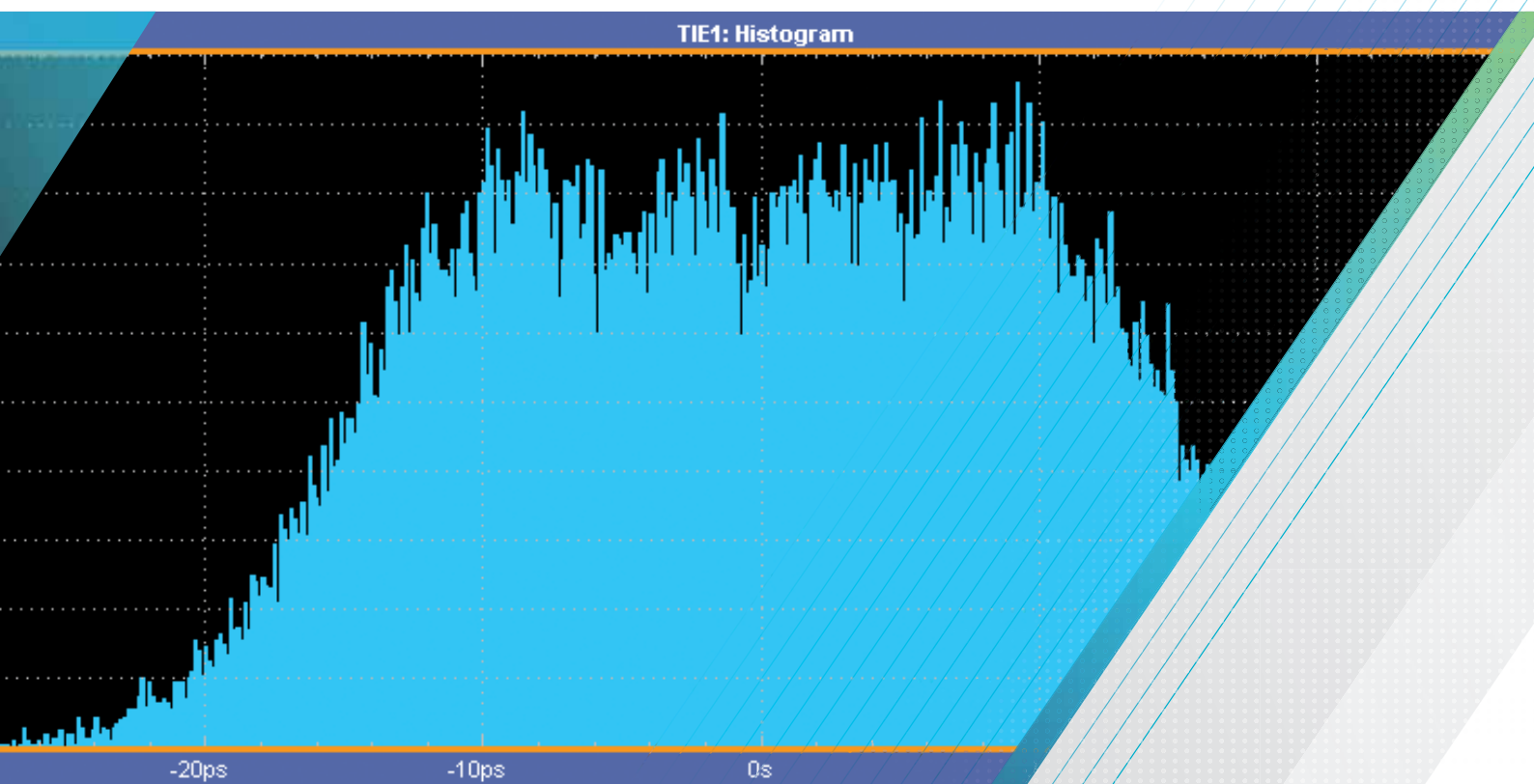


# 理解和检定定时抖动

## 入门手册



## 目录

<b>引言 .....</b>	<b>4</b>	<b>第四章：抖动的分离 .....</b>	<b>16</b>
<b>第一章：抖动的后果 .....</b>	<b>4</b>	4.1 分解抖动的动机 .....	16
计算机总线设计 .....	4	4.2 抖动模型 .....	16
串行数据链路 .....	6	4.2.1 随机性抖动 .....	18
<b>第二章：什么是抖动？ .....</b>	<b>6</b>	4.2.2 确定性抖动 .....	19
2.1 “短期”的界定：抖动与漂移的关系 .....	6	4.2.3 周期性抖动 .....	19
2.2 “有效时点”的界定：参考电平 .....	8	4.2.4 数据相关抖动 .....	20
2.3 “理想位置”的界定：时钟恢复 .....	8	4.2.5 占空比相关抖动 .....	21
2.4 周期性抖动、周期间抖动和 TIE .....	9	4.2.6 有界不相关抖动 (BUJ) .....	21
<b>第三章：抖动测量和可视化 .....</b>	<b>11</b>	4.2.7 子速率抖动 (SRJ) .....	21
3.1 抖动统计 .....	11	4.3 综合考虑 .....	23
3.2 抖动直方图 .....	11	<b>第五章：抖动与误码率的关系 .....</b>	<b>25</b>
3.3 抖动与时间关系 (时间趋势) .....	13	5.1 抖动预算 .....	25
3.4 抖动与频率关系 (抖动频谱) .....	14	5.2 浴缸曲线 .....	26
3.5 眼图 .....	15	5.3 BER 实例 .....	27
		<b>第六章：小结 .....</b>	<b>28</b>
		附录 A：缩略语词汇表 .....	28
		参考资料 .....	29

## 引言

定制抖是采用电压转换表示定时信息的所有电子系统中不受欢迎的伴生物。从历史上看，通过采用相对较低的信令速率，电子系统已经减少了定制抖动（或简称为“抖动”）的不利影响。结果，与其破坏的时间间隔相比，抖动引入的误差已经很小了。与当前高速串行总线和数据链路有关的定制裕量表明，必须在整个系统中更加严格地控制抖动。

随着信令速率攀升到 2 GHz 以上，同时电压摆幅不断缩小，以节约功率，系统中的定制抖动占信令间隔的比例正变得越来越大。在这些情况下，抖动已经成为限制性能的一个基本因素。为成功地设计高速系统，可靠地满足性能要求，首先要理解什么是抖动及怎样检定抖动。

本文第二章将介绍更加全面的抖动定义，但从概念上讲，抖动是定时边沿偏离了“正确的”位置。在基于时钟的系统中，定制抖动是最明显、最直接的不理想形式。在采用噪声形式时，必须把抖动作为随机过程进行处理，并检定其统计特点。

如果有一种方式能够测量抖动统计数据，那么可以比较各个元器件和系统，选择上下限。但是，单纯通过这种方法并不能有效地提炼和调试尖端设计。只有全面分析抖动，才能隔离根本原因，从而可以系统地减少抖动，而不是通过试错法来处理这个问题。这种分析采用抖动可视化和分解的形式，本文第三章和第四章对此进行了详细的讨论。

尽管电子抖动和光抖动的成因、行为和检定之间有许多类似之处，但用来测量光系统中的抖动的设备与电子系统中使用的测量设备不同。本文的主要重点是电子系统的抖动问题。

## 第一章：抖动的后果

*“猜测的成本很低。但猜错了，却要付出高昂的代价。”*  
*Chinese Proverb*

为什么应该关注抖动呢？抖动对系统性能有什么影响？在本章中，我们考察了两种情况：高速计算机总线和串行数据链路。对每种情况，我们都更加详细地考察了抖动的具体影响。

### 计算机总线设计

假设您正在研制一种新的嵌入式处理器设计，在读取闪存时发现偶尔出现数据错误。您怀疑在写启动（WE）的上升沿方面，生成闪存芯片启动（CE）的地址解码没有满足设置时间要求。您使用高速示波器测试了 CE 和 WE 信号，观察其定时关系。在单击采集 10 次后，您测量的时长为 87 – 92 ns，高于最低建立时间 75 ns，看起来似乎裕量还不错。但足够的裕量是多少呢？采集次数是否足以消除您担心有时会违反建立时间要求的疑虑呢？违反时间要求的概率有多大呢？

在以无穷大的余辉模式分析几百万个波形之后，您看到建立时间最短为 82 ns，您确定建立时间可能还是有问题。但问题是由于什么原因引起的？是系统时钟周期变化、还是地址解码器、还是其它原因？

### 串行数据链路

您的千兆位以太网物理层收发机芯片马上就要研制成功了，您有点担心不久将由外部测试机构进行的一致性测试。标准文件中的规范要求测量相对于局部数据时钟的数据抖动，另外要求测量时钟相对于无抖动参考源的抖动，等等。不管是哪种情况，您都希望保证拥有足够的裕量，在一致性测试实验室中能够获得满意的结果。

通过以无穷大的余辉模式使用示波器，您开始检查数据时钟上的峰到峰抖动。由于示波器可以在屏幕上定义直方图框，您使用这种功能，生成边沿位置的直方图。您发现峰峰值为 550 ps，规范要求的峰峰值必须小于 300 ps。幸运的是，300 ps 规范是在通过 5 kHz 高通滤波器滤波后的抖动。不幸的是，您没法知道直方图中哪些部分的抖动是由于频率低引起的，而可以完全忽略这部分抖动。

您检查了相对于时钟的数据线上的抖动，发现这一抖动也危险地接近规范极限值。但是，您怀疑这一抖动并不是芯片内部原因引起的，而是由于测试板导致的，这个测试板不符合布置不同数据线的优质设计惯例。您知道，抖动可能源自测试板上的开关电源，但必需确定测得的抖动有多少是由这个来源引起的。

这种情况和上面的情况说明，即使高性能示波器有时也不能提供足够的功能，来解答所有问题。为真正保证设计的可信度，您可能需要两种额外的工具，这些工具可以用来执行先进的抖动分析，有效地掌握定时抖动的基本成因和特点。

## 第二章：什么是抖动？

SONET 规范提供了简单、直观的定义<sup>1</sup>：

*“抖动可以定义为数字信号在有效时点上偏离理想时间位置的短期变化。”*

这个定义指明了抖动的本质，但在明确使用这一定义前，还必须具体了解某些单独的术语（短期、有效时点、理想位置）。

在所有实际应用中，抖动具有随机成分，因此必须使用统计术语指定抖动。必须使用平均值和标准偏差等指标以及置信区间等项目，建立有意义的、可复现的测量。尽管意义重大，但从统计数学角度分析这些基本概念超出了本文讨论的范畴，本文最后的参考资料为希望更加深入地探讨这些概念的读者提供了部分参考书目。

### 2.1 “短期”的界定：抖动与漂移的关系

根据惯例，人们在对偏差与时间关系进行傅立叶分析的基础上，把定时偏差分成两类，分别称为抖动和漂移。（第 3.3 – 3.4 节中更加详细地介绍了这类分析）发生得慢的定时偏差称为漂移。抖动则是指发生得比较快的定时偏差。

