2，被干扰线近端 3，被干扰线远端 4。为了简化问题，我们将各端口进行了 50 欧姆端接，这样我们看到的的就是不带反射的纯串扰。就像下面这张图一样：



相信大家对这个图都很熟悉了，那我们再来模拟一下假如被干扰线两边是接地的话情况是如何的，拓扑如下：

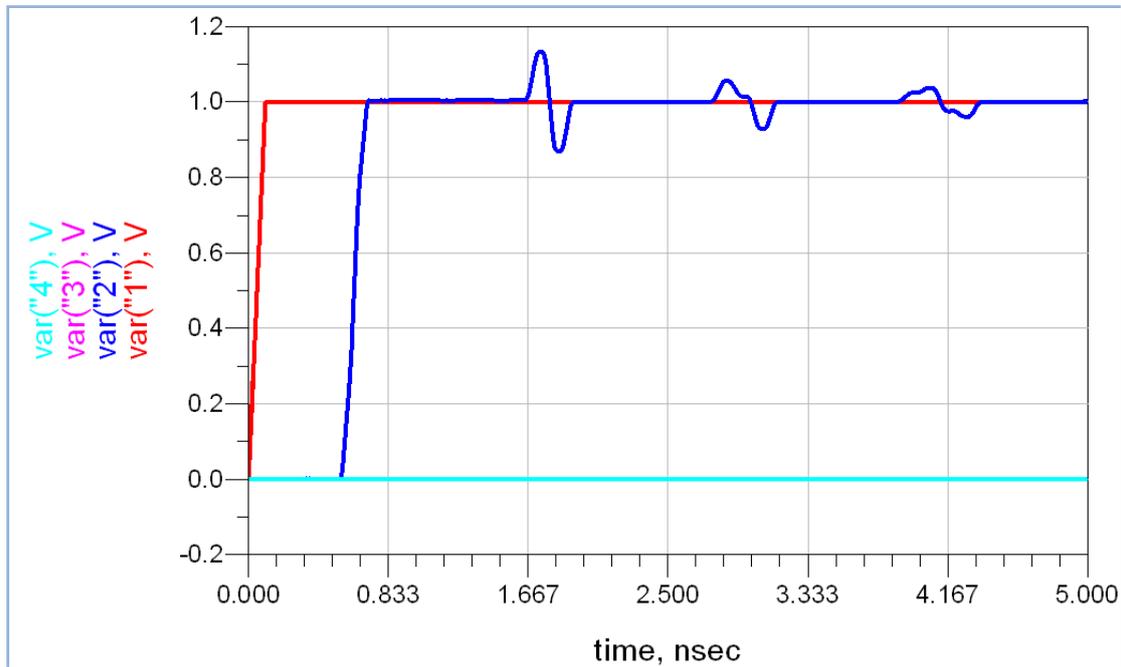


如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习



为了让仿真软件能识别，这里使用的是 1 毫欧电阻接在被干扰线两端，相当于短路，反射系数约等于-1。仿真结果如下图：



大家看一下近端与远端串扰，好像串扰是没有了，可能有些人第一反应的出来的结论是：我的走线接在地上，地是 0 电平，我在这跟线上测量到的当然也是 0 电平，怎么可能测到串扰呢？

