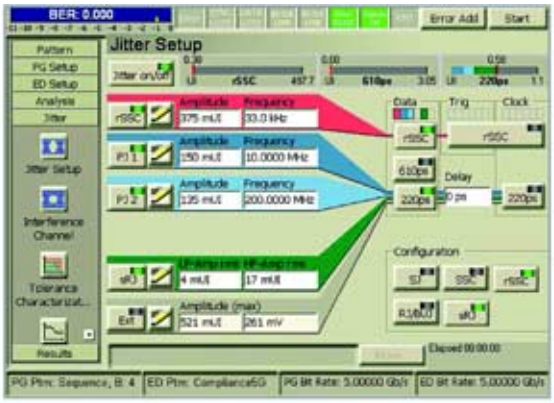
PCI Express® 2.0 版接收机 (RX) 抖动容限测试

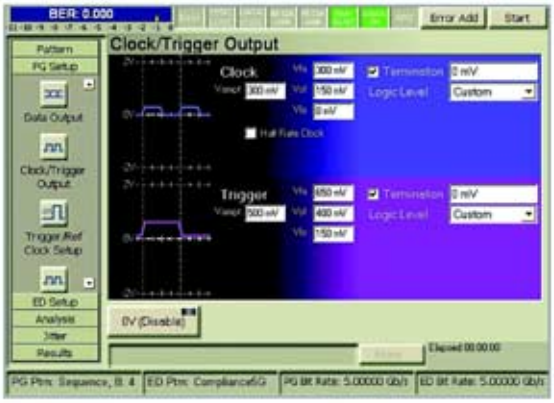
J-BERT N4903B高性能串行比特误码率测试仪 (BERT) 是您最理想的选择

应用指南

J-BERT N4903B 高性能串行 BERT 可提供完整的 PCI Express® 2.0 版标准的抖动容限测试能力:

- 所有内置抖动源 (双音 DJ、按频谱分布的RJ、SSC和剩余SSC) 都符合 PCI Express® 2.0 版标准
- 灵活的时钟通道和触发通道支持 PCI 参考时钟差模噪声
- 灵活的码型可对被测件进行训练 (设置环回模式) 然后进行测试
- J-BERT N4903B 高性能串行 BERT 可与 N5990A 自动化测试软件一起进行自动化一致性测试





Agilent Technologies

本文内容

本文描述了PCI Express 2.0版标准对接收机(RX)抖动容限测试的要求，同时还解释了J-BERT N4903B高性能串行BERT如何利用其完整的抖动容限测试能力，来有效地满足这些要求，进行一致性和表征测试。

最后，本文还简要介绍了如何使用J-BERT N4903B的测量功能来执行TX测试。

简介

PCI Express已成为计算机内部的一个主要接口。2006年12月，PCI-SIG®协会发布了第2版基本技术指标(Base Specification Revision 2) [1]。第2版将工作速度从第1版的2.5 Gb/s提升到5 Gb/s。除了基本技术指标之外，该组织还于2007年4月发布了板卡机电(CEM)技术指标2.0版[2]，并将其作为基本技术指标的配套版本。

从测试角度来看，这两个技术指标可看作是：有关芯片级性能的基本技术指标和有关连接器上的板卡(特别是在互通性方面)的CEM技术指标。

标准的要求

基本技术指标包括两种不同的时钟拓扑：

- 数据驱动拓扑
- 公共参考时钟

简而言之，第一种拓扑不共享时钟信号，而第二种拓扑提供1/50数据速率的公共参考时钟。表1的前两列显示了这两种测试方案以及相应的抖动参数值。

CEM标准主要针对公共参考时钟拓扑的插卡和系统主板测试。表1在最后两列给出了这两种测试方案的抖动参数值，并依次列出了四种RX测试方案的抖动参数。下面将详细描述这些参数：

1. 校准通道适用于基本技术指标，它可生成幅度比为5:1的符码间干扰(ISI)，从而在主板和插卡所使用的印刷电路板中产生一个信号畸变。具有该幅度比的信号可从J-BERT中的ISI 3号迹线获得。图1是N4903B的测量窗口。游标读数给出了预定的比值。如图2所示，定时抖动为73 ps (ISI读数)。由于DJ (1.5 MHz .. 100 MHz)技术指标的值为88 ps，那么还需要15 ps的SJ。
2. 以下所有抖动参数都是J-BERT N4903B上校准的刻度，无需再进行任何校准。只要像图中那样在刻度盘中输入预定值即可。如果要验证抖动值，我们推荐您使用infiniium 86100C DCA-J以及图2所示的抖动分析功能(RJ、PJ和ISI读数)，并根据应用指南[7]来进行验证。

PCIe 2 RX 测试				
	芯片测试 基本技术指标 数据驱动拓扑	芯片测试 基本技术指标 公共参考时钟	插卡测试 CEM 技术指标 公共参考时钟	系统主板 CEM 技术指标 公共参考时钟
校准通道(ISI)	5:1 脉冲电压	5:1 脉冲电压	无	无
RJ 1.5 MHz .. 100 MHz	4.2 ps rms	3.4 ps rms	3.4 ps rms	1.4 ps rms
RJ 10 kHz .. 1.5 MHz	8.0 ps rms	4.2 ps rms	4.2 ps rms	3.0 ps rms
DJ>100 MHz	无	无	有, 27 ps 的 SJ	有, 27 ps 的 SJ
DJ>1.5 MHz .. 100 MHz	有, 88 ps 的纯 SJ 或 (SJ+ISI)		有, 30 ps 的 SJ	有, 30 ps 的 SJ
剩余 SSC	无	75 ps, 三角波	75 ps, 三角波	无
SSC	20 ns(-500 ppm)	无	无	无
CM 串扰(SI)	300 mV	300 mV	无	无
VRX- 眼图, 最小值	100 mV pp, 差分	120 mV pp, 差分	300 mV pp, 差分	260 mV pp,差分