ITU2 把漂移和抖动之间的阈值定义为 10 Hz，但也可能会遇到其它定义。在许多情况下，漂移对串行通信链路影响很小或没有影响，因为时钟恢复电路可以有效地消除漂移。

## 2.2 “有效时点”的界定：参考电平

根据我们的定义，有效时点是指数字信号的逻辑状态之间的转换或边沿。更具体地说，有效时点是指转换信号跨过选定的振幅阈值的那一刻，振幅阈值可以称为参考电平或判定阈值。对两电平信号（这是迄今最常见的情况），通常使用信号电压平均值作为这个参考电平。如果将由 Schmitt 触发器输入接收相关信号，那么在分析上升沿时，可能希望使用一个参考电平，在分析下降沿时可能希望使用不同的参考电平。

在我们的定义中，“数字信号”可能是比较乐观的说法，因为对高速信号，转换是具有上升时间和转换速率限制的模拟事件。在很短的有限时间内，在信号倾斜通过参考电平时，破坏波形的任何电压噪声将成比例转换成定时抖动。

## 2.3 “理想位置”的界定：时钟恢复

在能够测量数字信号偏离理想位置之前，必须先识别理想位置。对时钟类信号（1 和 0 交替），理想位置在概念上与无抖动时钟对应，无抖动时钟的中间频率和相位与被测时钟相同。对数据信号要特别注意，因为当相同位在五行中重复两次以上时，不会发生任何事件（转换）。时钟恢复是指建立参考时钟定时的过程。

时钟恢复的方法之一是使用在最小二乘法中最有效地拟合被测事件的恒定频率的时钟。这意味着采用的参考时钟的形式为：

$$A \sin(\omega_c t + \phi_c)$$

其中  $\omega_c$  和  $\phi_c$  是常数。选择这些常数时要保证参考时钟和被测时钟之间的时间误差的平方和达到最小。在分析长度有限的连续数据块时，这是一个优秀的方法。如果数据时长足够长，那么抖动测量结果可能会包括漂移和抖动。在这种情况下，可以在以后使用高通滤波器，去掉漂移成分。

时钟恢复的另一种有效方法是使用锁相环（PLL）。PLL 连续跟踪被测数据符号速率中缓慢的变动。结果，它对信号中保留的抖动作为高通滤波器使用。由于大多数数据通信链路在接收机中使用 PLL，所以这种测量方法具有一个优点，可以使用被测器件建立系统行为模型。

为实现测量的一致性和复现性，许多数据通信规范定义了黄金 PLL。在这里，黄金只是指 PLL 特点具有精密的定义和严格的控制。如果使用符合这些规范的 PLL 在多个器件上测量抖动，那么可以客观地比较抖动，并在逻辑上把抖动与器件将使用的系统关联起来。

## 2.4 周期性抖动、Cycle–Cycle 抖动和 TIE

可以通过多种方式在一个波形中测量抖动，包括周期性抖动、Cycle–Cycle 抖动和时间间隔误差 (TIE)。了解这些测量指标的相互关系及其意义非常重要。

图 2.4a 说明了具有定时抖动的时钟类信号。虚线表示理想的边沿位置，与无抖动型号的时钟相对应。

测量项目 P1、P2 和 P3 表明的周期性抖动用来测量波形中每个时钟周期的时间。这是可以执行的最简单、最直接的测量。通过调节示波器，并对无穷大余辉设置显示结果，可以显示略长于一个完整时钟周期的周期，进而可以估计峰峰值。如果示波器在第一个边沿上触发，可以在第二个边沿上查看周期性抖动，如图 2.4b 所示。

图 2.4a 中的 C2 和 C3 表明的 Cycle–Cycle 抖动用来测量时钟周期在任意两个相邻周期之间的变化程度。如图所示，通过对周期性抖动应用第一阶差运算，可以得到周期间抖动。用户可能非常关注这个测量结果，因为它显示了可能会影响时钟恢复 PLL 的瞬时动态。注意，为计算周期性抖动或 Cycle–Cycle 抖动，不要了解参考时钟的理想边沿位置。

图 2.4a 中的测量项目 TIE1 到 TIE4 说明了时间间隔误差。TIE 测量时钟的每个活动边沿从理想位置的变动。为执行这一测量，必须知道或估计理想的边沿。为此，很难使用示波器直接观察 TIE，除非提供某种时钟恢复或后期处理手段。

在从标称 (理想) 时钟周期中减去每个测得的周期后，通过对周期性抖动求积分，也可以获得 TIE。TIE 非常重要，因为它说明了即使少量的周期性抖动随着时钟推移也可能产生累计效应。一旦 TIE 达到  $\pm 0.5$  单位间隔，那么眼图将闭上，接收机电路将出现误码。

图 2.4c 提供了一个实例，说明了针对某个波形，这三个抖动测量项目的相互关系。在本例中，波形的标称周期是  $1\ \mu\text{s}$ ，但实际周期采用的模式是 8 个 990 ns 周期后跟着 8 个 1010 ns 周期。



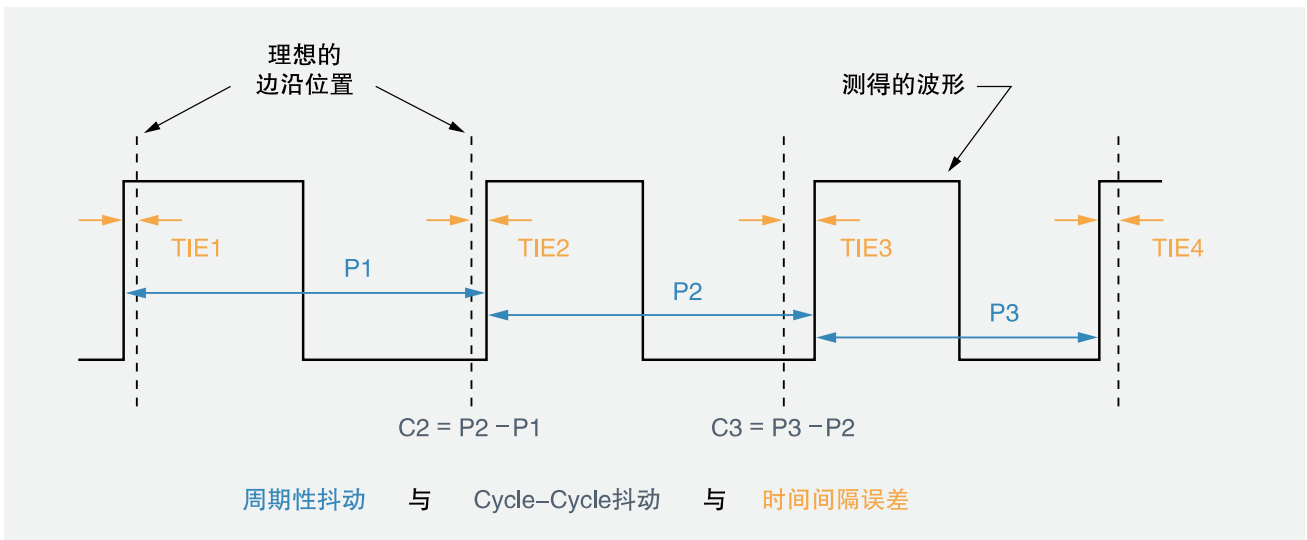


图 2.4a 不同的抖动测量项目。

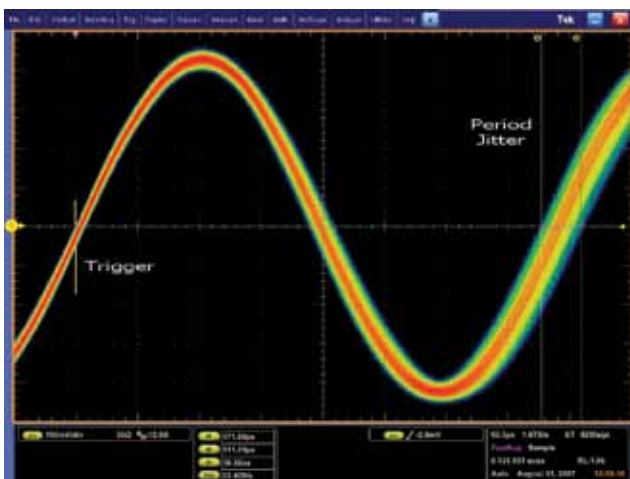


图 2.4b 使用光标测量的周期性抖动。

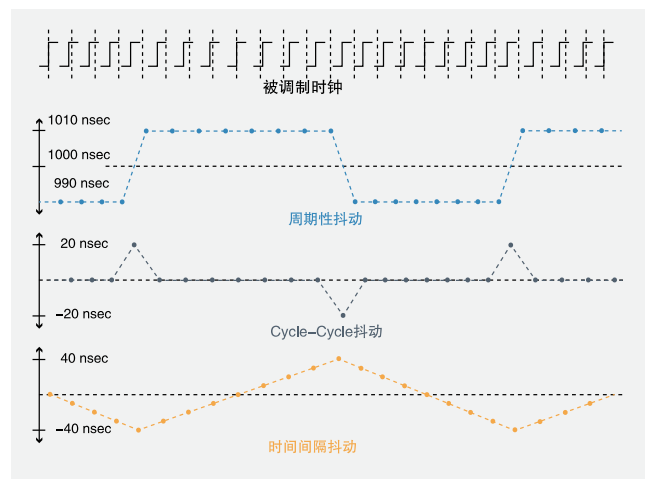


图 2.4c 不同测量的趋势图。



图 2.4d BERT，抖动分离及定位图上显示了抖动值。

## 第三章：抖动测量和可视化

本章将讨论量化和 / 或分析抖动使用的部分工具和技术。

### 3.1 抖动统计

由于所有已知信号包含具有随机成分的抖动，因此必须采用统计手段，正确检定抖动。某些常用的手段包括：

**中间值：**时钟周期的算术平均值或平均值是标称周期。这是频率计数器将测量的频率的倒数。TIE 的平均值在理论上是零，尽管根据采用的测量技术，可能会有少量的残余值。

**标准偏差：**标准偏差用希腊字母 sigma ( $\sigma$ ) 表示，用来测量从平均值变化的平均量。标准偏差在描述高斯过程中特别有用，因为高斯分布完全是通过平均值和标准偏差规定的。我们将在第 4.3 节中进一步讨论这个问题。

**最大值、最小值和峰峰值：**最大值和最小值一般指测量间隔过程中实际观察到的值，峰峰值则是最大值与最小值之差。应明智地使用这些指标。对确定性信号，即使在相对较短的测量间隔之后，这些值仍可能会等于实际值。但对具有高斯分布的随机信号，理论上最大值和最小值没有限制，因此观察到的峰峰值一般会随着时间推移而增长。为此，应与样本总量及分布类型的某些知识一起使用峰峰值。

