

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.10.023

## 高速差分传输线的电磁辐射分析与测试

石洪华, 岳曾敬

(中国兵器工业第五八研究所基础电子事业部, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为了减小差分传输线的电磁辐射, 改善电子系统的电磁兼容特性, 在分析传输线及电磁辐射理论的基础上, 结合频谱仪和 EMSCAN 等测试仪器, 对标准 SATA 2.0 传输线的电磁辐射进行测试, 并分析此高速串行差分线的电磁辐射测试结果, 得出减小差分传输线电磁辐射的方法。该研究可为实际工程应用提供参考。

**关键词:** 差分信号; 传输线; 电磁辐射

**中图分类号:** TJ03 **文献标志码:** A

## Analysis and Test of High-Speed Difference Transmission Line Electromagnetic Radiation

Shi Honghua, Yue Zengjing

(Dept. of Basic Electronic Engineering, No. 58 Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** To reduce electromagnetic radiation of differential transmission line and expect improving the electromagnetic compatibility (EMC) of electronic system, on the basis of analysis transmission line and electromagnetic radiation theory, combine spectrum analyzer and EMSCAN equipment, testing electromagnetic radiation of standard SATA 2.0 cable, and then its results are analyzed. Finally, come up with some solution that would be applicable reference to electronic engineering design to achieve less electromagnetic radiation of difference transmission line.

**Key words:** difference signals; transmission line; electromagnetic radiation

### 0 引言

近年来, 伴随着电子产品向高速、高灵敏度、高集成化的方向发展, 对电磁兼容方面的要求也越来越苛刻。对于高速数字系统的互连设备, 电磁辐射问题非常突出, 不仅影响连接端数字系统的工作, 还干扰周围的其他设备, 因此工程师应将互连设备的电磁辐射问题纳入系统设计的一个重要方面<sup>[1-3]</sup>。在工程实践中, 对于较长距离的设备互连通常采用差分传输线, 如高速串行总线 USB 和 SATA 的物理层数据传输均采用差分对。笔者分析并测试标准 SATA 2.0 传输线, 并提出一些减小高速差分传输线电磁辐射的方法。

### 1 差分信号

当驱动器在传输线上驱动一路信号时, 在信号线和返回路径之间会存在一个信号电压, 通常称之为单端传输线信号。当两路驱动器驱动一个差分对时, 除了各自的单端信号外, 这两路信号线之间还存在着一个电压差, 称为差分信号。差分驱动电路的一般结构如图 1。

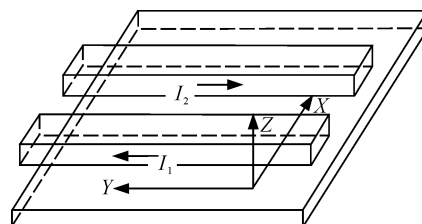


图 1 差分电路示意图

差分信号两导线中任意一点的电流均可用差分电流和共模电流表示。若双导线中的电流分别为  $I_1$  和  $I_2$ , 且规定  $I_1$  的方向为正方向(如图 1 中所示)。则  $I_1$  和  $I_2$  与差分电流  $I_d$  和共模电流  $I_c$  有以下关系:

$$I_1 = I_c + I_d \quad (1)$$

$$I_2 = I_c - I_d \quad (2)$$

由式 (1) 和式 (2) 得

$$I_c = (I_1 + I_2)/2, I_d = (I_1 - I_2)/2 \quad (3)$$

在理想情况下, 通常认为共模信号是恒定不变的。共模信号通常不携带信息, 因此也不会影响系统性能。但在实际情况下, 共模信号不可能恒定, 差分互联线的物理设计无法完全避免外界干扰和内

收稿日期: 2012-07-04; 修回日期: 2012-07-30

作者简介: 石洪华(1987—), 男, 四川人, 硕士研究生, 从事嵌入式计算机技术研究。

部信号错位, 而很小的干扰都会引起共模分量的改变, 从而引起潜在的电磁辐射问题<sup>[4]</sup>。

## 2 差分信号的辐射物理原理

差分信号由差模分量和共模分量组成, 其中, 由于差模分量的 2 个信号极性相反, 在差分传输线中耦合较好, 大部分辐射量相互抵消, 故其产生的电磁辐射量很小, 引起 EMI 的主要因素是差分信号的共模分量, 接下来将对其共模分量的辐射进行理论分析。

### 2.1 差分信号的共模辐射

为了在数字系统中产生信号, 必须加速电荷。由经典电磁理论可知, 任何加速的电荷都会产生辐射。在电路形式复杂、阻抗通路多种、频率分量多样的实际系统中, 对辐射进行准确预测和控制相当困难, 在复杂系统中, 辐射的精确仿真并不可行。因此, 笔者运用电磁理论的一些经典模型进行分析, 这样既显著降低了辐射计算的复杂度, 又能对差分传输线的辐射进行较为准确的定性分析。