表 1: 不同测试方案所需要的 RX 抖动容限测试参数

3. RJ (1.5 MHz .. 100 MHz) 适用于不同数量的所有测试方案。
4. RJ (10 kHz .. 1.5 MHz) 适用于不同数量的所有测试方案。
5. 大于 100 MHz 的 DJ 适用于 CEM 标准，代替基本技术指标中的 ISI 生成。
6. DJ (1.5 MHz .. 100 MHz) 适用于不同数量的所有测试方案。使用抖动容限测量，可以通过扫描频率来进行调试／表征测试。
7. 剩余 SSC 适用于这两个标准，但不适用于系统主板测试。它与周期抖动类似，但它是三角波形状。
8. SSC 只适用于基本技术指标中的数据驱动拓扑。SSC也是N4903B发生器时钟设置窗口中的一个校准刻度。它是唯一不能用infiniium 86100C DCA-J 的抖动分析功能直接进行测量的抖动分量；推荐使用频谱分析仪进行测量，详情请见 [6]。
9. 表1最后一行中的值是要求的最小幅度。这些幅度指的是芯片引脚上的幅度。由于 PC 板存在损耗，这些幅度与同轴电缆末端的幅度有一定差异。此外，第 2 代标准需要损耗补偿，使跳变比特与去加重比特幅度相同。这就必须使用 N4916A 去加重信号转换器，如图 3 所示。对于根据 CEM 技术指标进行的插卡测试，最小幅度的校准可以通过 PCI SIG 提供的一致性测试基板 (CBB) 和一致性测试负载板 (CLB) 来进行。这两种电路板可以通过同轴电缆非常方便地进行连接。N4916A信号转换器用于调整其可变去加重，直到跳变比特的幅度等于去加重比特的幅度。[8]

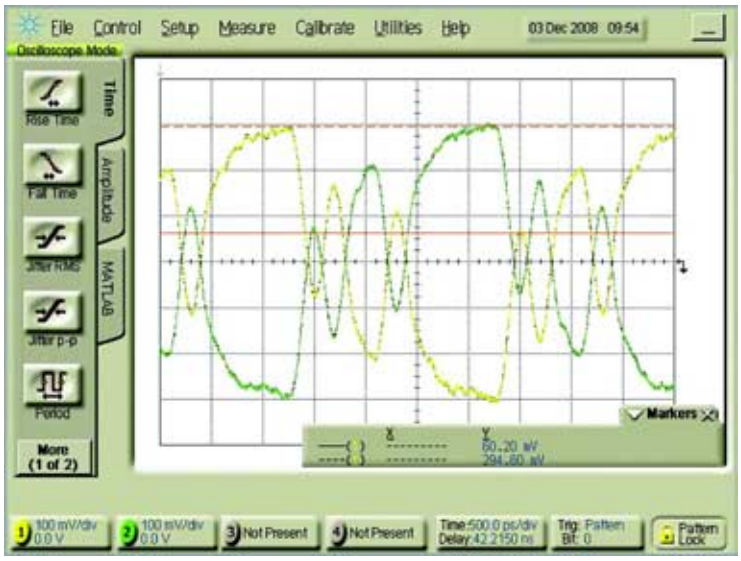


图 1: 幅度比为 5:1 的校准通道，使用 J-BERT N4903B ISI 3 号迹线实现

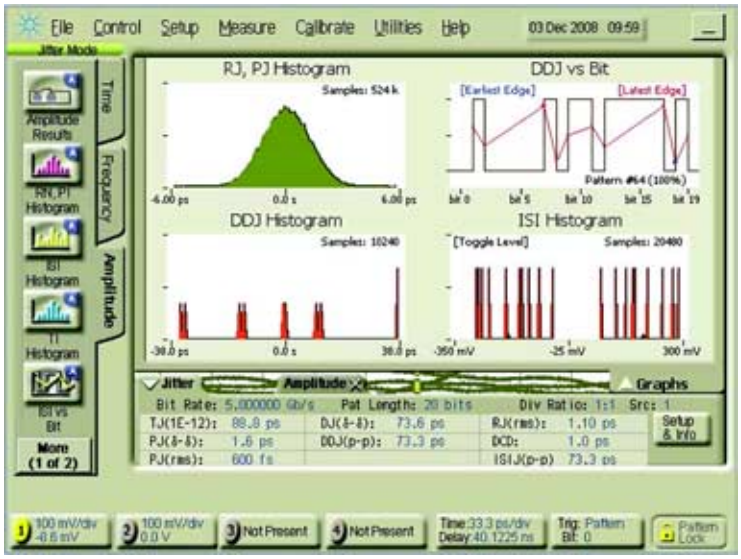


图 2: 对图 1 中的信号进行的抖动分析，ISI 测量值为 73 ps

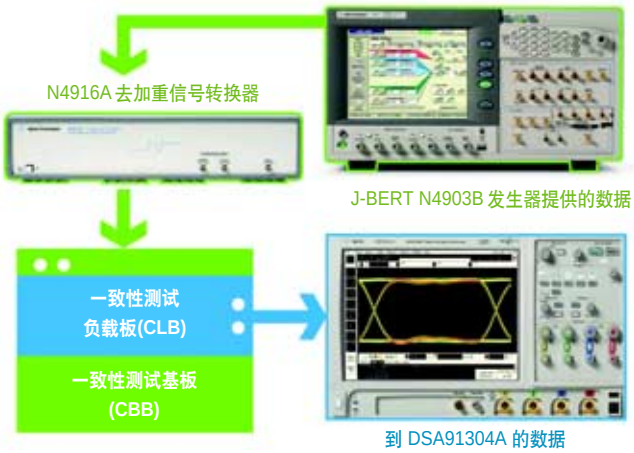


图 3: 设置 J-BERT 以及 N4916A 去加重信号转换器和 CBB 及 CLB 来校准最小幅度

PCI Express 2.0 版 RX 抖动测试基础知识

PCI Express 2.0版RX抖动容限测试通过生成新的抖动类型，对RX进行测试:

1. 在频谱上分布的 RJ
2. 双音 DJ
3. 剩余 SSC

本章将深入讨论这些主题:

图4显示了在频谱上分布的RJ。该图显示了抖动量与频率的变化关系。白噪声(无限带宽)在所有频率上都具有恒定的能量。此处的技术指标显示，低频上的随机抖动较大，高频上的随机抖动较小。实际抖动大小取决于具体的测试方案，参见表1。在频率为 1.5 MHz 处转变，滤波器的截止频率将是无限陡峭(采用砖墙式(Brick-wall)滤波器，低通滤波器的一种)。

J-BERT N4903B 通过在整个带宽(10 kHz .. 100 MHz)上加入 RJ_{hf}，并在低频段(10 kHz .. 1.5 MHz)加入 RJ_{hf}，来创建这种情景。

