

PAM-N 误码率测试和信号分析

引言

多电平信号或脉冲幅度调制 (PAM) 正日益成为高速串行数据界关注的主题。随着带宽需求在整个网络中持续迅速提高, 更高速率的数据链路正变得至关重要。在转向更高的数据速率时, 可以考虑许多选项, 同时要考虑许多折衷因素, 包括元器件带宽、通道带宽、信噪比、功耗、成本和尺寸。通常考虑的信令选项有增加更多的数据通路、更快的 NRZ、PAM-N 和相干编码。

最近, 多种应用开始采用 PAM-N 多电平信令, 来解决系统带宽之类的挑战, 如等待审批的 802.3bj PAM-4 实现方案及在 QAM16 相干编码中采用 PAM-4。802.3bj 100GBASE-KP4 利用系统信噪比性能和 FEC, 采用 PAM-4 信号, 克服传统背板材料的带宽限制。

高效设计和测试 PAM-N 元器件、模块和系统带来了许多挑战。例如, 绝大部分测试设备是为标准 NRZ 数据信号设计的, 不能处理 PAM-N 信号。PAM-N 测试和设计验证必需采用新的测试设备、信号定义和方法。

PSPL PAM-N BERT 系统概述

本文演示了怎样生成和分析高速 PAM-N 信号 (高达 32Gb/s)。我们使用多通道、快速上升时间、低抖动的可编程码型发生器 (PG) 生成 PAM-N 信

号。我们使用低噪声、低抖动的可编程误码检测器测量这些信号。最后, 我们使用 PAM-N 软件工具分析信号, PAM-N 软件工具则利用误码检测器和码型发生器仪器的可编程功能。

表 1. PSPL PAM-N BERT 系统

仪器	说明
可编程 PG 及元器件	生成 PAM-N 信号。使用两条通道创建可编程 PAM-4。
可编程 ED	测量每个 PAM-N 信号电平的误码。
PAM-N 分析软件	使用可编程 PG 和 ED, 捕获一系列数据, 生成 BER、浴缸和轮廓指标。

生成信号使用的方法采用 PSPL 的宽带元器件组合多个 NRZ 信号。为了使用这种方法生成具有超高信号完整性的多电平信号, 各个 NRZ 眼图必须有非常快的上升 / 下降时间、低固有抖动和高信噪比。此外, 在组合多条通道的输出时, 发生器精确控制各个数据信号之间的相位关系至关重要, 以保证优化 PAM 信号的抖动。本文演示了 PSPL 的 PAM-4 信号发生器组合两条码型发生器通道, 生成具有完美的信号完整度和低抖动的信号。

本文还演示了通过进行误码率 (BER) 测量、浴缸曲线和 PAM-4 信号的轮廓图，来全面分析 PAM-N 信号。为了能够用于 PAM-N BER 测试和分析，误码检测器 (ED) 仪器必须设计有高灵敏度和宽相位余量输入，以及精密相位和电压采样点控制。能够分析用户自定义码型也至关重要，以便能够测量和测试发送的每个电平和比特的误码。

除 BER 测量外，PSPL 的 PAM-N 软件分析工具还在每个 PAM-N 电平上测量浴缸曲线，测量总抖动，提供 BER 轮廓图。本文中演示的 PAM4 BERT 系统使用的仪器如图 1 所示。



图 1. PatternPro PAM4 BERT 系统

PAM-N 信号生成

Picosecond Pulse Lab 的码型发生器为生成多电平信号提供了理想的工具。32Gb/s 码型发生器拥有 8ps 的上升时间、<300fs 的随机抖动，提供了同类最优秀的信号输出。PSPL 发生器提供了一整套 PRBS 码型和可编程用户自定义码型。正如本文后面所示，用户自定义码型对 PAM-N 信号分析至关重要。PSPL 发生器提供了相位粗