**样本总量：**样本总量是统计数据集中包括的各个观察的总数。在随机过程中，样本总量高可以直观地提供更高的置信度，保证测量结果的复现度。如果已知分布特点或可以估计分布特点，可以计算把测量不确定性降低到希望点以下所需的样本总量。

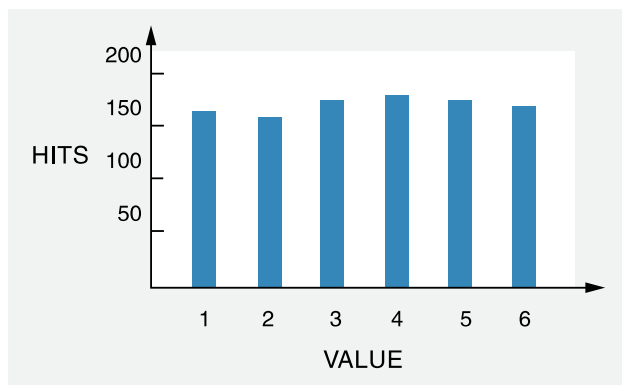


图 3.2a 测量直方图。

### 3.2 抖动直方图

直方图是绘制数据集中的测量值与测量发生频率关系的图。如果数据集内的测量数量大，直方图可以很好地估计集合的概率密度函数 (pdf)。例如，如果滚动模具 1000 次，并记录结果，结果会如图 3.2a 中所示，其中 HITS 轴表明每个值发生的次数。

注意，直方图没有提供与观察结果发生顺序有关的任何信息。

TIE 测量的抖动直方图实例如图 3.2b 所示。在本例中，连续变量映射到 500 个二元组中，数据集的总样本数量是 3,200,000。由于这是 TIE 测量，因此平均值是 0 ns。在本图中，分布大体上呈现高斯分布，标准偏差为 1.3 ns。

看一下第二个实例，其中图 3.2b 中的信号的 TIE 由图 3.2c 中所示的三角形波进行调制。



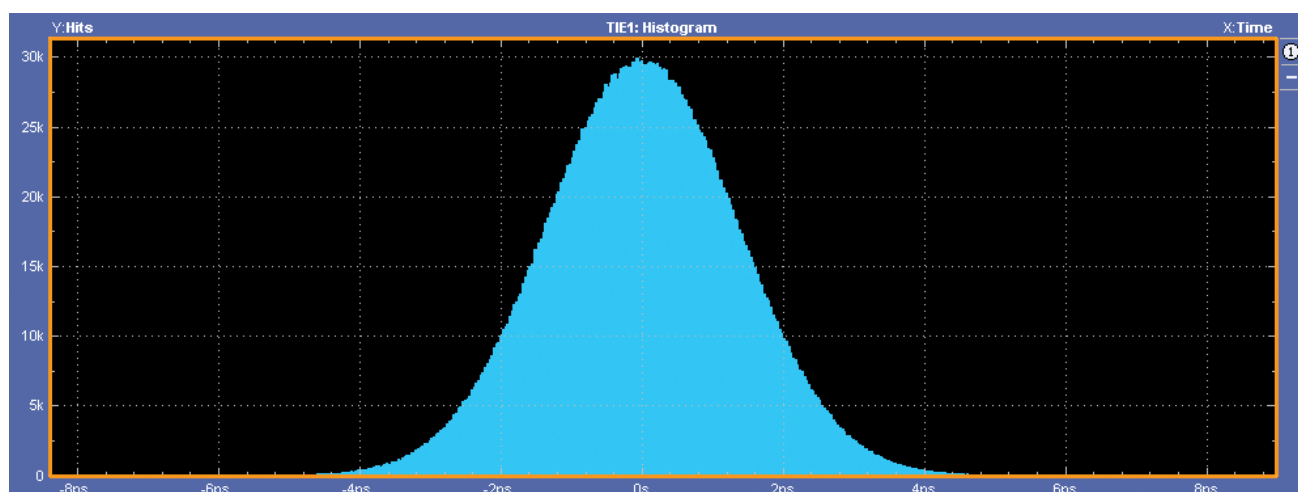


图 3.2b 时间间隔误差测量的直方图。

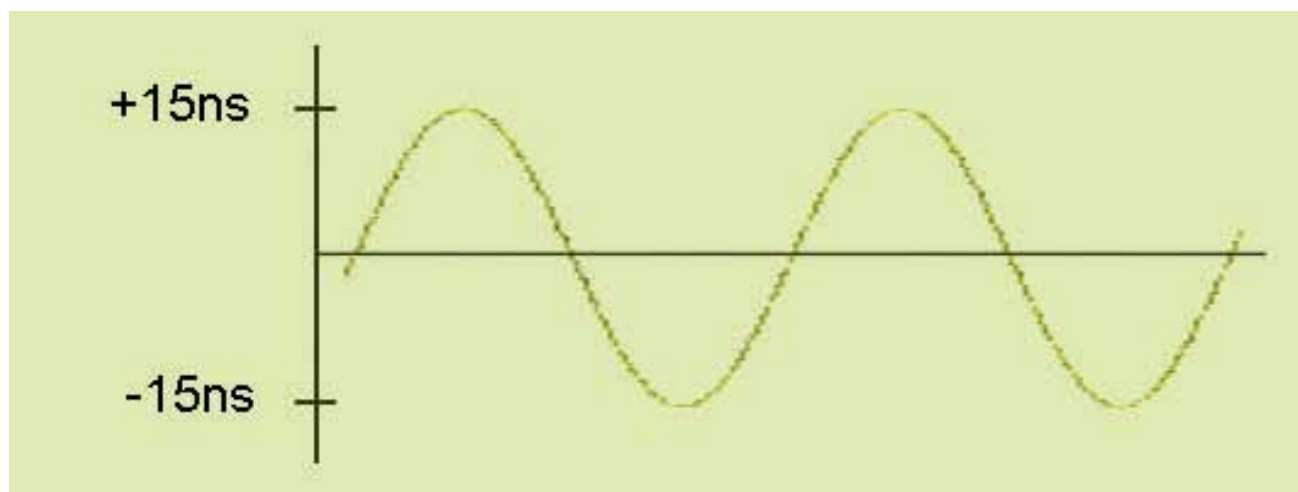


图 3.2c 应用到数据信号的预计正弦波调制。

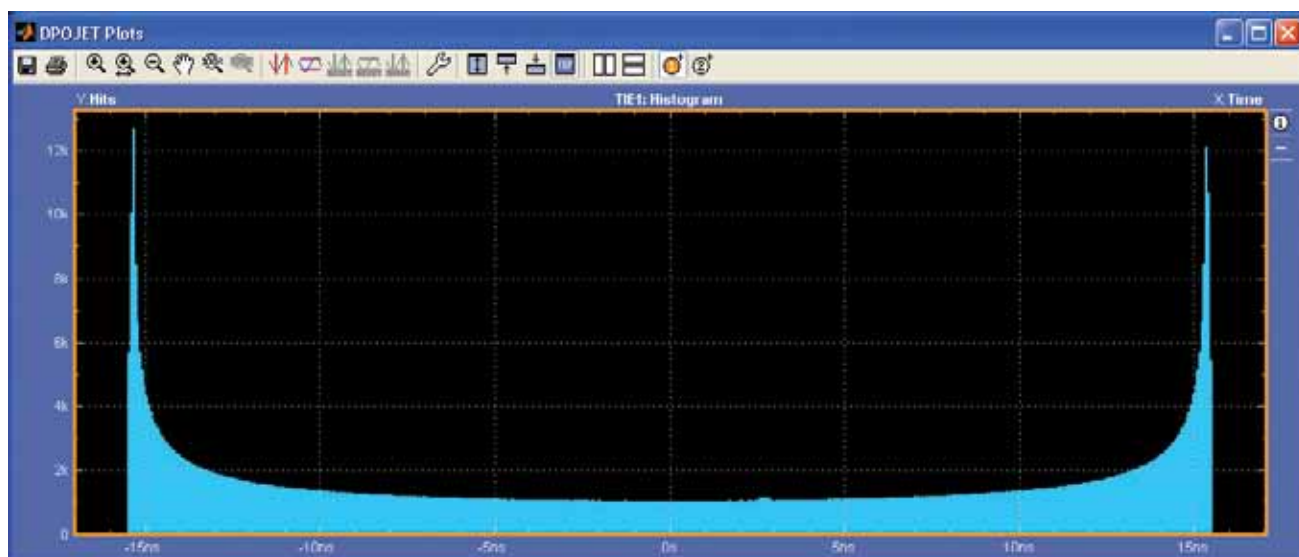


图 3.3d 绘制为直方图的被调制信号的间隔误差。

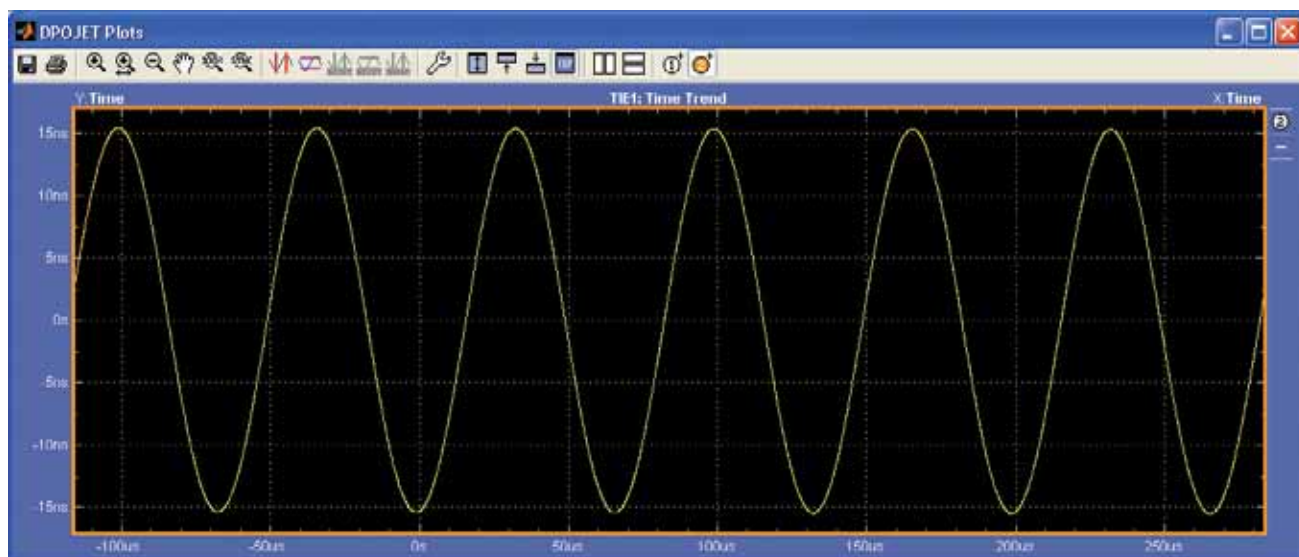


图 3.2a 绘制为趋势图的被调制信号的间隔误差。

如果这个三角形波以任意时点采样，那么样点值位于  $-15\text{ns}$  和  $15\text{ns}$  之间任意地方的概率是相同的。因此，被调制信号的 TIE 直方图以大体相等的概率分布在  $\pm 15\text{ns}$  上，如图 3.2d 中所示。（直方图左边沿和右边沿的倾斜尾部表明抖动仍具有高斯成分。）