图5显示了双音DJ的概念。通常DJ 抖动采用一个频率上的正弦抖动，而该频率可能随着时间发生改变(抖动容限测量)。双音法同时使用两个正弦信号，一个在低频，另一个在高频。

低频信号可以在频段的最大值和最小值之间自由地进行连续扫描。两个信号的实际大小取决于测试方案，参见表1。J-BERT N4903B相应地生成所需的 PJ1 和 PJ2。

图6显示了扩频调制(SSC)。这种调制由 SSC 偏差(典型值为 500 ppm)和 SSC 频率(典型值为 30..33 kHz)来定义。SSC偏差通常是向数值变小的方向发生。因此在数据速率为 5 Gb/s 的时候，500 ppm 的偏差就意味着在 30..33 kHz 的频率内，数据速率会在 5 GB/s 和 4.975 Gb/s 之间变化。理想的调制波形是三角波，但实际上介于正弦波和三角波之间的任何波形都可以。

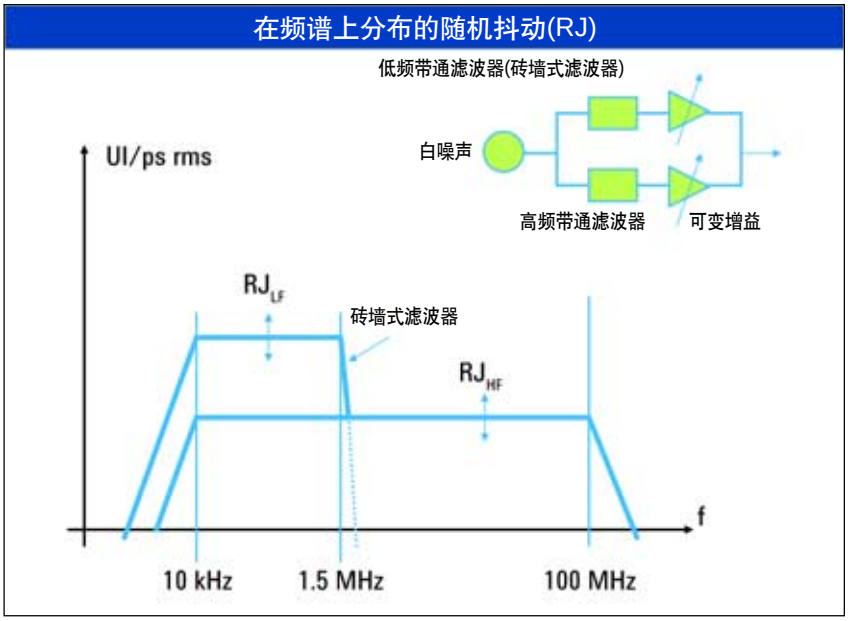


图 4: 带宽加权的随机抖动

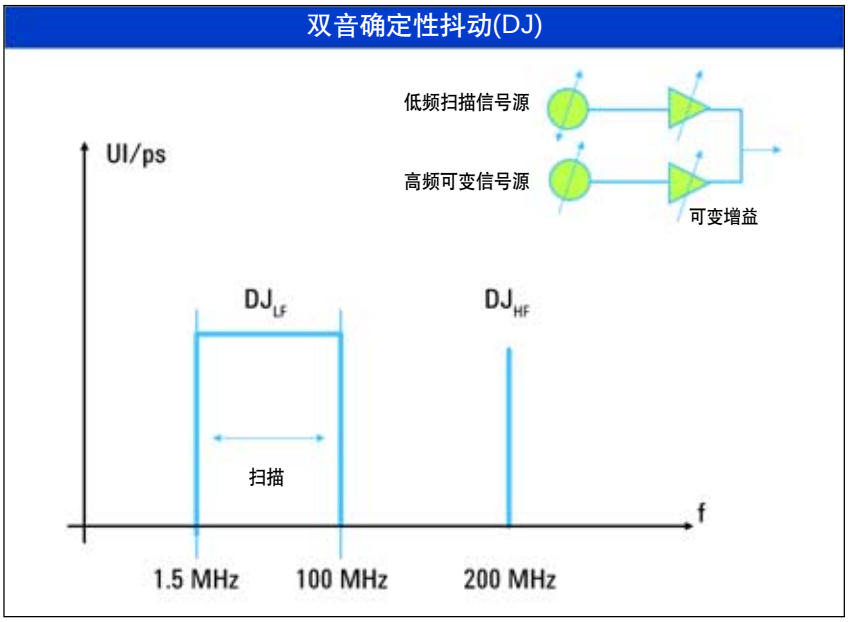


图 5: 双音确定性抖动(DJ)

图7描述了在时域上观察SSC调制。顶部迹线是未经 SSC 调制的信号，作为参考信号。底部迹线是数据信号，而 SSC 调制从负斜率处开始。在该斜率上，数据速率(频率)呈线性下降; 数据周期(时间)按照1/x函数增加。SSC 频率为 33 kHz 时，负斜率持续的时间长度为15 us。因此得出负跳变过程中包括:

15 us/200 ps = 75000个数据周期(1)。数据周期的时间从200 ps (D_1) 变到 201,005 ps (D_{75000})。从调制负斜率开始到结束，未调制信号的参考数据流的总延迟偏差等于 T_{SSC} = 20 ns:

$$T_{SSC} = \sum (D_n - 200\ ps),\ n = 1 .. 75000 \quad (2)$$

PCIe 向 100 MHz 参考时钟加入 SSC 调制，因此系统需要在发射机(TX)端加入一个倍增锁相环，在接收机(RX)端加入一个具有时钟数据恢复(CDR)功能的倍增锁相环。CDR的带宽有限，导致在有限的时间内对参考时钟变化做出反应。在如图 8 所示的系统体系结构中，出现在接收机闩锁输入端的发射端数据和经过 CDR 的时钟有严重的传输延迟差异。经过 CDR 的传输延迟 (~200 ns) 比经过通道的传输延迟 (技术指标为< 12 ns) 大得多。这种延迟差异使 SSC 产生相移，导致采样器上的眼图闭合。这称为‘剩余 SSC’(rSSC)。在进行测试时，在数据上使用干净的参考时钟和剩余 SSC (可产生等效的强化测试条件) 可以使这种情况发生反转。

