

高速串行数据链路中基于相位噪声时钟抖动测量

沈小青, 楼 扬, 叶玲玲, 杨 洋

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 传统并行数据通信随着速度的增加, 传输时延已难以准确控制, 使得高速串行数据传输成为通信的主要方式, 当数据速率超过 GB/s 水平, 时钟信号引入的抖动已成为系统抖动的主要成分, 低数据速率抖动分析技术已难以满足要求, 相位噪声测量技术在高速串行数据链路抖动分析中提供了解决方案, 文章从原理上论述了相位噪声与抖动的关系, 以实例给出了通过相位噪声测量间接测量抖动的工程计算方法。

关键词: 高速串行数据传输; 相位噪声; 抖动

Measurement of Clock Jitter in High-speed Serial Data Link Based on Phase Noise

Shen Xiaoqing, Lou Yang, Ye Lingling, Yang Yang

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: With the speed of the conventional parallel data communication increases, the transmission delay has been difficult to accurately control, so the High-speed serial data transmission become the main form of communication. When the data rate over Gb/s level, the clock signal introduced jitter has become a major component of the system jitter. Low data rate jitter analysis techniques have been difficult to meet the requirements, phase noise measurement technology provides solutions in high-speed serial data link jitter analysis. This article taking the examples of the calculation method by phase noise measurements indirect measure jitter, and discusses the relationship between the phase noise and jitter from the principle. discusses the relationship between the phase noise and jitter in principle.

Keywords: high-speed serial data transmission; phase noise; jitter

0 引言

并行数据通信技术是提高数据传输率的重要手段, 由于并行传送方式要求使用同一时序传播信号, 同一时序接收信号, 其数据传输速度的提升主要通过提升时钟频率和总线位宽来实现, 在位宽固定的情况下, 提升时钟频率则成为有效手段, 并行数据传输中多通道数据与时钟分别传送, 时钟频率的增加常因布线长度稍有差异、PCB 阻抗不匹配等, 使得传输路径不一致产生建立与保持时间相悖, 数据传送的时序难以与时钟合拍, 同时时钟频率的增加还易引起信号线间的相互干扰, 导致传输错误。因此, 高速数据传输串行方式已成为通信主流。在高速串行数据传输超过 Gb/s 时, 时钟信号引入的抖动已成为系统抖动的主要成分, 在低速数据率条件下采用的诸如时间间隔分析、周期到周期、周期抖动等抖动分析技术已难以适应, 而相位噪声测量技术等间接分析手段提供了较好的解决办法。

1 抖动产生机理、分类及传播

NIST 对抖动的定义为: 数字信号的短期相位变化在特定时刻偏离其理想时间位置, 频率高于 10 Hz 的时间偏移为抖动, 而频率低于 10 Hz 的时间偏移为漂移。在高速串行数据通信中, 时钟嵌入在数据中并在接收机中恢复, 一般无需考虑

漂移。

1.1 抖动产生机理

时钟信号可以用下式表示:

$$V(t) = (V_{carrier} + \Delta V(t)) \exp(j(2\pi f_c t + \Delta\phi(t))) \quad (1)$$

由式 (1) 可以看出, 抖动主要由幅度噪声和相位噪声产生, 信号上升沿因幅度噪声引起抖动; 晶体振荡器噪声引入的相位噪声导致边沿变化从而产生抖动; 在现行的串行总线中, 时钟恢复中的幅度噪声问题比实际数据转换更为严重, 时钟恢复缺陷会导致数据可能在易发生错误的时刻选通上升或下降延。如图 1 所示, τ 模块表示时钟恢复模块 (CDR) 中相位超前或滞后, 其由 VCO 或晶振相位噪声及锁相环设计缺陷引起^[1]。

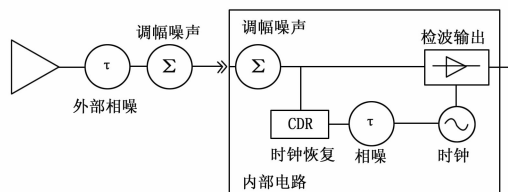


图 1 抖动来源于内部和外部电路

1.2 抖动的分类及传播

抖动分类^[2]: 信号抖动由产生原因的不同具有不同的特性, 抖动分类对于抖动测量和分析非常重要, 根据抖动分量的不同成因, 有多种方法分类, 通常用抖动树如图 2 所示。