### 3.3 抖动与时间关系（时间趋势）

由于抖动直方图不能说明测量观察结果发生的顺序，所以它不能揭示可能表明调制或其它周期成分的重复模式。抖动值与时间关系图可以使这种模式明显化。例如，通过绘制图 3.2d 中调相信号的 TIE 与时间关系图，得到了图 3.3a。

现在，抖动变化模式变得明显了，它与多个耦合噪声的可能来源的关联也会显现。注意，抖动的随机成分仍可以视作增加到三角形调制中的噪声。

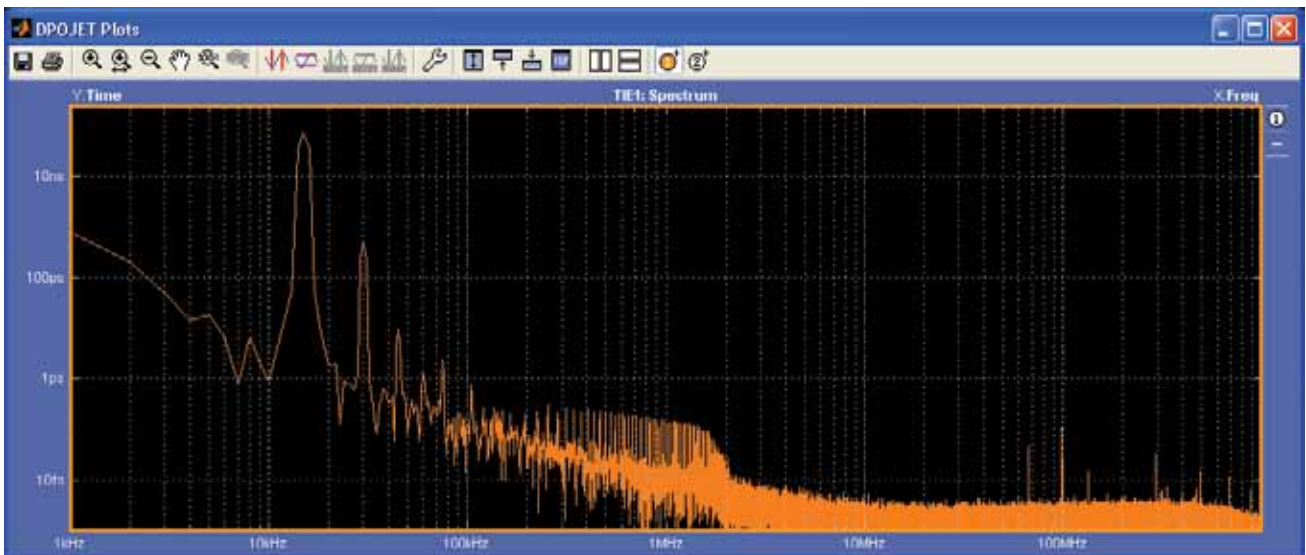


图 3.4a 绘制为频谱图的被调制信号的时间间隔误差。

### 3.4 抖动与频率关系 (抖动频谱)

由于可以绘制抖动测量结果与时间关系图，因此一个明显的延伸是对这些测量结果运用傅立叶转换，在频域中显示结果。这可以得到抖动频谱，其中在水平轴上显示调制频率，在垂直轴上显示调制振幅。频谱分析的优点之一是通常可以明确地区分周期成分，否则宽带噪声可能会掩盖这些周期成分。

我们仍使用上面采用三角形调制的时钟实例。图 3.4a 显示了与图 3.3a 相同的 TIE 测量，其显示为 TIE 频谱。注意，现在可以看到，三角形调制的基本频率为

15 kHz，如蓝色光标所示。在理论上，用傅立叶序列仅表示三角形波具有奇数谐波。频谱确认了这一点，其中可以在 3 kHz、5 kHz、7 kHz 等清楚地看到成分。它仍将显示随机噪声，但在 2 MHz 以上时表示为宽的平坦的噪底。

前面提到，根据惯例，傅立叶成分低于某个上限（通常是 10 Hz）的定时偏差被看作漂移，而不是抖动。从更实用的角度看，某些其它频率限制（如系统时钟恢复环的环路带宽）可以确定能够安全地容许哪些噪声。抖动的频谱图可以揭示是否要关注系统中的噪声。

### 3.5 眼图

到目前为止，讨论的所有方法都仅依赖边沿位置。通过检测波形什么时候跨过一个或多个振幅阈值，可以从波形中提取这些位置。眼图是一种比较常用的工具，因为它可以查看波形的振幅行为及定时行为。

在波形的许多短段叠加在一起，从而对齐标称边沿位置和电压电平时，可以生成眼图，如图 3.5a 所示。一般来说，图中画出了两个单位间隔的水平间隔。波形段可以是相邻的，如图所示，也可以从间隔更广的信号样点中提取。如果波形可以复现，可以使用采样示波器，从多个波形中以随机延迟提取的各个样点中建立眼图。

在风格化的图 3.5a 中，使用颜色说明了各个波形段怎样构成一个眼图。在实践中，眼图通常是黑白的，或使用颜色表明显示屏任何给定点上的波形样点密度。图 3.5b 说明了具有多类噪声的波形的彩色密度显示图。

在这个图中，使用白箭头表示眼图张开的垂直范围和水平范围。当信号上的噪声提高时，眼图张开程度变小，包括水平方向、垂直方向或同时两个方向。据说在图的中心没有任何张开区域时，眼图将会闭上。

生成眼图的最简便方式是在长余辉显示模式下使用示波器。在使用这种方法时，应该注意触发示波器的方式。简单地触发一个波形边沿将导致一个眼图，显示波形与该边沿的相对关系。这与表明波形与底层位时钟关系的眼图有很大的差别。为生成与位时钟关系的眼图，必需使用某种形式的时钟恢复功能，包括软件或硬件。如果示波器没有提供这种功能，可以使用从外部时钟恢复电路中导出的触发器。

通过把图 3.5b 中的密度眼图转化成三维图，并使用判定阈值进行分割，如图 3.5c 所示，可以查看眼图与 TIE 直方图的关系。粉红色的区域相当于眼图中两个过零点的第一个点。

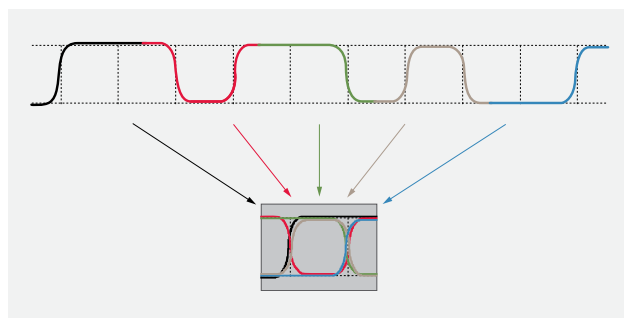


图 3.5a 建立实时眼图。

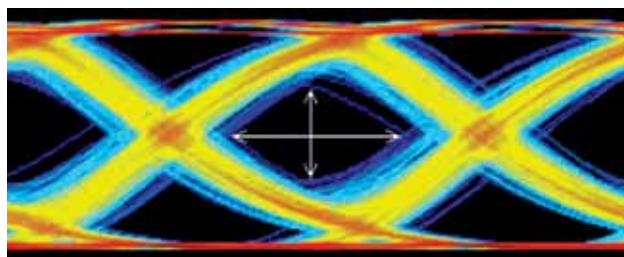


图 3.5b 带有颜色等级的波形数据库。

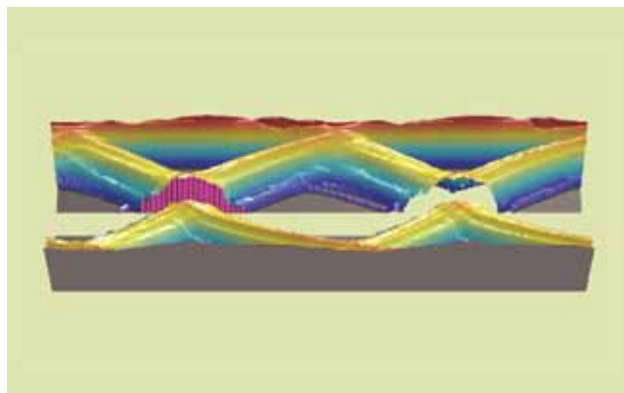


图 3.5c 在波形数据库中，颜色可以表示样本总量。

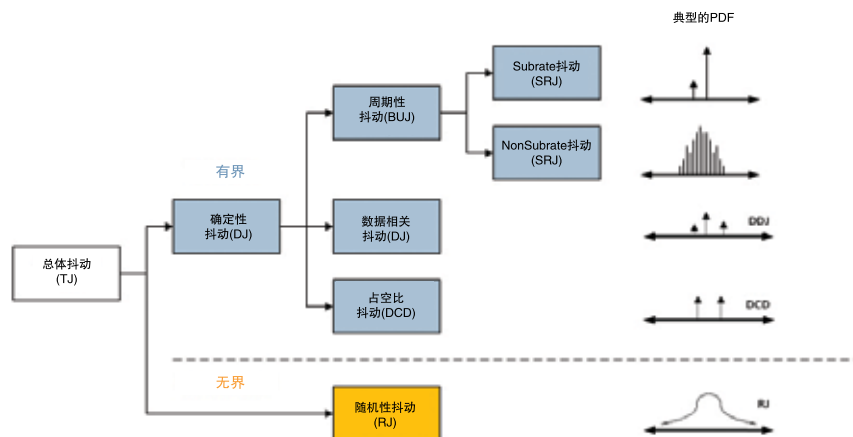


图 4.2 抖动由随机性部分和确定性部分组成。

## 第四章：抖动的分离

“所有模型都是错误的，但有些模型很实用。”

W. Edwards Deming

抖动分离或抖动分解是一种分析技术，它使用参数化模型，描述和预测系统行为。本章阐述了为什么使用这种技术，并提供了与当前最常用的抖动模型有关的详细信息。

### 4.1 分解抖动的动机

为了解实际系统的行为，通常可以使用系统的数学模型。通过调节各个成分的参数，可以调谐这样一个模型的行为。如果根据实际系统的观察结果选择模型的参数，那么可以使用该模型预测系统在其它条件下的行为。因此，分解抖动（也称为分离抖动）的动机之一是推断很难直接测量或直接测量耗时太长的系统性能。