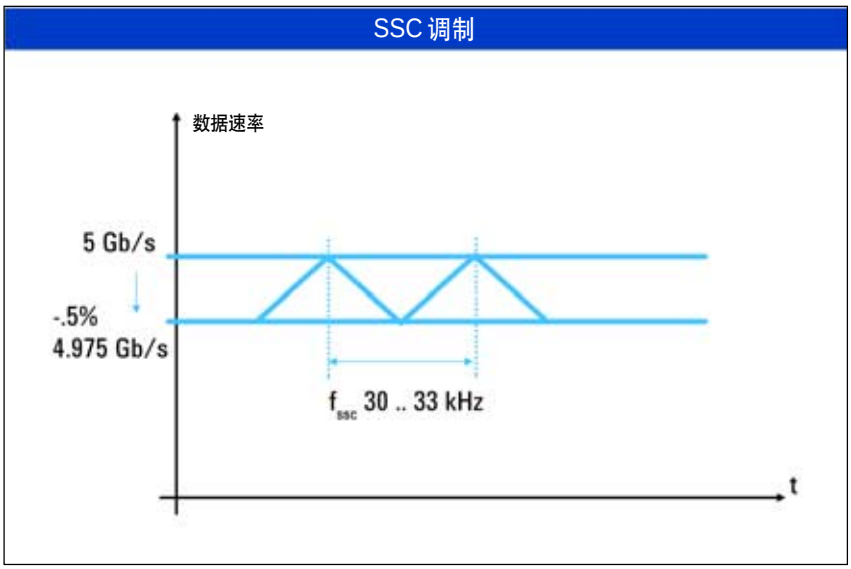


图 6. SSC 调制

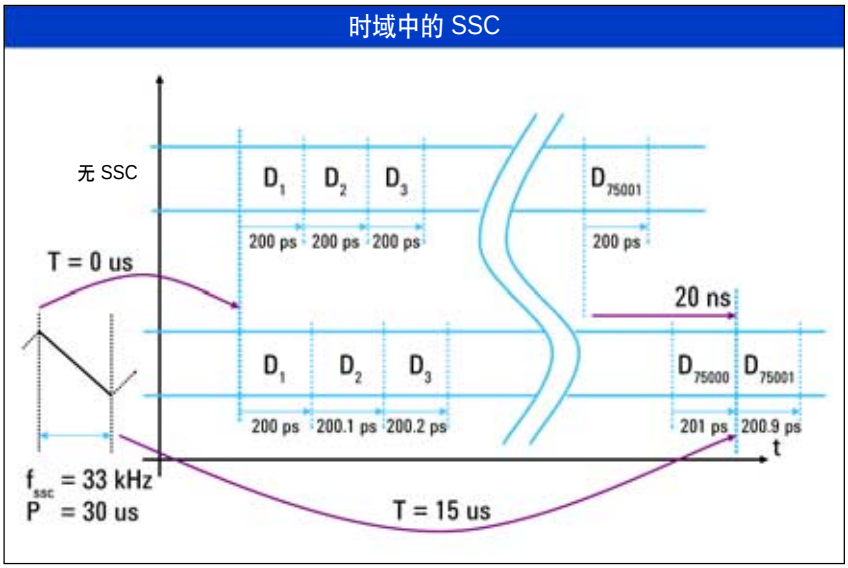


图 7. 时域中的 SSC 调制

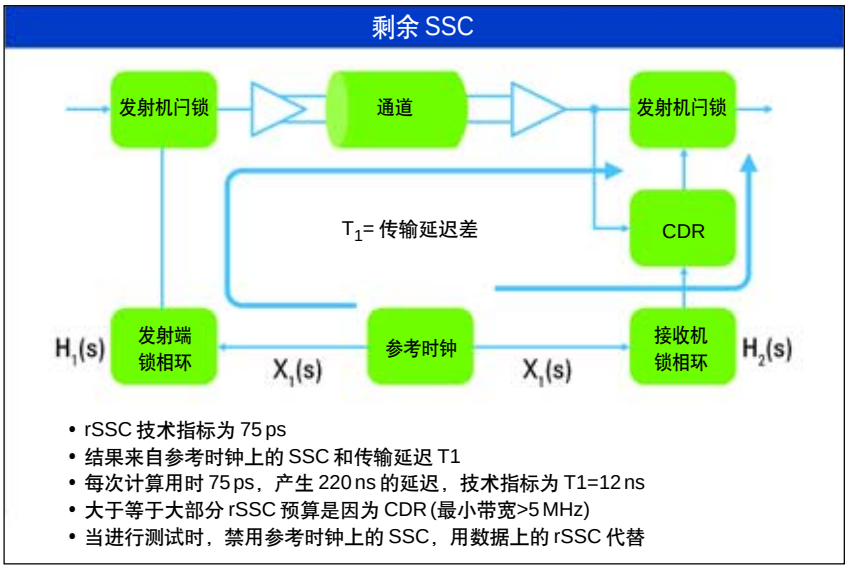


图 8: 传输延迟差异导致剩余 SSC (rSSC)

测试设置和方框图

图9到图11显示了接收机测试设置的方框图。

基本技术指标适用于芯片级的被测件(DUT)。需要使用可容纳芯片的定制设计电路板。这些设计可能包括，也可能不包括校准通道。如果不包括校准通道，可能要使用 J-BERT N4903B 的 ISI 功能。

根据时钟拓扑，J-BERT N4903B 连接到包括发生器数据端口和误码检测器端口的电路板(有或没有参考时钟端口)。建议使用触发通道作为参考时钟端口，请参见下页和图 12。

CEM 技术指标适用于插卡测试(图 10)和系统主板测试(图 11)。在进行这些测试时，必须使用一致性测试基板 (CBB) 和一致性测试负载板[3][4]。为了进行正确的参考时钟注入，可能还必须对 CBB 进行一定的修改，请参见[5]。

在对包括多个数据通道的插卡进行测试时，建议使用 PCIe 转接卡 x1 至 1x PCIe x16。

根据 CEM 技术指标进行的测试通常是由参考时钟拓扑决定的。因此 J-BERT N4903B 连接到发生器数据端口、误码检测器端口和触发通道端口(作为参考时钟)，参见上文。

