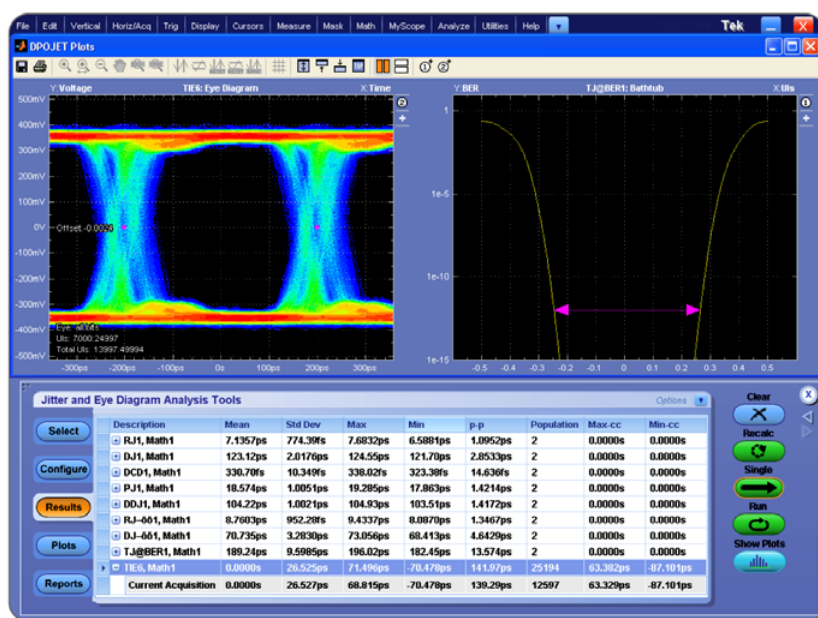


## 使用频谱方法 分析抖动



### ▶ 采用 DPOJET – 抖动和眼图分析工具

使用实时抖动分析工具及 Rj/Dj 分离功能预测系统误码率。

#### 引言

随着定时裕量越来越紧、时钟速率越来越快推动着当前高速设计向前发展,抖动正越来越多地成为导致系统错误的主要原因。抖动成分分离和测量有助于调试高速电路,许多高速串行数据标准都要求识别和测量抖动成分,如 SATA、PCI-Express、Display Port、光纤通道、SONET、SDH 和千兆位以太网。本指南介绍了使用频谱分析方法分析和测量抖动成分的新途径。根据抖动分析结果估算误码率(BER)只需要几秒钟的时间,而传统

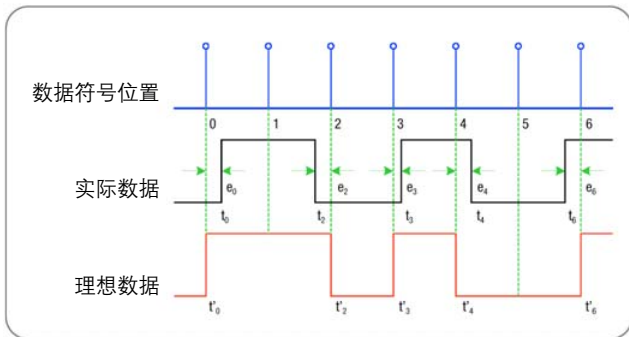
BER 分析设备则需要几分钟、甚至几个小时的时间。泰克抖动和眼图分析工具 DPOJET 中已经实现了这种方法。该软件兼容 DPO7000、DPO70000 和 DSA70000 示波器。本指南介绍了在 DSA70000 数字示波器中 DPOJET 的使用。

本文介绍了:

- ▶ 抖动及其成分
- ▶ 使用频谱方法分离抖动成分
- ▶ 估算误码率

## 使用频谱方法分析抖动

### ► 应用指南



► 图 1. 抖动的定义。

### 抖动及其成分

抖动是串数据位中有效边沿较理想位置的偏差。如图 1 所示，抖动( $e_i$ )是事件预计发生时间( $t'_i$ )与事件实际发生时间( $t_i$ )之差。在数字通信链路中，抖动是信号跳变预计位置与跳变实际位置之间的偏移。