调和精调功能 (位位移和时延功能)，可以调节每条通道的相位，并考虑元器件和电缆互连。此外，PSPL 提供了高带宽电阻组合器，可以用来组合发生器的多个通道输出。

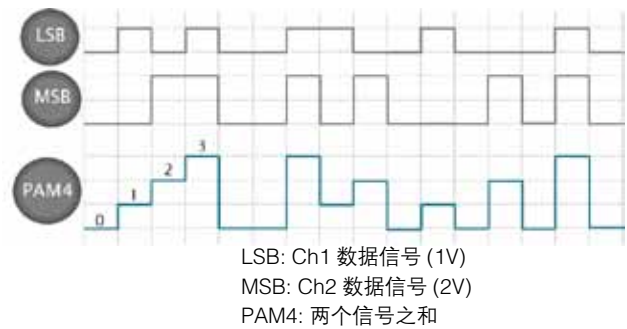


图 2. PAM4 信号生成

图 2 演示了组合两条数据流、创建 PAM-4 信号的基本方法。每条 PG 通道的输出连接到宽带电阻组合器上，如 PSPL Model 5350 50GHz 电阻组合器。通常可以增加一个电衰减器，如 Model 5510，改善匹配程度，降低多路径反射。

表 2. PAM-4 真值表

MSB	LSB	PAM4 电平
0	0	0
0	1	1
1	0	2
1	1	3

然后我们使用码型发生器的相位粗调和精调功能 (即位位移和数据时延)，精密对准两条通道的相位。这使用示波器监视和对准数据信号来实现。一般来说，LSB 信号的幅度是 MSB 的一半，创建彼此幅度相等的 PAM-4 垂直电平。

可以在 LSB 通道和 MSB 通道上使用两个不同的伪随机数据码型, 创建由 PAM-4 电平组成的“伪随机”序列。为了便于误码检测器进行 BER 测量 (本文后面将进行介绍), 应把相同长度的自定义码型编程到码型发生器的 LSB 和 MSB 通道的可编程内存中。

例如, LSB 码型可以是重复的 PRBS7, 长度最长 511 位; MSB 码型可以是 PRBS9, 根据定义, 其长 511 位。然后 LSB 和 MSB 码型位相加, 得到 PAM-4 多电平信号, 将生成一个由四个可能的电压电平 (0、1、2 或 3) 组成的序列。表 2 显示了根据 MSB 和 LSB 组合 PAM-4 信号的真值表。

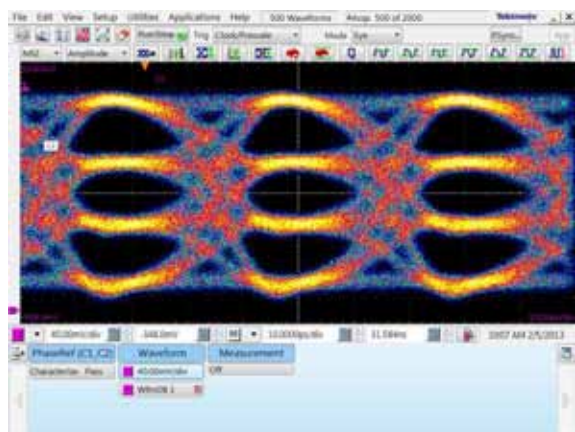


图 3. 32Gb/s PAM-4 信号

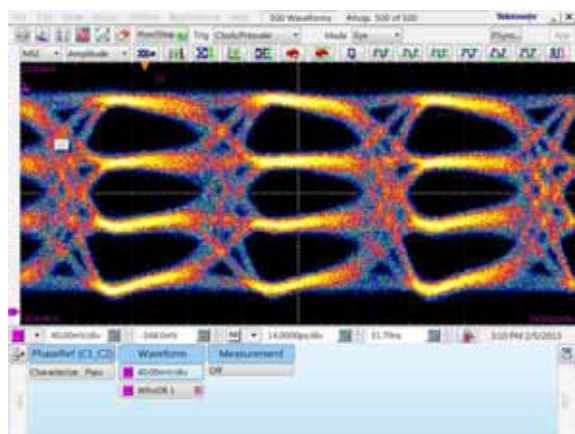


图 4. 25Gb/s PAM4 信号

图 3 和图 4 显示了使用 Model 12072 FIXEDFAST 码型发生器组合 PRBS23 和 PRBS31 码型 (在 LSB 和 MSB 上) 创建的 PAM-4 信号。PAM-4 信号拥有 >50% 的水平垂直眼图睁开程度, 每个电平彼此相对是对称的, 创建拥有完美信号完整度的 PAM4 信号。