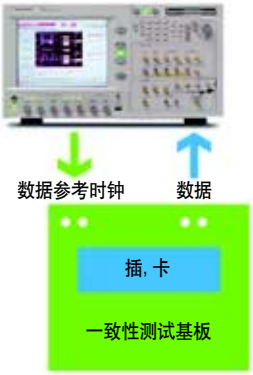
RX 测试、方框图、基本技术指标

	芯片测试 基本技术指标 数据驱动拓扑	芯片测试 基本技术指标 通用参考时钟
校准通道	5:1 脉冲电压	5:1 脉冲电压
RJ 1.5 MHz .. 100 MHz	4.2 ps rms	3.4 ps rms
RJ 10 kHz .. 1.5 MHz	8.0 ps rms	4.2 ps rms
DJ >100 MHz	无	无
DJ>1,5 MHz..100 MHz	有, 88 ps 的 纯 SJ 或 (SJ+ISI)	
剩余 SSC	无	75 ps, 三角波
SSC	20 ns (-500 ppm)	无
CM 串扰 (SI)	300 mV	300 mV
VRX- 眼图, 最小值	100 mV, 峰峰值, 差分	100 mV, 峰峰值, 差分
最小 RX 功率	120 ps	120 ps

- 发生器和抖动设置提供的所有抖动分量
- 生成序列信号(包含训练和一致性码型)的发生器
- 在 CDR 模式下提供一致性码型的分析仪

图 9: 根据基本技术指标进行 RX 测试的测试设置，包括或不包括参考时钟根据拓扑情况而定

RX 测试, 方框图, CEM 技术指标, 插卡

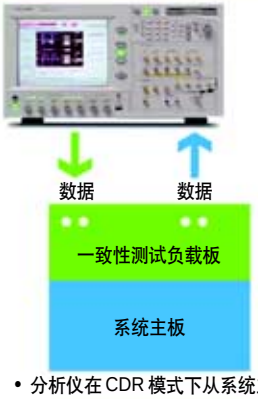


	插卡测试 CEM 技术指标 公共参考时钟
校准通道 (ISI)	无
RJ 1.5 MHz .. 100 MHz	3.4 ps rms
RJ 10 kHz .. 1.5 MHz	4.2 ps rms
DJ > 100 MHz	有, 27 ps 的 SJ
DJ >1,5 MHz .. 100 MHz	有, 30 ps 的 SJ
剩余 SSC	75 ps, 三角波
SSC	无
CM 串扰 (SI)	无
VRX- 眼图, 最小值	300 mV, 峰峰值, 差分

- 发生器和抖动设置提供的所有抖动分量
- 生成序列信号(包含训练和一致性码型)的发生器
- 在 CDR 模式下提供一致性码型的分析仪

图 10: 根据 CEM 技术指标对插卡进行 RX 测试的测试设置

RX 测试, 方框图, CEM 技术指标, 系统主板



	系统主板 CEM 技术指标 通用参考时钟
校准通道 (ISI)	无
RJ 1.5 MHz .. 100 MHz	1.4 ps rms
RJ 10 kHz .. 1.5 MHz	3.0 ps rms
DJ > 100 MHz	有, 27 ps 的 SJ
DJ > 1,5 MHz .. 100 MHz	有, 30 ps 的 SJ
剩余 SSC	无
SSC	无
CM 串扰 (SI)	无
VRX- 眼图, 最小值	380 (在 6 dB 时为 260) mV, 峰峰值, 差分

- 分析仪在 CDR 模式下从系统主板数据恢复时钟, 随后将恢复后的时钟馈送到发生器的时钟输入端口
- 发生器和抖动设置提供的所有抖动分量
- 生成序列信号(包含训练和一致性码型)的发生器
- 分析仪检查一致性码型

图 11: 根据 CEM 技术指标对系统主板进行 RX 测试的测试设置

测试设置，J-BERT N4903B 的设置

J-BERT N4903B 连接到发生器数据输出端口、误码检测器数据输入端口和触发通道端口，需要时作为参考时钟使用。如图12所示，触发通道的幅度和偏置可以通过编程来控制，以适应要求的电平技术指标。触发通道能够提供除法器因数(divider factor)为1/50的时钟信号，以提供100 MHz的参考时钟信号(此编程窗口未显示，可以使用按钮 PG Setup → Trigger/Ref CIK Setup 进入该编程窗口)。

图13显示了J-BERT N4903B序列编辑器，其中包括插卡训练所需的序列。训练包含前三个数据块，可将插卡切换到环回模式。数据块4包含一致性测试码型，将在误码检测器上使用，进行同步和BER测量。使用按钮‘To PG’，可将该序列载入到 J-BERT N4903B 硬件中。在按下‘Start’按钮之前，应先给插卡通电。当按下‘Start’后，通过发送一次数据块1和2，500次数据块3，最后发送无限次数据块4，将会生成序列。这在左下部分的状态窗口读数‘Sequence, B:4’中指示。此时，J-BERT 误码检测器可以自动校正‘BER:0.000’读数中的结果。图中未显示 J-BERT N4903B 误码检测器在外部时钟模式下从发生器时钟输出端口获得时钟。(ED Setup → Clock Setup)。

图 14 显示了插卡测试方案中的抖动设置。拨入的值为；

rSSC (技术指标为 75 ps)	375 mUI
PJ1 (< 100 MHz, 30 ps)	150 mUI
PJ2 (> 100 MHz, 27 ps)	135 mUI
sRJ (HF, 3.4 ps rms)	17 mUI rms
sRJ (LF, 4.2 ps rms)	4 mUI rms

注：RJLF 的实施是递增的，编程值计算：RJLF-RJHF=4.2 ps rms-3.4 ps rms = 0.8 ps rms (等于 4 mUI rms)