为比较不同抖动分量性能, 需要采用单一量来描述一定比

收稿日期: 2014-10-09; 修回日期: 2014-11-20。

作者简介: 沈小青 (1971-), 男, 江苏无锡人, 高级工程师, 硕士, 主要从事计量测试方向的研究。

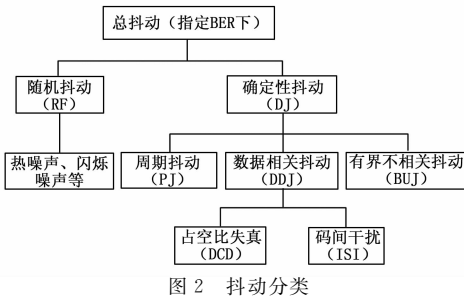


图 2 抖动分类

特误码率抖动总量, 故采用总体抖动来表征, 定义在某个比特误码率, 表示为 TJ (BER)。按抖动随机性分为确定性抖动 (deterministic jitter, DJ) 和随机抖动 (random jitter, RJ)。随机抖动主要由热噪声、闪烁噪声等引起; 确定性抖动可分为周期抖动 (PJ), 数据相关抖动 (DDJ), 有界不相关抖动 (BUJ)。按抖动是否有界可分为有界抖动和无界抖动, 确定性抖动属于有界抖动, 一般用峰峰值 (J_{PP}) 来度量。随机抖动属于无界抖动, 其出现的时间和大小都是随机的, 服从高斯分布, 一般用均方根值 (J_{RMS}) 来度量。抖动还可以按相关性来分类, 分为相关性抖动和非相关抖动, 占空比失真 (DCD) 抖动、码间干扰 (ISI) 抖动都与信号相关, 属于相关抖动。

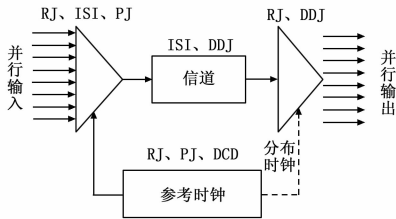


图 3 抖动的传播

串行数据系统中各个环节抖动均有产生, 参考时钟产生 RJ、PJ、DCDE, 由振荡器的热噪声或电路非线性产生; 发射机部分产生的抖动有 RJ、ISI、PJ 等; 传输信道产生的抖动有 ISI、DDJ 等; 接收机产生的抖动有 RJ 和 DDJ。

2 时钟抖动测量

2.1 时钟对抖动的影响

串行数据链路中, 参考时钟是系统数据的终极源, 无论集中还是分布式时钟系统中, 均由其提供时基给发射机。接收机中通过时钟参考电路恢复参考时钟, 故有必要探讨时钟抖动对发射机的影响。发射机必须用适当的因数乘以参考时钟获得数据速率, 才能确定逻辑变换定时。如系统参考时钟 100 MHz, 输出 3 GB/s 信号, 则发射机通过锁相环乘法器使参考时钟倍乘 30, 乘法器不仅放大时钟抖动, 自身还会引入抖动, 主要是压控振荡器 (VCO) 产生的 RJ。锁相环电路中频率倍乘因子为 n , 则相位噪声功率载波比乘以 n^2 , 故倍乘因子愈大, 抖动愈大。

2.2 通用抖动测量设备比较

常用的时钟抖动分析手段有实时示波器、等效取样示波器、相位噪声分析仪, 相位噪声分析仪的抖动噪底最优, 达数十 fs 量级, 等效取样示波器达到数百 fs 量级, 而实时示波器达到数 ps 量级。动态范围或抖动测量上限能力则相反, 测量能力如表 1 所示。

2.3 相位噪声法测量时钟抖动

抖动和相位噪声均用于表征时钟信号的同一现象的两种定

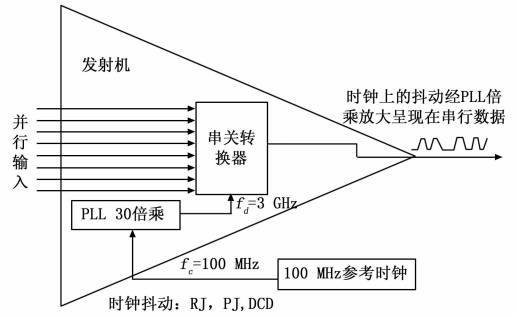


图 4 时钟对抖动的影响

表 1 通用抖动测量设备比较

测量设备	抖动噪底	动态范围或抖动测量上限
实时示波器	数 ps	数个 UI
取样示波器	数百 fs	约 0.25 UI
相位噪声分析仪	数十 fs	数 mUI

量方式。抖动中确定性抖动由可识别干扰信号产生。随机性抖动由较难预测的因素导致时序变化, 其最基本的特性就是随机性, 因此可以用高斯统计分布来描述其特性。相位噪声是对信号时序变化的另一种测量方式, 这两种抖动在信号相位噪声上得到综合体现。现阶段时钟信号相位噪声测试方法已经非常成熟, 而抖动在 10fs 级的直接测量却有很大困难, 因此通过间接测量相位噪声通过计算推导出时钟的抖动具有实际的工程意义, 下文以正弦波时钟信号来推导相位噪声和抖动的数学关系^[3]。