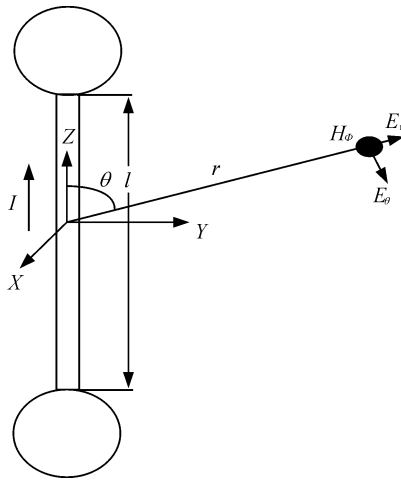


图 2 电偶极子示意图

共模信号的流向相同, 其行为类似于长度较长的天线, 可利用理想电偶极子模型(如图 2)进行分析。理想电偶极子的麦克斯韦方程组解<sup>[5]</sup>为:

$$|E_r| = \frac{60I l}{r^2} \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{r^2 (2\pi)^2}} \cos \theta \quad (4)$$

$$|E_\theta| = \frac{I l \eta_0}{2\lambda r} \sqrt{\frac{\lambda^4}{r^4 (2\pi)^4} - \frac{\lambda^2}{r^2 (2\pi)^2} + 1} \sin \theta \quad (5)$$

$$|H_\phi| = \frac{I l}{2\lambda r} \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{r^2 (2\pi)^2}} \sin \theta \quad (6)$$

该模型是建立在电偶极子等价于空间中孤立导

线( $l \ll \lambda$ )的基础上。图 2 中, 导线两端有 2 个圆球, 具有一定的电容, 从而可以假定短导线上的电流分布均匀。

### 2.2 共模近区场辐射

若  $\gamma < \lambda/2\pi$ , 则式 (4)~(6) 中  $(\lambda/2\pi\gamma)$  的高阶项是主要因素。因此, 式 (5) 和 (6) 化简为:

$$E_{\text{near}} = \frac{I l \eta_0 \lambda}{8\pi^2 r^3} = 4.8 \left( \frac{I l \lambda}{r^3} \right) \quad (7)$$

$$H_{\text{near}} = \frac{I l}{4\pi r^2} \quad (8)$$

由公式 (8) 可知, 磁场的峰值与频率无关, 由波阻抗的定义可得

$$Z_{\text{near}} = \frac{E}{H} = \frac{\eta_0 \lambda}{2\pi r} \quad (9)$$

### 2.3 共模远区场辐射

若  $\gamma > \lambda/2\pi$ , 则式 (4)~(6) 中  $(\lambda/2\pi\gamma)$  的高阶项可以忽略。由此, 式 (5) 和 (6) 简化为:

$$E_{\text{far}} = \frac{I \eta_0 l}{2\lambda r} = 6.28 \times 10^{-7} \left( \frac{I l F}{r} \right) \quad (10)$$

$$H_{\text{near}} = \frac{I l}{2\lambda r} \quad (11)$$

这种情况称之为远区场, 同样可以得到此种条件下的波阻抗, 即自由空间的本征阻抗  $\eta_0$ <sup>[6]</sup>。

### 2.4 非理想的极子辐射源

与辐射环路类似, 在许多应用中对辐射导线进行计算时, 即使频率和电路尺寸不满足  $(l \ll \lambda)$  的条件, 仍然直接使用电偶极子模型。对于尺寸较大的情况, 可以把辐射导线长度修正为  $\lambda/2$ , 这类似于在环路辐射源计算中, 对环路长度进行修正。当长度超过  $\lambda/2$  时, 辐射导线的行为就类似于传输线, 其电流分布不均匀。这样, 有效的辐射面积就会减小, 导线上各个  $\lambda/2$  段对应的电磁场会互相抵消。

如果辐射导线只有一端接有较大的电容或接地, 那么辐射导线的行为将类似于单极子, 则此时计算式中, 应使用 2 倍的导线长度。

### 2.5 有参考面时的共模辐射

当辐射导线与参考面相当接近时, 需要对式 (10)、式 (11) 进行修正。若地平面与辐射源足够接近(即半无穷平面), 那么地平面的行为将类似于辐射源。其中, 入射波将产生反射波, 这类似于传输线上端接短路负载时产生的反射。根据波长及参考