在串行数据通信中，抖动可能是一个关键问题，因为数据时钟通常不与数据一起传送，因此，发射机数据信号上抖动过高会在接收端导致数据恢复错误。为防止误码率过高，许多标准中规定了抖动余量，以便发送电路和接收电路可以设计成在抖动预算和容限范围内工作。为保证设备在这些预算范围内工作，必需精确地测量抖动。测量不仅要量化抖动，还应帮助设计人员考察抖动的成因和来源，协助减少或消除抖动来源。

抖动分成两大类：确定性抖动(Dj)和随机抖动(Rj)。这两类抖动在串行数据通信过程中的积累方式是不同的。Rj被视为无界成分，通常呈高斯分布，因此符合某些统计规则。Dj被视为有界成分，由ISI、DCD和Pj成分组成。

**Dj**是确定性抖动。它可以预测，具有一致性，有具体的成因。Dj由ISI、DCD和Pj组成，幅度呈非高斯分布，一直有界。Dj取决于有界峰到峰值。

**ISI**是码间干扰，是数据相关的确定性抖动，一般是由通道散射或滤波导致的。在从位序列(符号)不同位置开始时，当信号在不同时间达到接收机门限时，会发生码间干扰，也称为数据相关抖动(**DDj**)。

**DCD**是占空比失真。它是时钟类码序列中正脉冲的平均脉宽与负脉冲的平均脉宽之差。幅度偏置误差、开机延迟和饱和都可能会导致占空比失真。

**Pj**是周期性抖动，它以与数据无关的周期循环重复。Pj的典型成因是开关式电源的供电馈通。可以使用一个或多个正弦波及其谐波建立Pj模型。

**Rj**是随机性抖动。Rj呈高斯分布，理论上其幅度是无界的。高斯分布的特点取决于均方根(RMS)值或标准偏差。可以很容易说明，一般来说，任何高斯随机变量在 $10^{12}$ 次中，大约只有一次会超过标准偏差14倍的跨度。如果超过这个跨度在数据通信系统中导致误码，那么其对应的误码率(BER)就是 $10^{-12}$ 。Rj主要是由于电气组件中的热噪声引起的。

**Tj**是总抖动，由Dj和Rj组成。对 $10^{-12}$ 的BER，其峰到峰值计算如下：

$$TJ = DJ + RJ \times 14$$



► 图 2. 重复码型的数据信号。

### 使用频谱方法分析抖动

在这种方法中,假设被测串行数据信号由定期重复的码型组成,重复码型的长度是已知的。例如,图 2 中的信号包含多次重复的 PRBS 伪随机码序列。码型长度是 127。

在使用频谱方法时,抖动测量方式如下:

示波器采集单次数据信号或实时采集数据信号。为最准确地捕获抖动,采集系统应拥有最佳的定时精度、信噪比、有效位和信号保真度。带有高级 TekConnect 探头的泰克 DSA72004 保证了当前最优秀的信号保真度。

在采集结束后,软件解析记录,确定每个时钟边沿的时间间隔误差。根据用户需求,可以应用最小乘方或黄金 PLL 方法,恢复参考时钟,找到 TIE。TIE 表示采集的数据边沿中的抖动。然后 TIE 结果通过 FFT,计算 TIE 的频谱。这个频谱就是采集的信号中抖动的频谱。

### 黄金 PLL

在数据接收机处理串行数据流时,接收机先恢复定时参考,其通常采用 PLL 方式完成。PLL 追踪、进而消除位于 PLL 环路带宽内部的抖动成分。

工程师通常希望只测量 PLL 没有消除的抖动。

光纤通道规范提供了一个参考 PLL 设计,称为“黄金 PLL”,允许标准化这种形式的时钟恢复。

在 DPOJET 中,恢复的时钟被视为参考时钟,用来计算时间间隔误差(TIE)。

在计算频谱前,应采取一项重要步骤,保证 FFT 结果的准确性。对于两个或多个数据位之间没有数据边沿的点,特别是电平可能在多个符号周期中保持相同的 NRZ 数据,可以通过内插估算一组符号。抖动值数组在这些符号位置上标为“interpolated”(已内插),以便可以与跳变对应的抖动分开。