设时钟信号为式 (1), 时钟信号矢量图如 5 图所示。

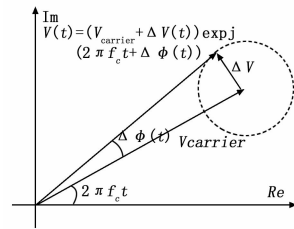


图 5 时钟信号矢量图

$$\text{相位噪声谱 } L(f) = \frac{1}{2} \times \frac{V_{\text{noise rms}}^2 / R}{V_{\text{carrier}}^2 / R} / \Delta f$$

$$\text{而 } \text{tg}(\Delta\varphi(t)) = \frac{\Delta V_{\text{noise}}}{V_{\text{carrier}}}$$

$$\text{在满足小角度条件下 } \Delta\varphi(t) = \frac{\Delta V_{\text{noise}}}{V_{\text{carrier}}}$$

则

$$L(f) = \frac{1}{2} \times \frac{V_{\text{noise rms}}^2 / R}{V_{\text{carrier}}^2 / R} / \Delta f = \frac{1}{2} \times \frac{\Delta\varphi^2(t)}{\Delta f} = \frac{1}{2} S_{\varphi}(f) \quad (2)$$

$$\text{根据抖动定义, } J(t) = \frac{\Delta\varphi(t)}{2\pi f_c}$$

$$\text{由式 (2) 可知, } \Delta\varphi^2(t) = \int_{f_1}^{f_2} S_{\varphi}(f) df = 2 \int_{f_1}^{f_2} L(f) df$$

得

$$J(t) = \frac{\Delta\varphi(t)}{2\pi f_c} = \frac{1}{2\pi f_c} \times \sqrt{2 \int_{f_1}^{f_2} L(f) df} \quad (3)$$

[2] 姚 钢. 深迪半导体破局国产 MEMS 陀螺仪 [J]. EDN CHINA 电子设计技术, 2010, (2): 63 - 63.

[3] 孔星炜, 郭美凤, 董景新, 等. 国产微惯性传感器应用于 INS/GPS 系统的设计与实现 [A]. 中国航空学会控制与应用第十三届学术年会论文集 [C]. 2008: 1 - 5.

[4] 田晓春, 李 杰, 范玉宝, 等. 基于 FPGA 的 MEMS 陀螺仪 SAR150 实时数据采集系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (11): 3107 - 3112.

[5] 马游春, 张 涛, 李锦明. FPGA 集成 FIFO 在高过载存储测试系统中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2006 (z3): 2350 - 2351.

[6] MSA009 Technical Datasheet [EB/OL]. http://www.cetc13.cn, 2012, 04 - 23

[7] Sun N, Wu Q, Jin Z. A Storage Architecture for High Speed Signal

Processing; Embedding RAID 0 on FPGA [J]. Journal of Signal & Information Processing, 2012, 3 (3).

[8] 徐 博, 熊庆国, 原 辉. 基于 ADS8361 与 FPGA 器件的新型数据采集系统设计 [J]. 工业安全与环保, 2013, (7).

[10] Li J M, Liu Y, Gong J, et al. Application of FIFO Integrated into FPGA in the Image Acquisition and Storage System [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 58: 2676 - 2681.

[11] Samsung Electronics. Datasheet [EB/OL]. http://www.samsung.com.cn, 2010 - 01 - 30.

[12] Ming L, Mingjie L. Research on Missile-Borne Storage Measurement System [A]. Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2009. ICMTMA'09. International Conference on [C]. IEEE, 2009, 1: 326 - 329.

(上接第 1471 页)