通过这种方式建立系统模型的另一个动机与分析有关。如果每个模型成分与一个或多个底层物理效应有关，那么理解模型就可以深入查看抖动过高的确切原因。

所有复杂系统的模型都作出了许多假设和简化，因此模型与实际系统之间不可能完全拟合。事实上，在拟合模型行为与观察的测量结果时，通常有某些参数选择范围。为此，抖动分离具有一定的技巧和科学性，不能希望它实现“99.99%”的测量复现性。

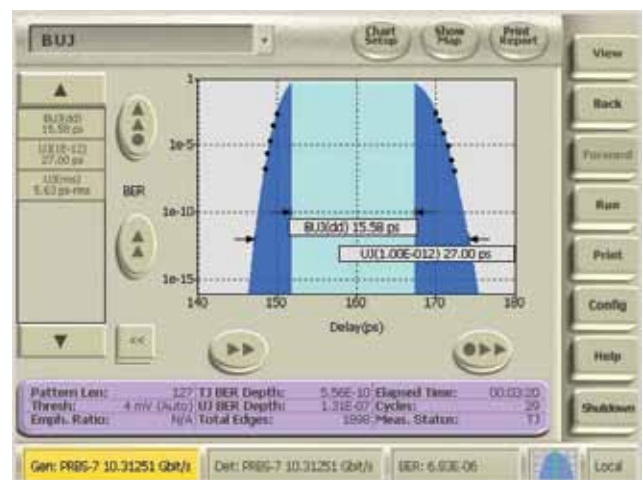


图 4.2.1a 高斯分布。

### 4.2 抖动模型

最常用的抖动模型基于图 4.2 中所示的分层结构。在这个分层中，总抖动(TJ)先分成两类：随机性抖动(RJ)和确定性抖动(DJ)。在后面大家将看到，正确区分这两种抖动对模型的正确性具有明显影响，其影响程度要高于任何其它建模决策。

确定性抖动可以进一步细分成多个类别：周期性抖动(PJ，有时也称为正弦曲线抖动或SJ)、占空比相关抖动(DCD)和数据相关抖动(DDJ，也称为符号间干扰或ISI)。图 4.2a 显示了 BERTScope BER 轮廓功能怎样显示 BUJ 值。

下面分别介绍了每种抖动的特点和根本原因。



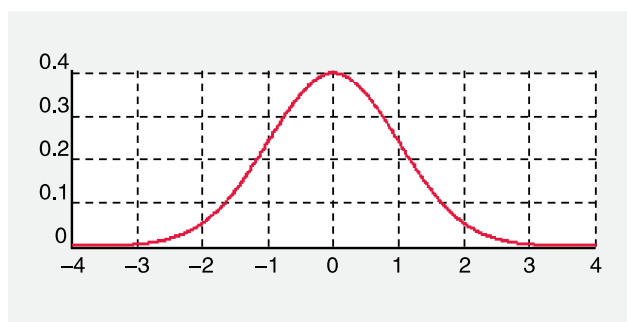


图 4.2.1a 高斯抖动的眼图和直方图。

### 4.2.1 随机性抖动

随机性抖动是不能预测的定时噪声，因为它没有可以识别的模式。典型的随机性抖动实例是在无线电接收机调谐到没有活动的载频时听到的声音。尽管在理论上随机过程具有任意概率分布，但我们假设随机性抖动呈现高斯分布，以建立抖动模型。这种假设的原因之一是，在许多电路中，随机噪声的主要来源是热噪声（也称为 Johnson 噪声或散粒噪声），而热噪声呈现高斯分布。另一个比较基础的原因是，根据中心极限定理，不管各个噪声源采用什么分布，许多不相关的噪声源的合成效应应该接近高斯分布。

高斯分布也称为正态分布，其 PDF 可以使用人们熟悉的振铃曲线进行描述。图 4.2.1a 中说明了一个分布实例，其中平均值为 0，标准偏差为 1.0。参考资料 4 中全面介绍了这种分布，但它的一个最重要的特点是：对高斯变量，它可以达到的峰值是无穷大。尽管这种随机变量的大多数样本将聚集在平均值周围，但它在理论上与数量任意大的平均值不同。所以，基础分布没有峰到峰边界值。从这种分布中提取的样本越多，测得的峰峰值越大。

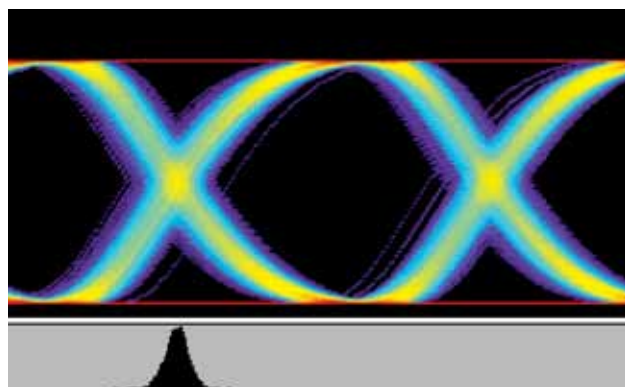


图 4.2.1b 说明了具有纯高斯分布抖动的信号眼图及相关的 TIE 直方图。

人们通常通过大量地多次采样、并记录峰峰值结果，来检定这种分布。在使用这种方法时应该特别注意。对随机变化进行 N 次观察的峰峰值本身就是一个随机变量，尽管这个变量的标准偏差较低。例如，使用这样一个随机变量作为质检的合格 / 不合格标准，将要求提高测试合格的阈值，以考虑测量中的不确定性，这会导致有些本可以合格的器件测试不合格。更好的方法是把 N 次观察与假设的分布（在本例中是高斯分布）进行拟合。然后，可以使用分布的数学描述，以特定的置信度预测更长时期内的行为。



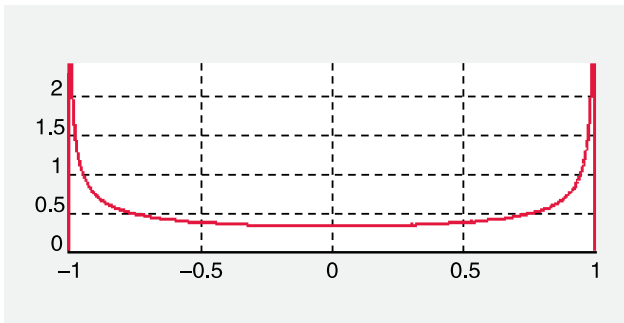


图 4.2.3a 非高斯分布。

#### 4.2.2 确定性抖动

确定性抖动是可以复现、可以预测的定时抖动。正因如此，这个抖动的峰峰值具有上下限，在数量相对较少的观察基础上，通常可以以高置信度观察或预测其边界。下面几段根据抖动特点和根本成因，进一步细分了这类抖动。

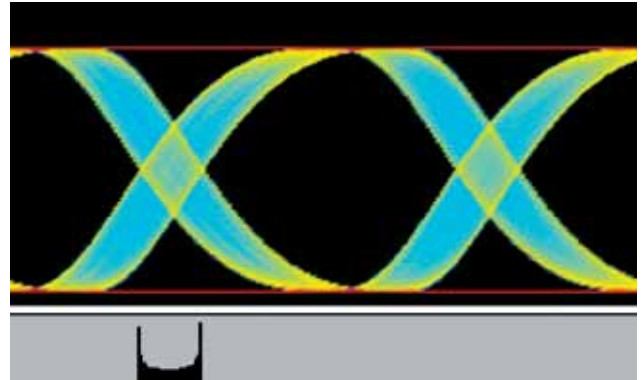


图 4.2.3b 非高斯抖动的眼图和直方图。

#### 4.2.3 周期性抖动

以周期方式重复的抖动称为周期性抖动，如图 2.4c 中所示的实例，其中 TIE 时间趋势显示了重复的三角形波。由于任何周期波形都可以分解成傅立叶顺序的谐波相关正弦曲线，这类抖动有时称为正弦曲线抖动。图 4.2.3a 中显示了峰值振幅为 1.0 的正弦波的概率分布。

一般来说，周期性抖动与数据流中任何定期重复的模式无关。下一小节中介绍了与重复的数据模式相关的抖动。

周期性抖动一般是由耦合到系统中的外部确定噪声源引起的，如开关电源噪声或强局部 RF 载波。时钟恢复 PLL 不稳定也可能导致周期性抖动。

图 4.2.3b 中说明了周期性抖动为 0.2 单位间隔的眼图及相关的 TIE 直方图。

#### 4.2.4 数据相关抖动

与数据流中的位序列相关的任何抖动都称为数据相关抖动或 DDJ。DDJ 通常是由电缆或设备的频响引起的。看一下图 4.2.4a 中的波形，其中对数据序列强烈地执行低通滤波。由于滤波，波形没到达完全的高状态或低状态，除非在同极的一行中有多个位。

图 4.2.4b 显示了叠加在偏移版本上的这一波形。可以看到，在下降转换采用 1,0,1,0,1,0,1 序列时，与采用 1,0,1,0,1,1,1 序列时相比，跨过阈值的时间较早。

由于这种定时移动可以预测，与转换前的特定数据有关，因此它属于 DDJ，通常也称为码间干扰或 ISI。

图 4.2.4c 中显示了 DDJ 为 0.2 单位间隔的信号眼图及相关的 TIE 直方图。ISI 抖动的直方图一直仅由脉冲构成。

#### 4.2.5 占空比相关抖动

可以根据相关边沿是上升沿还是下降沿预测的抖动称为占空比抖动 (DCD)，导致 DCD 的常见原因有两个：

1. 上升沿的转换速率与下降沿的转换速率不同。
2. 波形的判定阈值高于或低于应该值。

图 4.2.5a 中的眼图说明了第一种情况。这里，判定阈值位于 50% 振幅点，但波形的上升时间慢，导致上升沿跨过阈值的时间比下降沿晚。结果，边沿交叉的直方图（灰色）呈现出两个不同的组。（与以前的眼图相比，本例中的波形除占空比抖动外，还有部分高斯噪声。）