使用这种混合的抖动分量，插卡必须达到 BER<$1e^{-12}$ 的水平，以符合要求的标准。

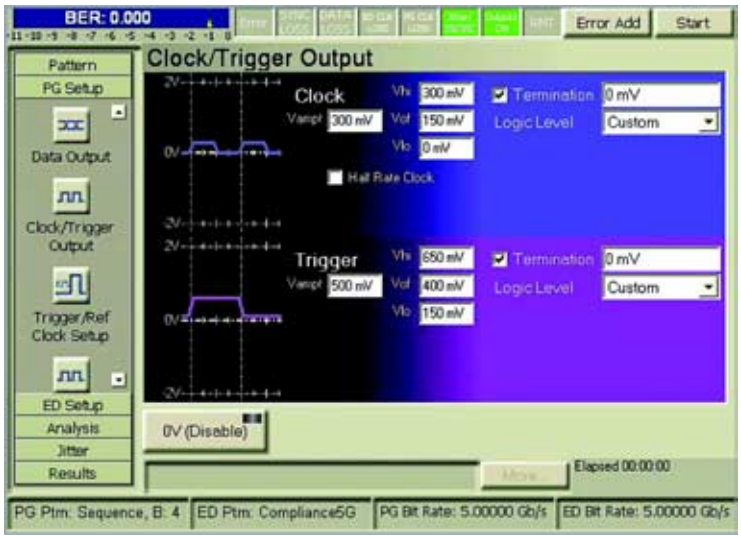


图 12: 必要时的参考时钟测试设置，该时钟是由 50 倍分频(分屏)的触发通道生成的

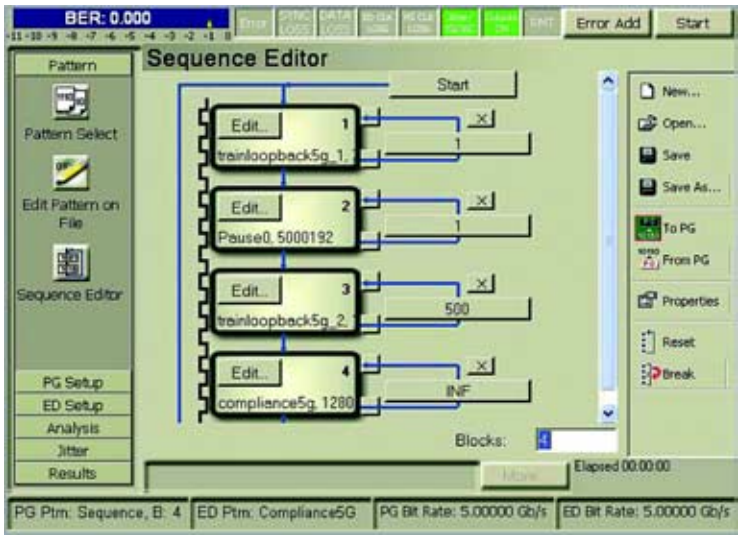


图 13: 使用 4 个数据块(包含训练部分和一致性测试部分)的序列器设置，分析仪对一致性测试部分(第 4 个数据块)进行检测

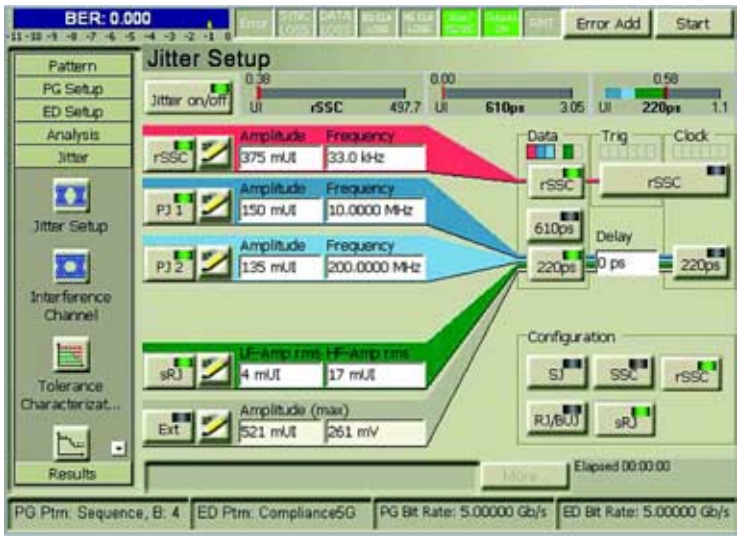


图 14: 插卡抖动混合的抖动设置

RX 测试结果

如图15所示，使用“累积结果”，可以有效地对附加卡的一致性进行验证。为了证明BER<1e^{-12}的置信度等于95%，必须测试~3 * 1e^{12}个比特并且没有发现误码[9]。在数据速率为5 Gb/s的条件下，这相当于600秒的测试时间。累积结果测量配置为单次运行，持续600秒的时间。结果图形将显示是否有误码出现。

如图16显示，抖动容限表征测量是一个重要的表征或调试测试工具。该测量可以配置容限扫描的起点和终点以及分辨率，并可以根据需要进行缩放，还可以选择载入一致性测试模板来查看裕量。抖动容限一致性测量是一种速度更快的工具，其中测量点沿着一致性曲线分布。图16中显示了一个从1 kHz到300 MHz有50个测量点的容限测量。

尽管技术指标规定使用非去加重信号进行RX一致性测试，但是为了进行表征，可能需要使用此类信号。在本例中，我们建议使用N4916A去加重信号转换器，详情请见[8]。

TX 测试结果

如图17所示，借助J-BERT N4903B眼图测量以及载入预定义一致性测试模板(包括裕量定义)的功能，可以高效地进行TX一致性测试。该测量不仅快速，而且能够定量表示任何违例(黄色插图)。除了适用于该一致性测试模板之外，该测量还提供了电平、幅度、跳变时间、抖动和信噪比等读数。