在抖动的测量中, 需进行近似计算得到, 下面举例说明: PN9000 相位噪声测试系统测试时钟振荡器相位噪声谱如图 6 所示, 时钟信号频率为 100 MHz, 需求出 10 kHz 到 10 MHz 这个频带范围内噪声引起的抖动, 由式 (2) 可知, 抖动需通过 $L(f)$ 函数在测量频段内 (即 10 kHz 到 10 MHz 频段内) 积分得到, 作为工程计算, 可以通过采用直线拟合曲线, 求出该频带范围内 $L(f)$ 的积分, 间接求出抖动值。如图 7, $L(f)$ 频率轴、电平轴为对数坐标, 相位噪声通常可通过分段线性法近似得到。 $L(f)$ 可以表示为:

$$L(f) = \sum_{i=1}^{m-1} [k_i(\lg(f) - \lg(f_i)) + b_i][U(f - f_i) - U(f - f_{i+1})] \quad (4)$$

$$k_i = (L(f_{i+1}) - L(f_i)) / (\lg(f_{i+1}) - \lg(f_i)), b_i = L(f_i)$$

其中: $m-1$ 为分段函数的线段数, k_i 为线段斜率, b_i 为线段端点处电平值, 而 $U(f)$ 为阶跃函数。

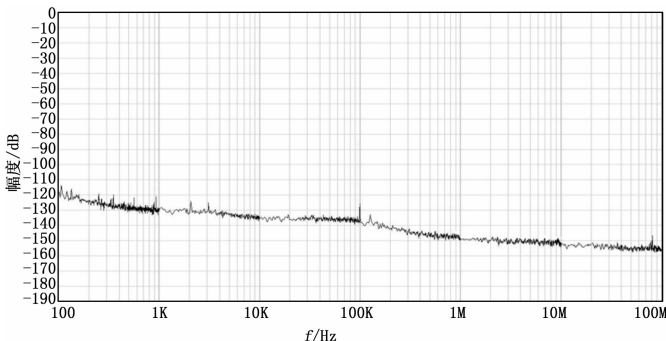


图 6 时钟信号相位噪声谱

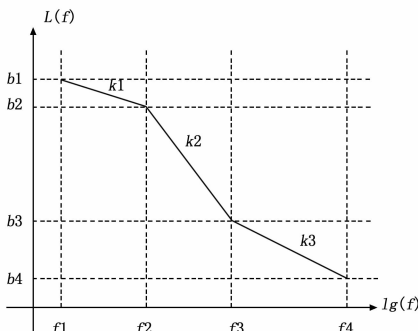


图 7 计算示意图

将式 (4) 中的 $L(f)$ 带入式 (3), 可以得到:

$$J(t) = \frac{1}{2\pi f_c} \times \sqrt{2 \int_{f_i}^{f_{i+1}} \sum_{i=1}^{m-1} [k_i(\lg(f) - \lg(f_i)) + b_i] df} = \frac{1}{2\pi f_c} \times \sqrt{2 \int_{f_i}^{f_{i+1}} \sum_{i=1}^{m-1} 10^{\frac{b_i}{10}} f_i^{-\frac{k_i}{10}} f^{\frac{k_i}{10}} df} = \frac{1}{2\pi f_c} \times \sqrt{2 \sum_{i=1}^{m-1} 10^{\frac{b_i}{10}} f_i^{-\frac{k_i}{10}} (f_{i+1}^{\frac{k_i}{10}+1} - f_i^{\frac{k_i}{10}+1}) / (\frac{k_i}{10} + 1)} \quad (5)$$

表 2 为计算参数, 用于分段函数参数计算, 其中 $f_c = 100$ MHz。

表 2 $L(f)$ 参数值

f/kHz	10	100	1 000	10 000
$L(f)/\text{dBc}$	-135	-138	-149	-152
i	1	2	3	4
f_i/kHz	10	100	1 000	10 000
$k_i/\text{dBc/decade}$	-3	-11	-3	N/A
b_i/dBc	-135	-138	-149	-152

将表 2 中的数值带入式 (5), 可以得到:

$$J(t) = 0.25\text{ps} \text{ (带宽在 } 10 \text{ kHz 到 } 10 \text{ MHz)}$$

由于近似计算采用的是直线拟合曲线, 其结果比数字积分计算出的值往往要小一些, 通过增加拟合直线的数量, 可以更近似相位噪声曲线, 计算更精确。在抖动测量中, 相位噪声测量方法在所有的的方法中是最灵敏的。

3 结束语

抖动测量在高速串行数据系统中非常重要, 本文推导了在时域测量的抖动和在频域测量的相位噪声之间的数学关系, 基于两者的数学关系, 从工程计算的角度, 提出了一种用相位噪声谱间接测量周期抖动的快速评估方法, 不仅改变了传统的抖动测量方式, 还能以飞秒级分辨率对时钟抖动进行全面分析, 对于系统电路的设计应用以及快速验证具有重要意义。

参考文献:

[1] Agilent. Measuring Jitter in Digital Systems [Z]. 5988 - 9109.

[2] Agilent. Using Clock Jitter Analysis to Reduce BER in Serial Data Applications [Z]. 5989 - 5718.

[3] Agilent. Jitter Analysis Techniques for High Data Rates [Z]. 5988 - 8425.