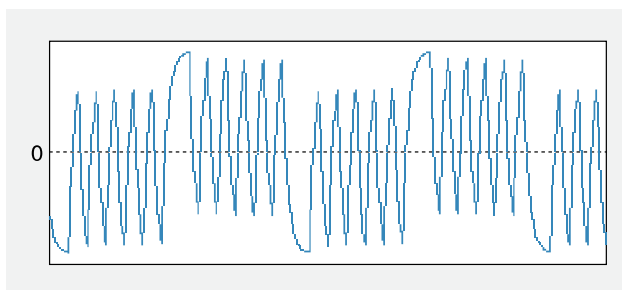


图 4.2.4a 带有数据相关抖动的数据信号。

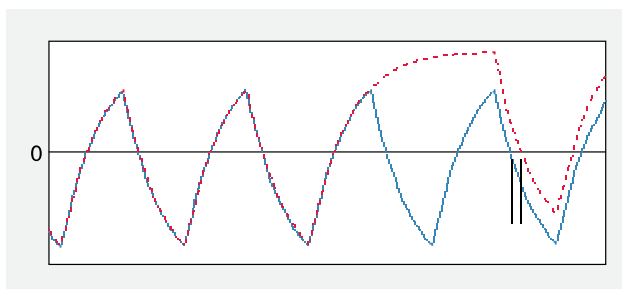


图 4.2.4b 具有数据相关抖动的有限带通信号源。

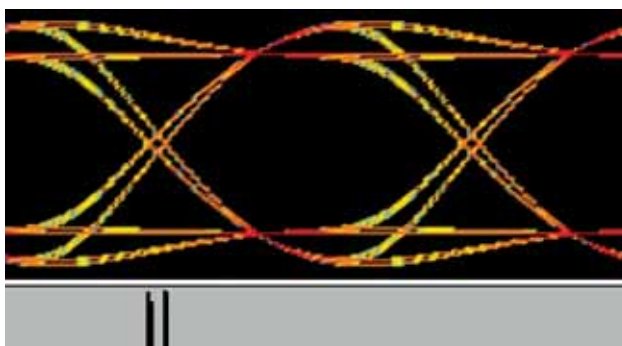


图 4.2.4c 数据相关抖动的眼图和直方图。

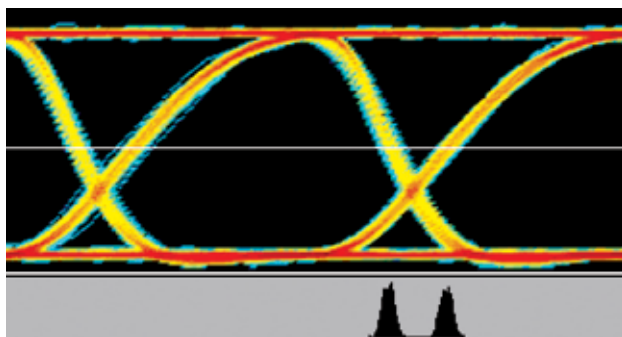


图 4.2.5a 不对称上升 / 下降时间导致的占空比失真。

图 4.2.5b 中的眼图说明了第二种情况，其中波形已经均衡了上升时间和下降时间，但判定阈值没有设在 50% 振幅点上。边沿交叉直方图看上去与图 4.2.5a 非常类似。

#### 4.2.6 有界不相关抖动 (BUJ)

高速互连的相邻通道之间的串扰，如 4 × 10GbE，明显影响着串行链路性能。此外，存在串扰会损害传统电流抖动分离方法的精度，由于过量计算随机抖动，会导致高速链路器件的设计裕量下降。通过把有界不相关抖动成分作为信号损伤抖动分解的一部分，得到的 BER 眼图合成可以提高评估的准确度。如图 4.2.6 所示，可以改善出现在邻道配置上的高频串行链路中的抖动结果。

#### 4.2.7 子速率抖动 (SRJ)

由于附近的逻辑处理，确定性抖动通常会感应到系统中。这类交互会导致抖动，抖动可能是同步的，也可能是异步的，属于 BUJ 类别（“不相关”是指抖动与数据码型不相关）。时钟同步抖动是这类抖动的典型特例。信号处理技术，如复用 / 解复用、通道编码、码组格式化和低速并行处理，都有可能以时钟边沿的整数倍位移边沿。

如图 4.2.7 所示，发射机 4:1 复用阶段可能会提前或推后边沿的定时，其与所有内部 1/4 时钟并行负载注册时间同步。如果要查看 1/4 速率时钟触发的四个眼图，他们将看到两个拥有标称眼宽的眼图以及抖动的边沿周围的一个短眼宽和一个长眼宽。这不能视为 ISI，因为它可以在所有码型的位上观察到（只要码型长度不是 4 的倍数）。

构成一定比率的所有眼图的平均跳变时间之间任何与谐波无关的差异都是确定性抖动，与比率相关，报告为子速率抖动 (SRJ)。任何大于 SRJ 数值的 BUJ 都进一步称为非子速率抖动 (NSR)。

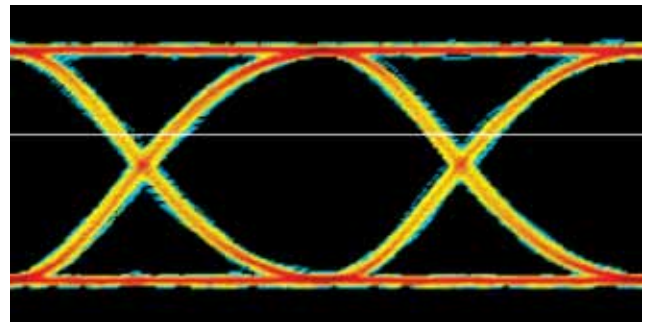


图 4.2.5b 不正确的检测阈值导致的占空比失真。

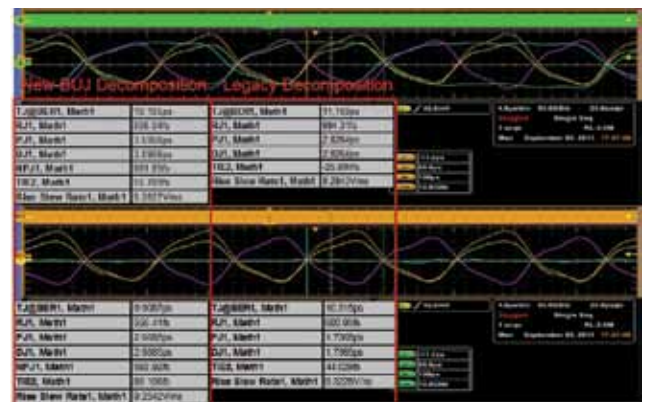


图 4.2.6. 使用有界不相关抖动分离方法改进 TJ，提高裕量。

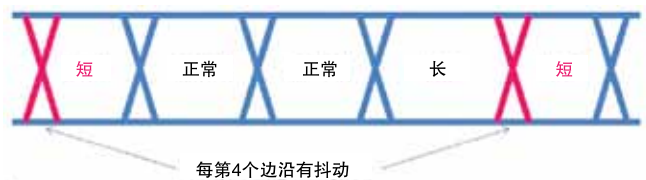


图 4.2.7. F/4 子速率抖动，每第 4 个边沿延迟，导致眼宽不均匀。

必须注意，不要把子速率抖动与码型相关 ISI 混为一谈。如果被测数据码型是子速率除数的倍数，那么 SRJ 数值中不包括该子速率的抖动，因为它将被正确识别为 ISI 的组成部分。

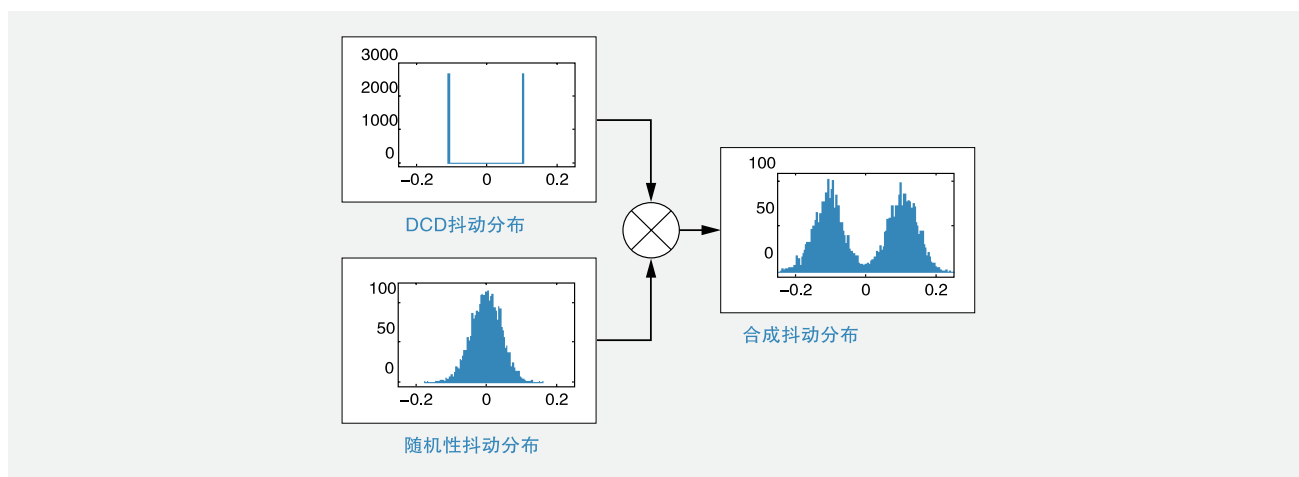


图 4.3a 使用确定性抖动对随机性抖动求卷积，找到总抖动。

### 4.3 综合考虑

上面分别介绍了每种抖动的眼图和 TIE 直方图。但是，在同时存在一种以上的抖动时直方图会怎么样呢？统计理论适用的有效结果可以解释如下：如果两个或两个以上的随机过程是独立的，那么其效应之和导致的分布等于各个分布的卷积值。

与口头描述相比，了解这个概念的实例要更加明了。图 4.3a 说明了在占空比抖动（一个直方图包括两个脉冲）与随机性抖动（呈现高斯分布）时会出现什么情况。另一个实例可以参见前面的图 3.2d，其中三角形波（周期性抖动的一种形式）的正态分布与随机性抖动结合在一起。

资深人员可能会查看图 4.3a 中最后的直方图，推断哪两类抖动导致这个直方图。但是，实际实例可能会涉及各种数量的所有抖动类型，从而导致直观性低得多的合成直方图。全面分析抖动的目标之一，是识别导致最终结果的各个抖动成分。

在准确识别的抖动成分插回到图 4.2 的抖动模型中，并使用模型预测系统在新环境中的行为方式时，抖动分离的作用将真正显现出来。这是估算误码率基础，本文第五章中更加详细地介绍了怎样估算误码率。

为了解精确分析工具的重要意义，我们将比较具有不同抖动特点的两个系统。第一个系统称为系统一，仅具有随机性抖动，标准偏差为 0.053 单位间隔 (UI)。这个系统的 TIE 直方图的数据速率为 1062.5 Mbps，如图 4.3b 所示。

第二个系统具有随机性抖动，标准偏差为 0.028 UI，大约是第一个系统的一半。但是，它还有两个不相关的周期性抖动成分，每个成分的峰到峰振幅为 0.14 UI。图 4.3c 说明了系统二的 TIE 直方图。

这两个直方图的样本总数完全相同，都是大约 42,000 个边沿，但看上去却明显不同。事实上，对这两个样本集合，时间间隔误差的峰峰值是完全相同的，都是 430 ps (0.457 UI)。如果提供的工具只能通过目视进行比较，那么将很难区分这两种情况。将不可能精确地预测系统在更长的观察间隔内的行为方式。