频谱方法通过两个步骤得到总抖动的各个成分。第一步,把 Rj 和 Dj 分开;第二步,分离 Dj 成分。

## 使用频谱方法分析抖动

### ► 应用指南



► 图3. 总抖动频谱。

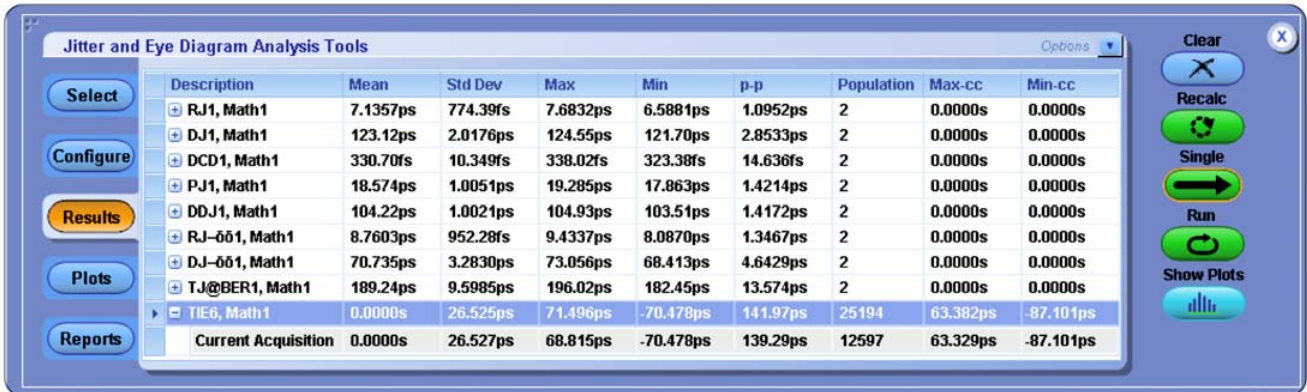
### Rj/Dj 分析

频谱方法根据下述条件把总抖动分成两类，即Dj和Rj：

- Rj 假设呈高斯分布，其频谱又宽又平。
- Dj 在时域中具有周期性特点，因为假设串行数据信号由定期重复的数据码型组成；它具有由脉冲组成的频谱。

图3说明了图2中所示的数据信号的总抖动频谱。Dj和Rj明显拥有不同的特点。可以采取各种方法，把脉冲与“噪底”分开，但必须适应FFT中的变化，这些变化源自FFT分辨率、扩频、窗口等等。通过计算频域中噪底RMS值，可以得到Rj的标准偏差参数。

通过把Rj导致的Tj频谱的所有二进制组设置为零，可以恢复仅Dj频谱。通过在这个Dj频谱上执行反向FFT，可以获得Dj的时域记录。可以从这个时域波形中直接获得峰到峰时间值，也就是Dj相关的参数。注意，在确定峰到峰值时，没有计算前面标为“interpolated”(已内插)的位置。



▶ 图 4. 抖动成分测量。

### 分析 Dj 成分

在上一步中获得 Dj 的频谱以后，可以获得 Dj 的三个成分：ISI、DCD 和 Pj。Dj 也完全由脉冲组成。可以依据下述条件把 ISI+DCD 抖动成分与 Pj 成分分开：

- ▶ 由于 ISI+DCD 成分导致的所有脉冲必须出现在 BitRate/N 的倍数上，其中 N 是数据码型，也就是数据序列重复码型中的符号数量。
- ▶ 其余任何脉冲都是由 Pj 导致的(参见图 3)。