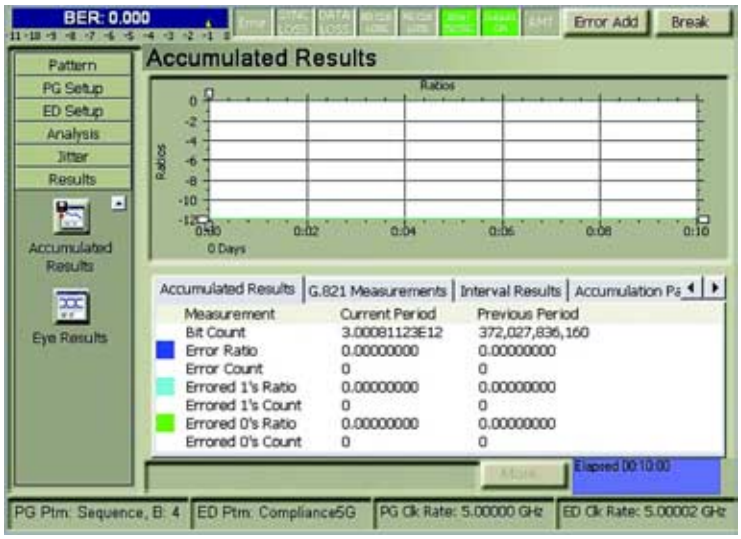


图 15: RX 测试的一致性测试结果。BER 的测量时间为 600 秒(无误码发生)，相当于 BER<1e^{-12} 的置信度为 95%

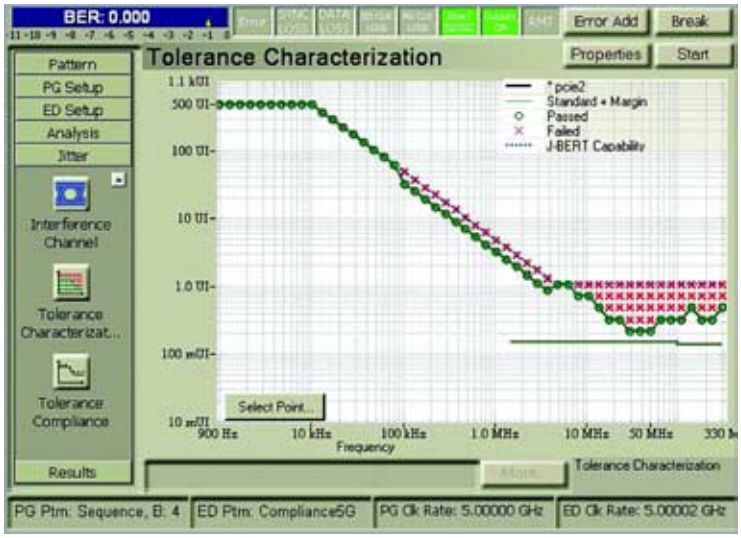


图 16: 抖动容限表征，使用 1 kHz 至 300 MHz 的 SJ 进行测量

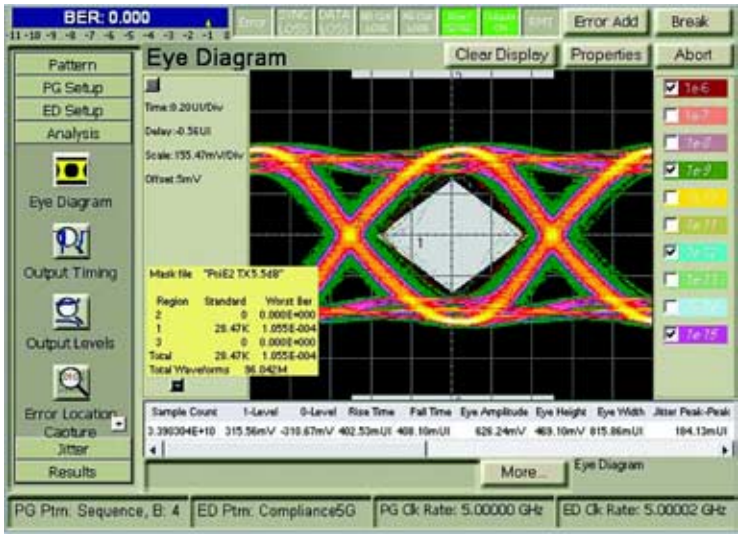


图 17: 使用 J-BERT N4903B 上的一致性测试模板进行眼图测量

J-BERT N4903B为表征TX提供了多种测量。图 18 和 19 显示了开眼和输出定时测量的实例。J-BERT N4903B 技术资料(5990-3217EN)提供了测量功能的完整列表。

图 18 中的眼图提供了插卡的输出信号所获得的眼图轮廓测量结果。测量结果的 BER 为 $1e^{-9}$ (红色曲线)，幅度分辨率为 1 mV，时间分辨率为 1 ps。

图 19 中的输出定时测量能够测量绝大多数 BER 阈值上的总体抖动。此处显示的曲线图配置为 BER $1e^{-6}$。在启用快速总体抖动优化的情况下，总体抖动测量 (BER < $1e^{-12}$) 将在大约 20 分钟后完成。

图20显示了一个TX抖动传输测量。该测量的步骤为: 手动扫描抖动频率 (SJ=.1 UI，500 kHz .. 50 MHz)，记录输出定时测量的相位裕量参数，然后将这些值输入电子表格，并标准化为最低抖动频率处的读数。图 20 显示了 TX 抖动传输测量的结果图。

总结

本文描述了基本标准和 CEM 标准对 PCI Express 2.0 版 RX 抖动容限的要求。这些标准规定了生成某些新型抖动的要求，本文就此进行了深入讨论。本文还突出介绍了 J-BERT N4903B在有效满足这些新要求方面的出色能力，并在最后对使用 J-BERT N4903B 进行 TX 测试进行了展望。