PAM-N BER 测量

可以使用 PSPL 误码检测器, 利用用户自定义码型分析 PAM-N 信号。通过控制相位延迟 (水平位置) 和电压采样点 (垂直位置), PSPL 误码检测器能够分析输入眼图的 BER。图 5 显示了使用 PSPL PG 和 ED 进行 BER 分析的单端测试设置。

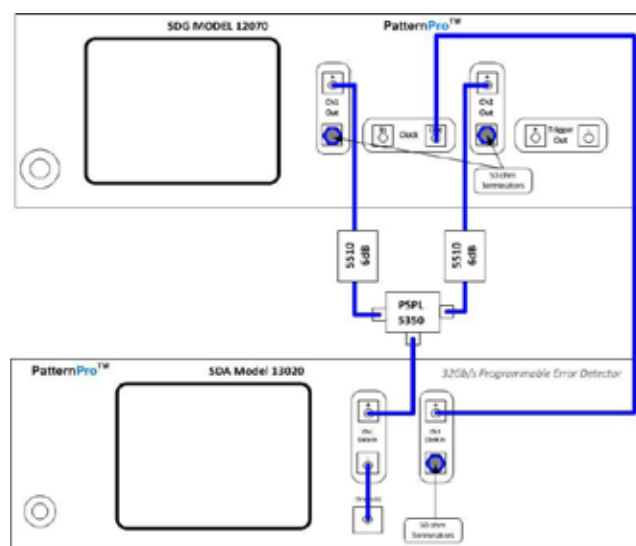


图 5. BER 测试设置

PAM-4 眼图有 4 个电压电平, 得到一个有着上层眼图、中层眼图、下层眼图的眼图。每个“子眼图”的眼图睁开程度和特点都与标准 NRZ 眼图类似。

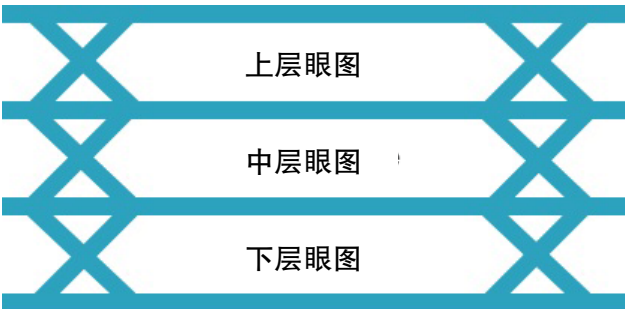


图 6. PAM4 眼图

PAM-N 信号分析

除迅速高效地测量每个 PAM-4 电平的 BER 指标外，还可以使用 PSPL 软件分析工具，对整个 PAM-4 信号执行深入的信号完整性测试。

PSPL 软件 GUI 从误码检测器获得相位延迟、电压和 BER 等数据，执行各类分析。其中一项测试是浴缸曲线，这项测试扫描眼图中的每个 PAM 电平，测量每个数据点的 BER。图 7 显示了代表三个 PAM-4 信号电平的、在 14Gb/s 时测得的三条水平浴缸曲线。

这条浴缸曲线扫描信号整个单位间隔 (UI) 中的相位延迟，绘制测得的 BER 相对于相位延迟图。误码检测器可以以 0.1ps 分辨率扫描延迟，通过测试码型中的每个位，它在数据信号上提供了最准确、最完善的检定功能。

一旦记录了浴缸曲线数据，可以执行分析，全面检定信号质量，特别是系统的抖动。还可以收集高 BER 时的数据集，因为在这种情况下，可以迅速地收集数据。然后可以推断低 BER 时的这些数据，在短测量时间内检定低概率事件。