面与辐射源距离的不同，反射波可能增强或减弱辐射波。

### 3 差分传输线的电磁辐射测试与分析

经过以上电磁辐射理论的分析，现基于频谱扫描近区场探头和 EMSCAN 系统对高速差分传输线进行电磁辐射测试。测试所用差分传输线采用标准的 SATA 2.0 电脑硬盘连接线。

首先利用接有近区场探头的频谱仪，对测试线进行 SATA 2.0 标准相应频段频谱的扫描，扫描结果如图 3。

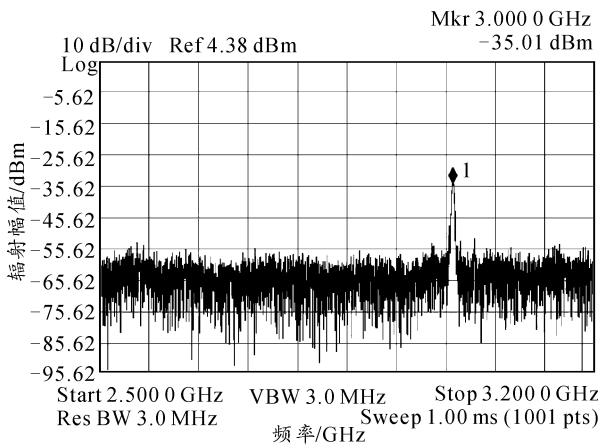


图 3 近区场探头频谱扫描结果

由近区场探头的测试结果知道辐射峰值约为 -35.01 dBm，对应频率为 3.000 GHz。再由 EMSCAN 系统进行相应频段的扫描，扫描结果如图 4。

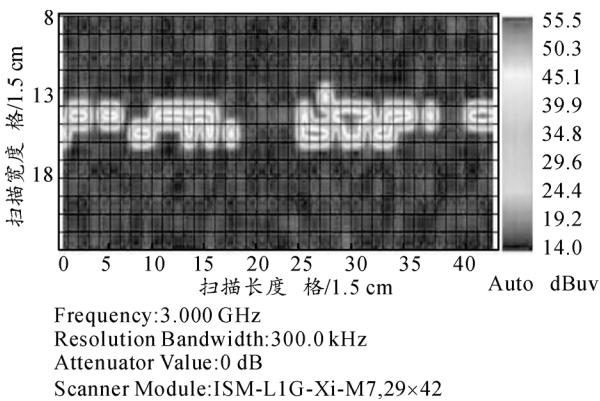


图 4 EMSCAN 电磁辐射扫描结果

通过近区场探头测试可知，此种传输线的电磁辐射峰值较大，辐射量比较明显，但对比美国联邦

通信委员会 (federal communications commission, FCC) 的电磁辐射标准，还具有一定冗余，在此高频的传输模式下，电磁辐射的峰值已经达到较好的效果。

在图 4 中可以看到，电磁辐射以点状分布，这是由于辐射点处的差分对传输信号出现错位而导致了明显的共模辐射。

结合前几节的理论分析，从测试结果和测试线结构可以得出减少高速差分传输线电磁辐射的结论如下：

- 1) 降低差分传输线之间的不对称和驱动器之间的错位，可以减小差分信号向共模信号的转化。
- 2) 在差分传输线中加入屏蔽层。如在 SATA 传输线中，差分线之间有地线隔离，在差分线外有一地线屏蔽层，在这种结构下，外部电场或磁场较小，共模电流向外辐射量相应减小。
- 3) 在实际应用中，添加共模扼流器，增大共模电流路径的阻抗也是一种减小电磁辐射的方式。如一些 USB 连接线上环绕一块铁氧化体，铁氧化体的高导磁率增大了流经其周围的净电流阻抗。

### 4 结束语

笔者从电磁辐射理论推导入手，以高速串行差分线的电磁辐射的测试为例，分析得出一些减小差分传输线电磁辐射的结论，可为硬件工程师们的 EMC 设计提供参考。

#### 参考文献：

- [1] 韩放. 计算机视频屏蔽电缆的电磁泄漏[J]. 微波学报, 1993, 3(3): 46-48.
- [2] 李炜, 张国全, 方坤. 计算机系统的线缆耦合泄漏研究[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(9): 2944.
- [3] 古健. 电磁辐射影响计算机主板的模拟计算[D]. 成都: 四川大学, 2005: 25-28.
- [4] Howard Johnson. 高速数字设计[M]. 沈立, 等. 译. 北京: 电子工业出版社, 2011: 106-151.
- [5] Stephen H. Hall. 高速数字系统设计-互连理论和设计实践手册[M]. 伍微, 等. 译. 北京: 机械工业出版社, 2005: 168-182.
- [6] Douglas Brooks. Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design[M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2003: 151-152.