有人可能会问，区分这两种情况有那么重要吗？因为它们看起来非常类似。在考察误码率和浴缸曲线之后，我们将再来看一下这个实例。

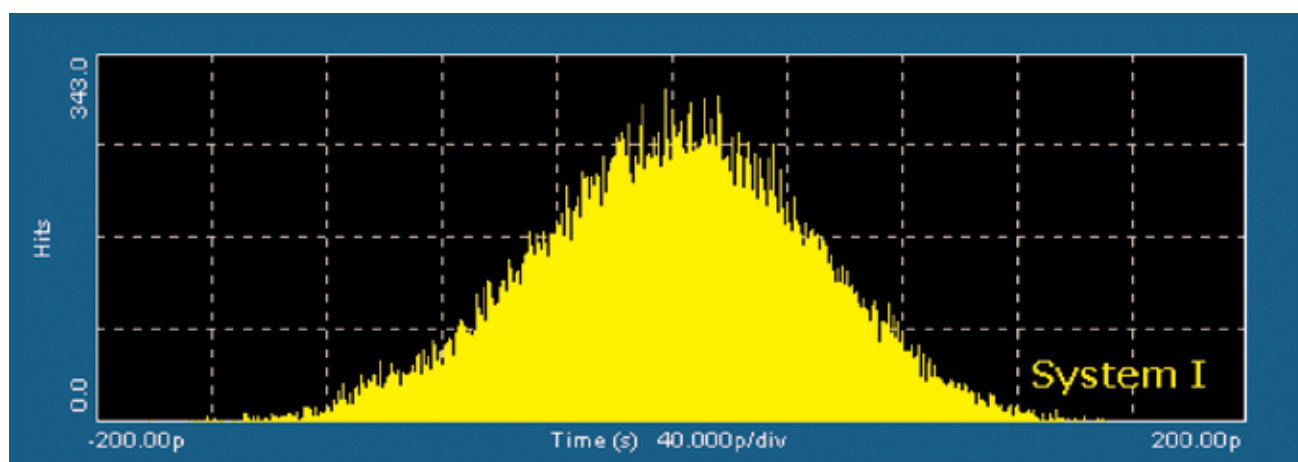


图 4.3b 随机性抖动为主的抖动分布的直方图。

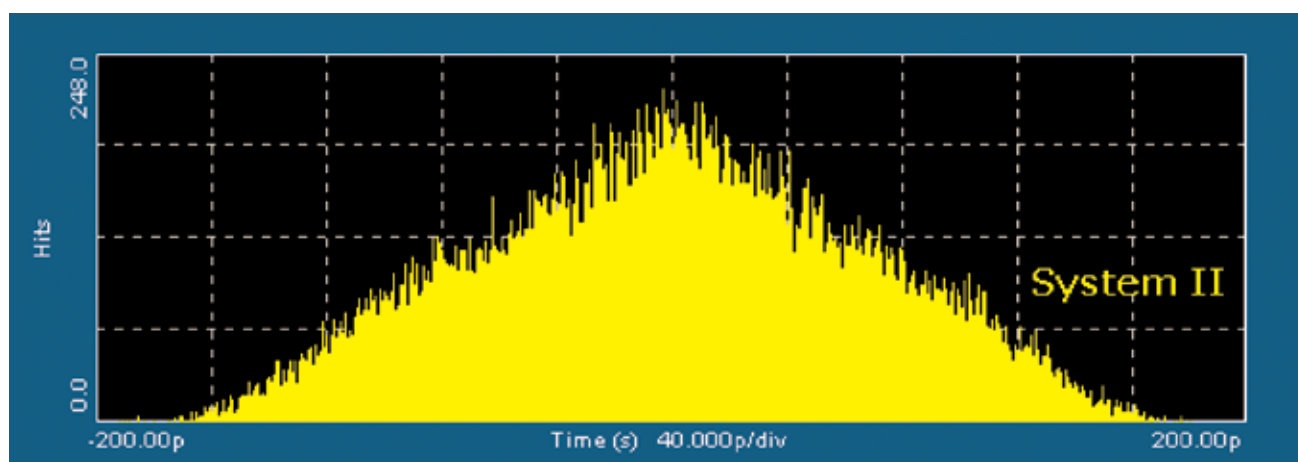


图 4.3c 确定性抖动为主的抖动分布的直方图。

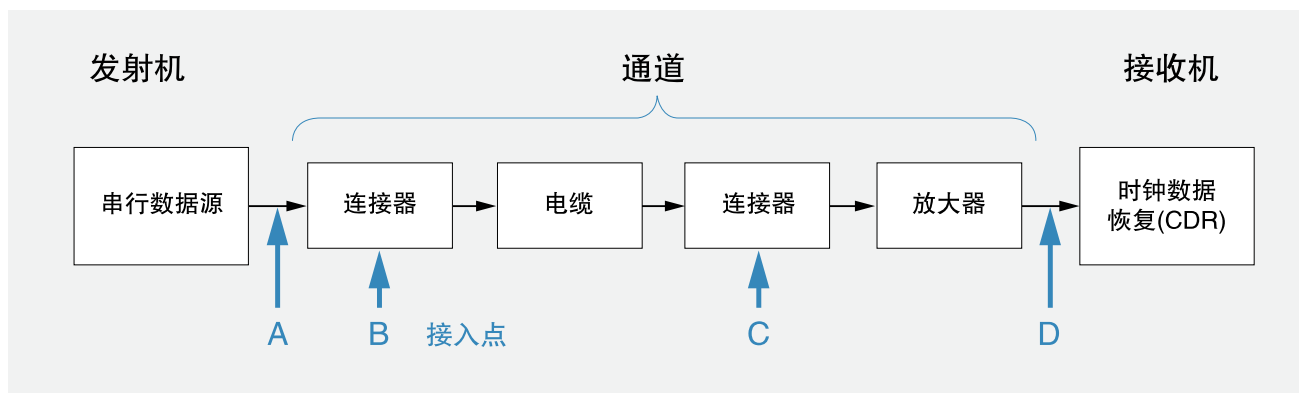


图 5.1 设置系统抖动预算的常用测量点。

## 第五章：抖动与误码率的关系

“大体解决适当的问题要远远优于确切解决大体的问题。”

*John Tukey*

### 5.1 抖动预算

实际通信系统由发射机、通道和接收机组成，如图 5.1 中的模型所示。通道可以包括线缆、互连器件和不执行时钟重新发生功能的有源器件。通道可能会引入滤波、非线性度、DC 偏移、阻抗不匹配和其它随机性抖动。各种电路测试点和系统连接器将提供可以监测信号质量的接入点。在工程师从发射机向接收机传送信息，并在每个接入点上监测信号质量时（可能使用眼图），信号抖动一般会变差。

简单地说，在信号到达接收机时钟数据恢复电路的输入（接入点 D）时，可以认为如果眼睛仍然张开，即使只是张开一小点，结果仍然是成功的。但是，接收机电路并不完美。接收的信号眼图必须在水平方向上张开足够大，以考虑接收机判定电路中的定时不确定性，同时眼图在垂直方向上也要张开足够大，以适应影响判定阈值的噪声。

因此，全面的系统设计规范将分配一个抖动预算，以便精确定义的接入点具有已知抖动极限，在信号进入重新同步化的接收机时仍保持足够的裕量。



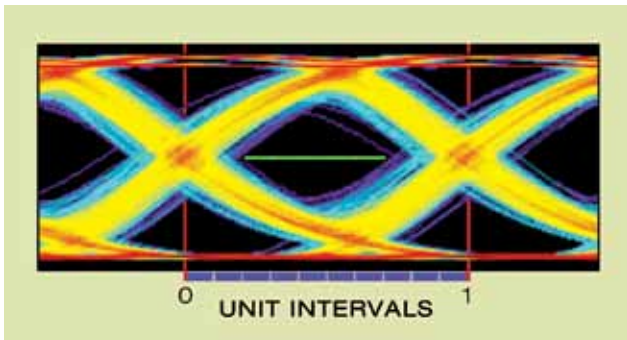


图 5.2a 眼宽用来确定性能。

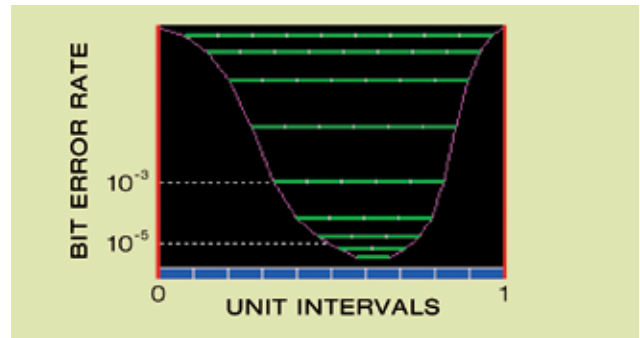


图 5.2b 测量眼宽随时间变化，确定误码率。

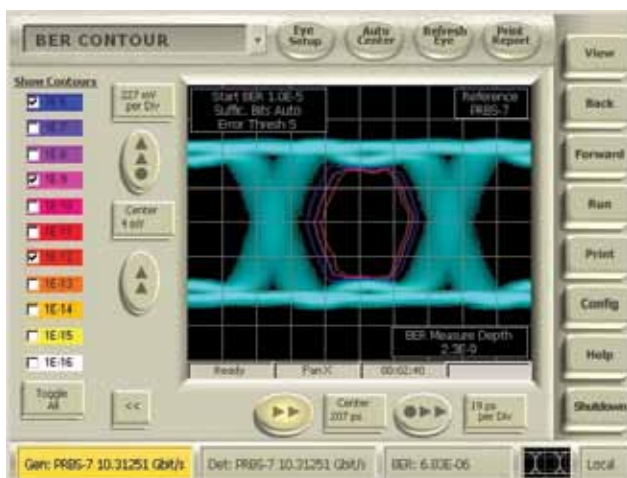


图 5.2c 传统眼图上特定 BER 性能的 BER 轮廓。

## 5.2 浴缸曲线

第 3.5 节中讨论了眼图和眼图张开的概念。第 4.2.1 节中讨论了高斯概率分布，其峰峰值在理论上没有界限。把这两项结合在一起考虑，会导致一个有趣的想法：对包含某些高斯抖动的任何信号，如果累计样本的时间足够长，眼图应该完全合上。这会导致这样一个概念：把眼图张开作为比较基础是没有用的。幸运的是，如果对眼图张开应用置信度，则可以恢复眼图的用处。

看一下图 5.2a，其中长 0.5 单位间隔的绿色标尺一直在水平方向上放在眼图的中心。假设如果任何波形跨过这个标尺，则视为失败，而不管是上升还是下降。在图中，似乎任何波形都没有跨过这个标尺，但是如果波形样点继续累计，且信号中包含某些高斯抖动，那么跨过标尺是不可避免的。

现在假设如果每 1000 个波形中有一个以上的波形跨过标尺，那么测试就是成功的。测试进行多长时间已经不再重要。如果允许累计 50,000 个波形，有不到 50 个波形跨过标尺，那么测试将合格。有人可能会说，在  $10^3$  个波形中，除一个波形外，眼图张开了 50%。由于每跨过一次都代表一个误码，因此其误码率 (BER) 为  $10^{-3}$ 。