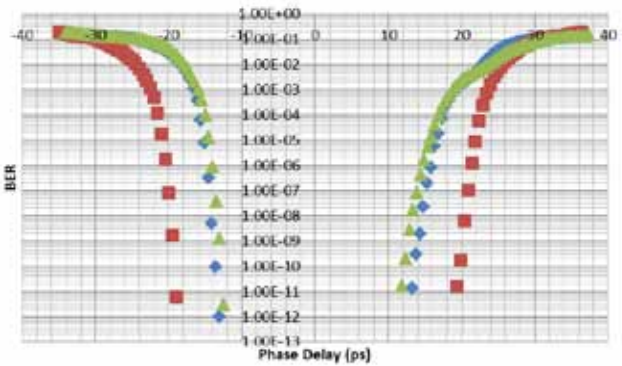


图 7. PAM-4 浴缸曲线

我们通常使用 $1E-12$ 的 BER，测量信号的总抖动 (TJ)。可以推断 $1E-12$ 的数据，可以测量曲线的宽度，得到这个 BER 时有效的眼图张开程度。然后可以从 UI 中减去这个值，得到总抖动。

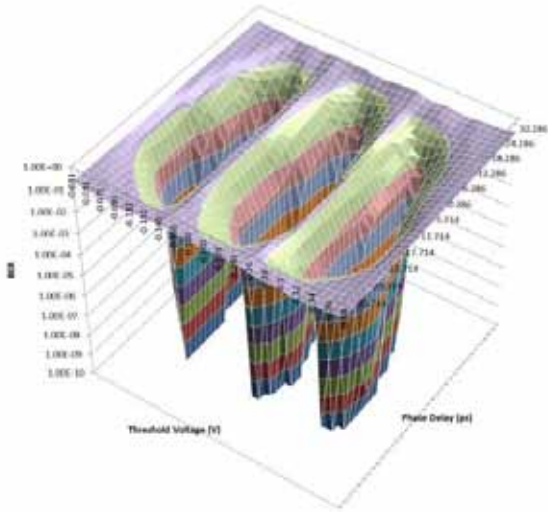


图 8. 14Gb/s PAM-4 轮廓图

可以在 J2 ($BER=2.5E-3$) 和 J9 ($BER=2.5-10$) 上重复这个过程。J2 是有效衡量信号的确定性抖动 (DJ) 的指标，用来测量高概率事件。J9 是衡量随机性抖动 (RJ) 的指标，也是高概率事件。

通过测量每个 PAM 电平在各种 BER 时的抖动，可以以高置信度全面检定整个 PAM 信号。通过 PSPL 软件分析提供的另一个检定工具是轮廓图。可以扫描 PAM-4 信号中的电压采样点，采集轮廓数据（根据上一节描述调节码型、相位延迟和门限）。

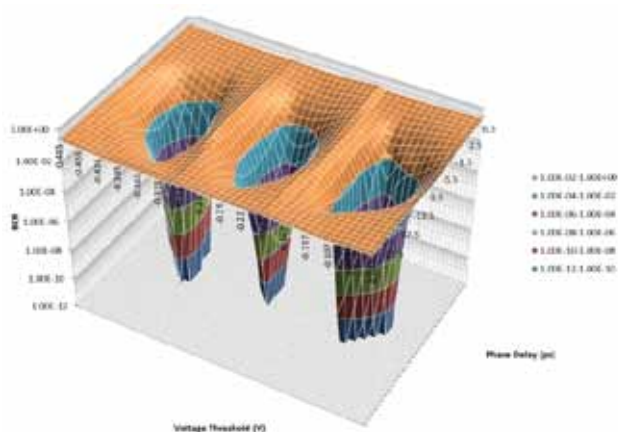


图 9. 25Gb/s PAM-4 轮廓图

除相对于 BER 的相位数据外，还可以使用这个相对于 BER 的电压数据，创建整个 PAM-4 信号的三维图。14Gb/s PAM 轮廓图参见图 8，25Gb/s 轮廓图参见图 9。

总结

PAM-N 高速信号是一种重要的新兴应用，要求以不同于标准 NRZ 信号的方式进行处理。信号参数（抖动、噪声、BER、等等）将要求修订后的方法和定义。此外，必需开发测试设备和方法，解决检定 PAM-N IC、元器件、模块和系统的挑战。

在本文中，Picosecond Pulse Labs 演示了如何使用一套测试设备和程序生成、测量和分析 PAM-4 信号。