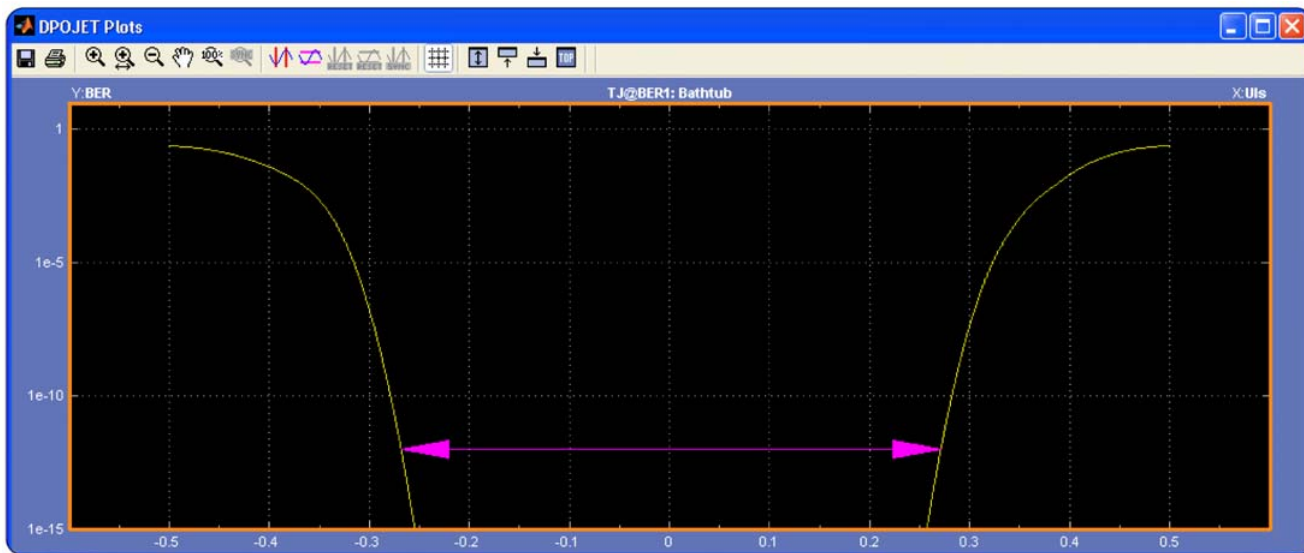
在隔离 Pj 后，应执行反向 FFT，在时域中恢复 Pj。Pj 的相关参数是其时域记录的峰到峰值。然后只使用 ISI+DCD 导致的 Dj 频谱部分，执行反向 FFT，在时域中恢复 ISI+DCD。现在，这条时域记录可以分成两条记录，一条记录只包含上升沿，另一条记录只包含下降沿。然后为每条记录计算一个直方图。如果数据信号的奇偶性是交替的，那么这两个直方图的形状类似。区分 DCD 成分和 ISI 成分使用的方法基于下述属性：

- ▶ 两个直方图的平均值之差是 DCD。
- ▶ 直方图的峰到峰值的平均值是 ISI。

通过使用这种频谱方法，DPOJET 抖动和眼图分析工具测量的抖动成分值如图 4 所示。

## 使用频谱方法分析抖动

### ► 应用指南



► 图 5. 浴盆曲线。

### 估算误码率

在分开检定确定性抖动和随机抖动之后，可以估算 BER。从分开的  $D_j/R_j$  中，获得  $D_j$  的时间记录。现在计算  $D_j$  的时域直方图，其中不计算标为“interpolated”（已内插）的位置。根据高斯模型，使用  $D_j/R_j$  分离过程中获得标准偏差，合成  $R_j$  的时域直方图。然后对  $D_j$  和  $R_j$  的直方图求卷积，得到总抖动恢复的直方图。这个恢复的  $T_j$  直方图在正确归一化时，可以理解为  $T_j$  的概率分布函数(PDF)。

最后，从这个 PDF 中获得浴盆曲线(BER 曲线，如图 5 所示)。光纤通道 MJS 文件中进一步介绍了相关信息。注意，浴盆曲线传统上在竖轴上使用对数标度绘制，因为相关的 BER 与接近零的电平对应。只要在“浴盆中”某个地方选择判定时间，那么判定误码率将一直低于指定的误码率。这类似于保证数据样点位于示波器眼图的中心。根据 BER 浴盆曲线，可以估算一定误码率的眼图张开程度。

### 总结

随着时钟速率不断提高，定时裕量越来越小，定时检定的重要性不断提高。在当前设计中，您不能只限于检定抖动，而是必须能够精确地测量抖动，考察抖动成因，并在此基础上，预算系统在不同时期中的行为，最大限度地降低贵公司的总成本。这意味着能够在多用途工具(如示波器)上使用频谱方法分析抖动。您可以更快地向市场上推出设计，使其实现更加强健的功能，在当前高速环境中更好地运行，同时最大限度地降低工程设计工具要求的投资。

### 实时示波器上 Rj/Dj 的价值

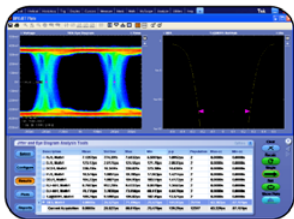
泰克分析工具，如 DPOJET 抖动和眼图分析工具超过了泰克基于 Windows 的开放实时示波器的标准通用功能和多用途功能，允许工程师复杂全面地分析信号，无限地扩展了示波器功能。