其实在两端测不到串扰是因为这个-1 的反射系数，因为每个点的电压等于入射波+反射波。这里入射波与反射波互为相反数，加起来之后这个点电压当然是 0 了。

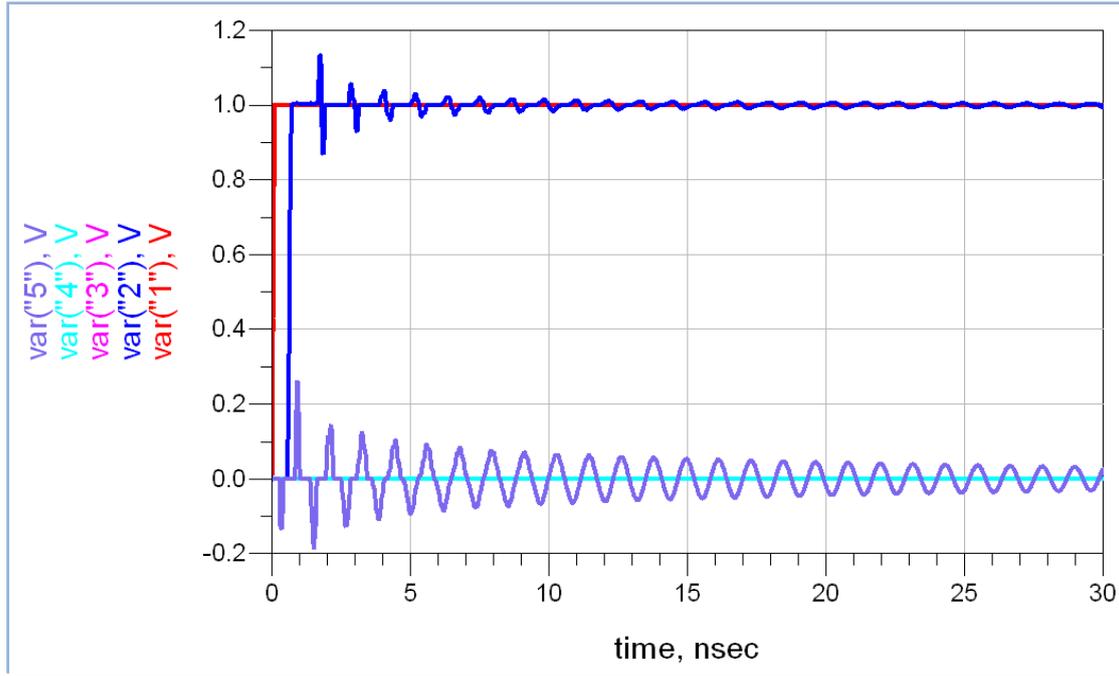
在这两个点测量到的电平时 0 可以得出整条地线上的电平都是 0 吗？当然不行，我们已经注意到了，接收端 2 处的电压是有周期毛刺的。

这时我们地线中间的观测点 5 就起作用了：

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





看到了吗？其实在地线（被干扰线）上是不停有远端串扰在来回反射的。这个远端串扰影响了原本的攻击信号，同样，也会影响被地线隔开的另外一条信号。

如《反射详解》开篇，反射串扰虽然基本，但是到最后归根溯源信号完整性还是在解决这些问题。将反射与串扰搭配在一起，不说情况千变万化，起码也有十变百化，这就需要更多的经验，更多的思考了。

问题来了

你还会包地吗？为什么？

高速先生欢迎您和我们一起进行交流，关注微信名（高速先生），直接将答案通过会话回复，参与互动答题即有机会获得奖品，回复关键词“奖品”查看更多。

【关于一博】

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习



一博科技专注于高速 PCB 设计、PCB 制板、焊接加工、物料供应等服务。作为全球最大的高速 PCB 设计公司，我司在中国、美国、日本设立研发机构，全球研发工程师 500 余人。超大规模的高速 PCB 设计团队，引领技术前沿，贴近客户需求。

一博旗下 PCB 板厂成立于 2009 年，位于广东四会（广州北 50KM），采用来自日本、德国的一流加工设备，TPS 精益生产管理以及品质管控体系的引入，致力为广大客户提供高品质、高多层的制板服务。

一博旗下 PCBA 总厂位于深圳，并在上海设立分厂，现有 12 条 SMT 产线，配备全新进口富士 XPF、NXT3、全自动锡膏印刷机、十温区回流炉等高端设备，并配有波峰焊、AOI、XRAY、BGA 返修台等配套设备，专注研发打样、中小批量的 SMT 贴片、组装等服务。

【关于高速先生】

高速先生由深圳市一博科技有限公司 R&D 技术研究部创办，用浅显易懂的方式讲述高速设计，成立至今保持每周发布两篇原创技术文章，已和大家分享了百余篇呕心沥血之作，深受业内专业人士欢迎，是中国高速电路第一自媒体品牌。



扫一扫，即可关注

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习