如果使用较短的标尺测试相同的信号，即长 0.25 单位间隔，那么跨过标尺的频率自然要低一些。可能在每 100,000 个波形中，平均只有一个波形会跨过这个较短的标尺。有人可能会说，在  $10^5$  个波形中，除一个波形外，眼图张开了 25%。

沿着这些线并使用一系列标尺，可以全面检定眼图张开程度与误码率的关系。（注意，应允许每个标尺向左滑或向右滑，以获得最佳拟合。）如果没有在一个图上针对相应的误码率绘制标尺，那么通过把标尺连接起来，可以得到类似于图 5.2b 的曲线。

这种描述性的图称为浴缸图，因为粉红色的线条可以想象成浴缸。通过使用这样一个图，可以以给定的置信度，区分眼图的哪个水平部分仍完全没有进行信号转换。

最后，要注意，积累足够的数据、以在图的底部直接测量眼图张开程度可能会需要很长的时间。为此，可以使用第四章中介绍的数学模型，在小得多的样本基础上预测性能。

有助于识别特定 BER 水平下抖动性能的另一个概念是 BER 轮廓图。BER 轮廓 (图 5.2c) 是浴缸曲线的二维扩展，可以围绕着眼图张开径向测量，以可视方式表示特定 BER 水平下的眼图张开程度。

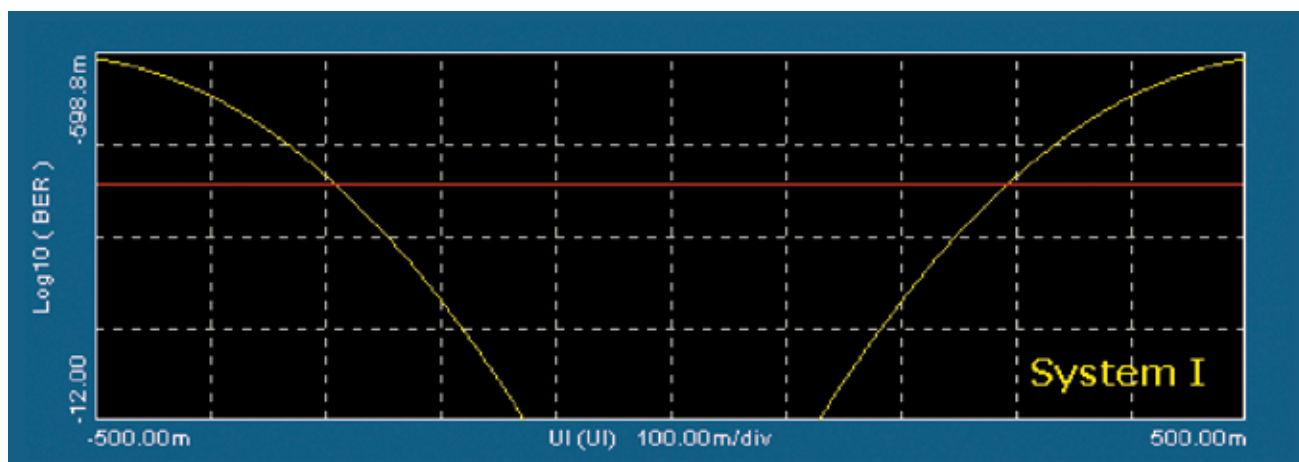


图 5.3a 随机性抖动为主的系统的 BER 曲线。

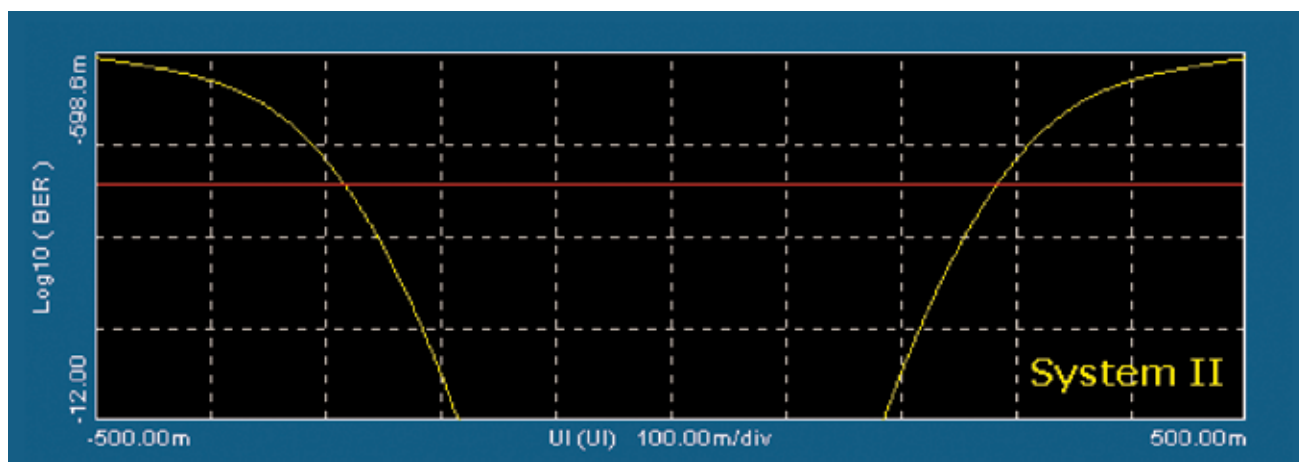


图 5.3b 确定性抖动为主的系统的 BER 曲线。

### 5.3 BER 实例

第 4.3 节介绍了一个实例，其中在大约 42,000 个边沿的样本总数时，具有不同抖动特点的两个系统拥有类似的 TIE 直方图和相同的峰到峰抖动。(参见图 4.3b 和 4.3c.) 我们现在回到这个实例，说明相关的浴缸曲线。图 5.3a 说明了系统一的浴缸曲线，图 5.3b 说明了系统二的图。

由于这两个图都表示由 42,000 个观察的边沿组成的数据集，红色光标已经放在每个图上，对应的 BER 是 42,000 分之一或  $10^{-4.63}$ 。在这些水平上，这两个系统的眼图张开都大约是 58%，系统一的眼图张开程度实际上要大于系统二。但是，在 BER 为  $1e-12$  时（这是串行通信链路常用的规范点），系统一的眼图仅张开了 26%。系统二的眼图张开了 37%，或大约是系统一的一半。这是一个明显的差异，可以简便地确定系统是否满足要求。

## 第六章：小结

定时抖动会使电子系统的质量下降，而人们转向更高的数据速率及更低的逻辑摆幅，则使工程师更多地关注定时抖动的检定问题。必须检定时抖动，以识别抖动来源，进而在重新设计时减少抖动。通过检定，还可以根据一致性标准和设计规范定义、识别或测量抖动。

所有抖动都具有随机成分和确定成分。由于随机特点，必须注意指定可以接受的抖动上下限。在根据适量的数据以极高的置信度估计抖动性能时，这一点尤其重要。为处理抖动的随机成分，人们已经发现，有助于分析和预测抖动的方法之一是使用数学模型，其中将根据观察的测量结果调节各个参数。然后可以使用这个模型，预测系统在其它条件下的性能。这个模型还可以查看抖动的具体成因，从而协助了解怎样减少抖动。

示波器一直是用来观察抖动的传统工具，它采用了直方图和眼图等技术。通过不断增加后端处理能力，提供额外的功能，如周期间测量、趋势和频谱图、数据记录和最坏情况捕获，示波器已经成为检定时抖动的首选工具。通过使用完整的时钟恢复功能、抖动分离算法和误码率估算功能的进一步增强，示波器已经成为检定和降低定时抖动的唯一解决方案。

本文中的许多数字和实例都源自泰克 DPOJET 抖动和眼图分析工具，该软件在泰克 MSO/DPO 系列示波器和泰克 BERTScope 误码率测试仪上运行，能够在  $10^{-12}$  水平下进行实际 BER 测量，提供高置信度 TJ 测量。另外这些实例还说明 BERTScope 能够测量一个码型中各个位上的 TJ，为在 BER 测试仪中分离抖动提供了一种全新方式。

## 附录 A：缩略语词汇表

BER	误码率
BUJ	有界不相关抖动
CDF	累计分布函数
DCD	占空比抖动
DDJ	数据相关抖动
DJ	确定性抖动
FFT	快速傅立叶转换
ISI	码间干扰
PDF	概率密度函数
PJ	周期性抖动
PLL	锁相环
PSD	功率谱密度
RJ	随机性抖动
SJ	正弦曲线抖动
SRJ	子速率抖动
TIE	时间间隔误差
TJ	总抖动
UI	单位间隔

## 参考资料

- 1 贝尔通信研究公司 (Bellcore), “同步光网络 (SONET) 传输系统: 常见的通用标准, TR-253-CORE”, 第 2 期, 修订版本 1, 1997 年 12 月
- 2 ITU-T 建议 G.810 (08/96) “同步化网络的定义和术语”
- 3 Papoulis: “概率、随机变量和随机过程, 第二版”, McGraw-Hill, 1984
- 4 Davenport and Root: “随机信号和噪声理论介绍”, IEEE Press, 1987



泰克官方微信

**如需所有最新配套资料，请立即与泰克本地代表联系！**

**或登录泰克公司中文网站：[cn.tek.com](http://cn.tek.com)**

**泰克中国客户服务中心全国热线：400-820-5835**

**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) 5795 0700  
传真：(86 10) 6235 1236

**泰克上海办事处**

上海市长宁区福泉北路518号  
9座5楼  
邮编：200335  
电话：(86 21) 3397 0800  
传真：(86 21) 6289 7267

**泰克深圳办事处**

深圳市深南东路5002号  
信兴广场地王商业大厦3001-3002室  
邮编：518008  
电话：(86 755) 8246 0909  
传真：(86 755) 8246 1539

**泰克成都办事处**

成都市锦江区三色路38号  
博瑞创意成都B座1604  
邮编：610063  
电话：(86 28) 6530 4900  
传真：(86 28) 8527 0053

**泰克西安办事处**

西安市二环南路西段88号  
老三届世纪星大厦26层C座  
邮编：710065  
电话：(86 29) 8723 1794  
传真：(86 29) 8721 8549

**泰克武汉办事处**

武汉市洪山区珞喻路726号  
华美达大酒店702室  
邮编：430074  
电话：(86 27) 8781 2760

**泰克香港办事处**

香港九龙尖沙咀弥敦道132号  
美丽华大厦808-809室  
电话：(852) 2585 6688  
传真：(852) 2598 6260

**CN.TEK.COM** 为您提供更多宝贵资源。

© 泰克科技公司版权所有，侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利和国外专利保护。本文中的信息代替所有以前出版的材料中的信息。技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和泰克徽标是泰克公司的注册商标。本文提到的所有其他商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

04/17 EA/WWW 55C-16146-6