自成立以来，泰克一直引领信号保真度和分析领域，它率先推出了内部测量功能，率先提供复杂的触发功能，率先推出内部应用，率先提供开放平台，率先引入 Rj/Dj。

作为基于示波器的信号分析技术的领导企业，泰克将继续推进行业发展，为整个行业树立基准。

## 使用频谱方法分析抖动

### ► 应用指南



#### 抖动和眼图分析工具

DPOJET – 抖动和眼图分析工具提供了优秀的抖动分析软件包。DPOJET能够在时钟和数据信号上执行Rj/Dj分析、创建眼图、执行一致性和模板测试，提供了准确性最高的抖动测量。由于完善的抖动分析算法、极限测试、模板测试和深入分析功能，DPOJET简化了在当前数字设计、通信设计和系统设计中发现抖动及相关来源的工作。



#### DSA72004 DSO

世界上第一台 20 GHz 实时示波器，为最苛刻的信号提供了所需的性能。DSA72004 为您检验信号完整性提供了所需的性能，同时提供了一套工具，简化和加快了设计流程，把下一代数字设计的信号完整性提升到全新的水平。由于在 4 条通道上实现了 20 GHz 的带宽和 50 GS/s 的采样率，DSA72004 提供了无可比拟的信号完整性测量功能。



#### 高性能探头解决方案

世界一流的泰克探头，提供了世界一流的信号保真度和性能。P7516 TriMode™ 差分探头是一种新的探头结构，代表着高速串行探测解决方案的发展方向。它使用一个探头设置，准确、明确地执行差分测量、单端测量和共模测量，而不必从连接点上移出探头。P7500 TriMode™ 系列探头提供了高带宽和低电路负荷，同时改善了连接能力和价值。

**泰克科技(中国)有限公司**  
上海市浦东新区川桥路1227号  
邮编：201206  
电话：(86 21) 5031 2000  
传真：(86 21) 5899 3156

**泰克北京办事处**  
北京市海淀区花园路4号  
通恒大厦1楼101室  
邮编：100088  
电话：(86 10) 6235 1210/1230  
传真：(86 10) 6235 1236

**泰克上海办事处**  
上海市静安区延安中路841号  
东方海外大厦18楼1802-06室  
邮编：200040  
电话：(86 21) 6289 6908  
传真：(86 21) 6289 7267

**泰克广州办事处**  
广州市环市东路403号  
广州国际电子大厦2807A室  
邮编：510095  
电话：(86 20) 8732 2008  
传真：(86 20) 8732 2108

**泰克深圳办事处**  
深圳市罗湖区深南东路5002号  
信兴广场地王商业大厦G1-02室  
邮编：518008  
电话：(86 755) 8246 0909  
传真：(86 755) 8246 1539

**泰克成都办事处**  
成都市人民南路一段86号  
城市之心23层D-F座  
邮编：610016  
电话：(86 28) 8620 3028  
传真：(86 28) 8620 3038

**泰克西安办事处**  
西安市东大街  
西安凯悦(阿房宫)饭店345室  
邮编：710001  
电话：(86 29) 8723 1794  
传真：(86 29) 8721 8549

**泰克武汉办事处**  
武汉市武昌区武珞路558号  
中南花园饭店将军楼4201室  
邮编：430070  
电话：(86 27) 8781 2831  
传真：(86 27) 8730 5230

**泰克香港办事处**  
香港铜锣湾希慎道33号  
利园3501室  
电话：(852) 2585 6688  
传真：(852) 2598 6260

有关最新的产品信息请访问泰克公司网站：  
[www.tektronix.com.cn](http://www.tektronix.com.cn)



© 2007 年 Tektronix, Inc. 版权所有。 全权所有。 Tektronix 产品，不论已获得专利和正在申请专利者，均受美国和外国专利法的保护。 本文提供的信息取代所有以前出版的资料。 本公司保留变更技术规格和售价的权利。 TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc. 的注册商标。 本文提及的所有其它商号分别为其各自所有公司的服务标志、商标或注册商标。

09/07 FLG/WOW

55C-15631-2

**Tektronix**  
Enabling Innovation