J-BERT N4903B 以校准刻度盘的方式提供所有抖动，因此不需要定制校准。如果需要去加重信号，我们建议您使用 N4916A 去加重信号转换器。

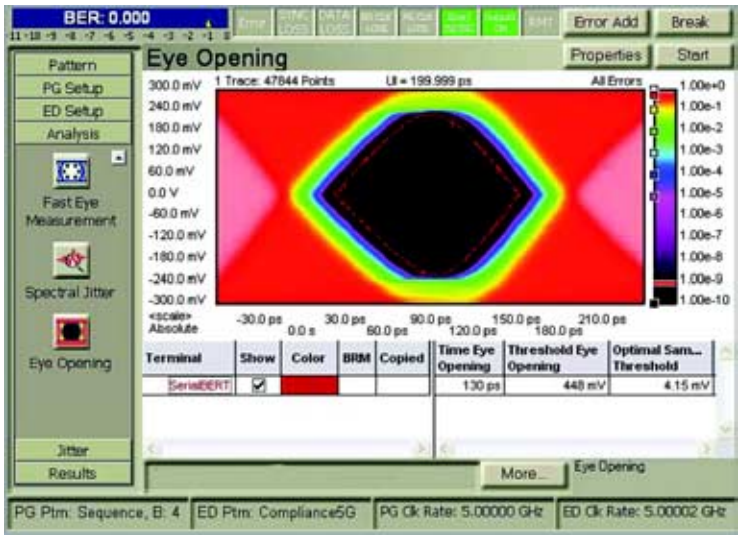


图 18: 开眼表征，内部曲线代表 BER $1e^{-12}$ 处的开眼

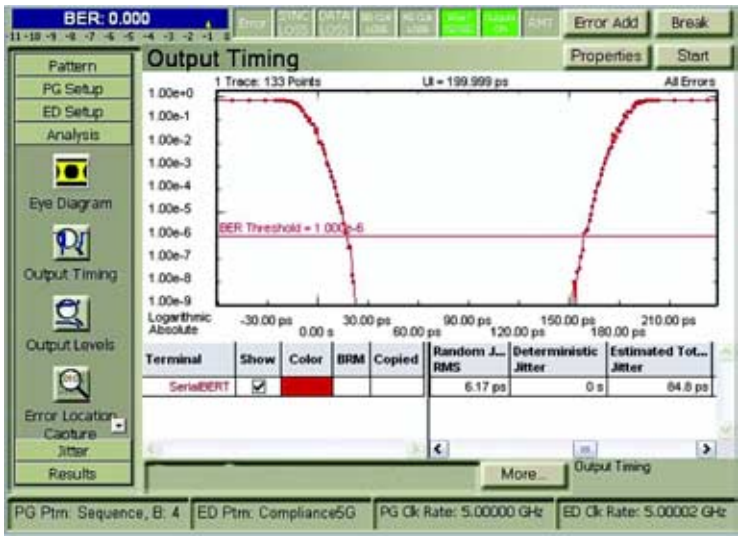


图 19: 用于表征 BER $1e^{-6}$ 处的总体抖动的输出定时测量

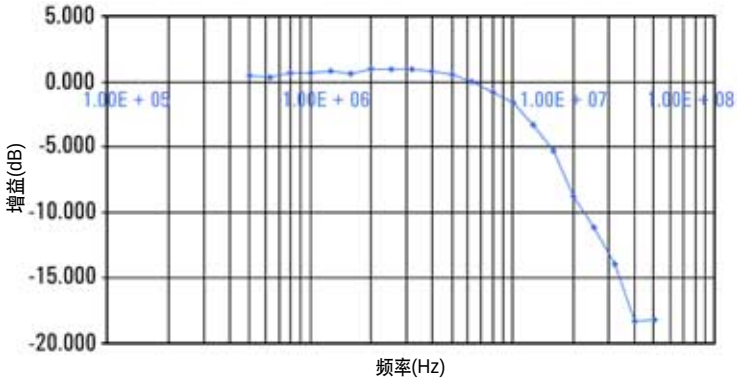


图 20: 使用 J-BERT N4903B 提供的抖动源和测量，手动测得的 TX 抖动传输曲线

相关产品

- J-BERT N4903B
- N4916A 去加重信号转换器
- Infiniium 86100C DCA-J 宽带示波器
- Infiniium DSA91304A 高性能示波器

文献

[1]: PCI Express基本技术指标第 2.0 版，2006.12.20

[2]: PCI Express 板卡机电技术指标 2.0 版，2007.4.11

[3]: 一致性测试负载板 (CLB2.0)、测试夹具用户文档，2008.4.2，1.0 版，PCI-SIG

[4]: 一致性测试基板 (CLB2.0) 测试夹具用户文档，2008.4.2，1.0 版，PCI-SIG

[5]: PCI Express revision 2.0 receiver testing, with J-BERT N4903A and 81150A pulse function arbitrary generator，安捷伦科技公司，2008.12，5990-3233EN

[6]: Calibrated jitter, jitter tolerance test and jitter laboratory with the Agilent J-BERT N4903A，5989-4967EN

[7]: Precision jitter analysis using the Agilent 86100C DCA-J，5989-1146EN

[8]: De-emphasized signal generation with the Agilent N4916A de-emphasis signal converter，5989-7193EN

[9]: Total jitter measurement at low probability levels, using optimized BERT scan method，5989-2933EN

J-BERT N4903B 技术资料，5990-3217EN

Remove all doubt

使您的设备恢复如新并准时送还

安捷伦承诺经我们维修和校准的设备在返回您时就像新设备一样。安捷伦设备在整个生命期中都保持其全部价值。您的设备将由接受过安捷伦专业培训的技术人员，使用全新的工厂校准规范，自动维修诊断步骤和正品备件进行维修和校准。您可对您的测量充满信心。

安捷伦还为您的设备提供各种测试和测量服务，包括入门级培训、现场培训，以及系统集成和项目管理。

要了解有关维修和校准服务的详细情况，请访问：

www.agilent.com/find/removealldoubt

欢迎订阅免费的

安捷伦电子期刊

www.agilent.com/find/emailupdates
得到您所选择的产品和应用的最新信息。

Agilent Direct

www.agilent.com/find/agilentdirect
高置信地快速选择和使用您的测试设备解决方案

Agilent Open

Agilent Open 简化连接和编程测试系统的过程，以帮助工程师设计、验证和制造电子产品。Agilent 的众多系统就绪仪器，开放工业软件，PC 标准 I/O 和全球支持，将加速测试系统的开发。要了解更详细的情况，请访问：**www.agilent.com/find/openconnect**。

www.agilent.com
www.agilent.com/find/jbert

请通过 Internet、电话、传真得到测试和测量帮助。
在线帮助: www.agilent.com/find/assist
热线电话: 800-810-0189
热线传真: 800-820-2816

安捷伦科技有限公司总部
地址：北京市朝阳区望京北路 3 号
电话：800-810-0189
(010) 64397888
传真：(010) 64390278
邮编：100102

上海分公司
地址：上海张江高科技园区
碧波路 690 号 4 号楼 1-3 层
电话：(021) 38507688
传真：(021) 50273000
邮编：201203

广州分公司
地址：广州市天河北路 233 号
中信广场 66 层 07-08 室
电话：(020) 86685500
传真：(020) 86695074
邮编：510613

成都分公司
地址：成都市下南大街 6 号
天府绿洲大厦 0908-0912 室
电话：(028) 86165500
传真：(028) 86165501
邮编：610012

深圳分公司
地址：深圳市福田中心区
福华一路六号免税商务大厦 3 楼
电话：(0755) 82763668
传真：(0755) 82763181
邮编：518048

西安办事处
地址：西安市高新区科技路 33 号
高新国际商务中心
数码大厦 23 层 02 室
电话：(029) 88337030
传真：(029) 88337039
邮编：710075

安捷伦科技香港有限公司
地址：香港太古城英皇道 1111 号
太古城中心 1 座 24 楼
电话：(852) 31977777
传真：(852) 25069256

香港热线: 800-938-693
香港传真: (852) 25069233

E-mail: tm_asia@agilent.com

本文中的产品指标和说明可不经通知而更改
©Agilent Technologies, Inc. 2009

出版号：5989-4087CHCN
2009 年 4 月　印于北京

Agilent Technologies