

PAM4 信号的误码分析

引言

用户需要具有即时数据访问能力的互连网络，这种不断增长的需求推动着以太网、64G 光纤通道、CEI-56G 以及其他新一代数据中心网络链路向前发展。随着数据速率不断提高，OIF、CEI 和 IEEE 802.3 以太网等新兴数据中心标准正在朝着 PAM4（四电平脉冲幅度调制）多电平信令制式迁移。数据中心网络带宽不断增长，下一个目标瞄准了 400 Gb/s。PAM4 等多电平信令制式是推动 400G 实现的技术。从 NRZ（非归零）过渡到 PAM4 是一种跨越式的变化，而不是从 100G 逐步演进，因此带来了许多新的概念，也给设计提出了许多新的挑战。使用 PAM4 和 NRZ 信号进行高数据速率的传输，无论是在系统设计还是表征方面都有很大的挑战性。本应用指南详细介绍了关于 PAM4 信号生成和分析的技巧，针对的仅仅是误码分析，而不包括 TDECQ。在进行详细介绍之前，我们首先了解一下基础定义。



用户需要具有即时数据访问能力的互连网络，这种不断增长的需求推动着以太网、64G 光纤通道、CEI-56G 以及其他新一代数据中心网络链路向前发展。



基础定义

NRZ 信号：这是一种用于表示 0 和 1 比特的线路编码。正电压代表逻辑 1，等效负电压代表 0。

PAM4 信号：这是一种使用脉冲幅度调制技术的线路编码。PAM4 信号有四个电压电平，每个幅度电平分别对应逻辑比特 00、01、10 和 11。换言之，PAM4 编码的每个符号由 2 个比特组成，它们对应一个电压电平，即幅度。

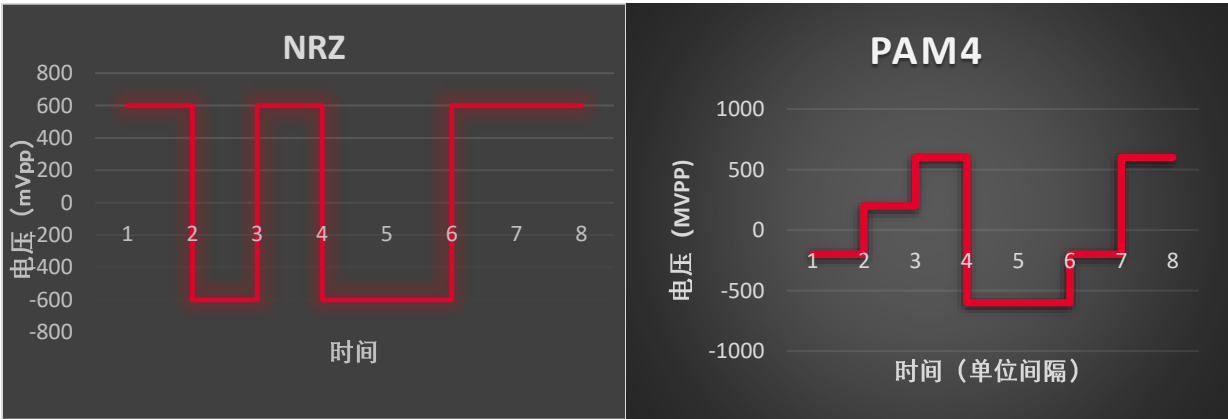


图 1: NRZ 和 PAM4 信号

格雷码：格雷码也称为反射二进制码，是连续符号相差一个二进制比特的一种编码码型。在 PAM4 中，00、01、10 和 11 是分别表示电平 0、1、2 和 3（表 1）的二进制比特序列。对于 0、1、2 和 3 电平，用格雷码表示的相同符号为 00、01、11 和 10。

符号	二进制码	格雷码
0	00	00
1	01	01
2	10	11
3	11	10

表 1: 二进制码和格雷码

PAM4 编码也是使用格雷编码码型创建的，因为这种码型有助于纠正误码。格雷编码遵循 IEEE 和 OIF 标准。

随着比特和符号的引入，有必要提一提每秒比特数和波特率之间的差异。每秒比特数表示的是每秒传输的比特（1 或 0）总数。波特率表示的是每秒发送的符号数。对于 NRZ 信号而言，符号率与比特率相同；波特率和 bps（每秒比特数）也相同。但对于 PAM4 信号而言，两者是不同的。

PAM4 信号的每个符号有 2 个比特。因此，每秒传输的符号数（波特率）是每秒传输的比特数的一半。以 PAM4 信号为例，如果符号率为 28 Gbaud，则表示每秒传输 56 Gb。

对 PAM4 的需求

NRZ 信号在数据速率低于 20-25 Gbaud 的数字通信链路中使用得非常广泛。然而，随着对更高传输带宽的需求与日俱增，传输介质的通道损耗逐渐变成一个大问题。以图 2 所示的短程接口的通道损耗为例，它由 CEI-56G VSR 通道决定。

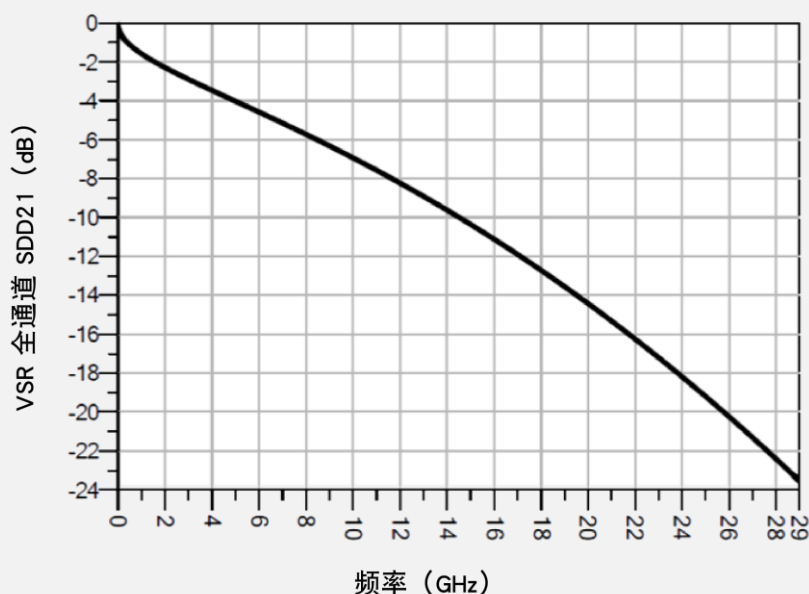


图 1: CEI-56G VSR 通道特性 [1]

随着频率上升，通道的插入损耗也会增加。

这种响应与低通滤波器的特性类似。事实上，通道就相当于低通滤波器，不允许高频通过，从而划出可用通道带宽的界限。

根据香农定律：

$$C = 2 \cdot B \cdot \log_2(M)$$

C = 通道容量或可实现的最大数据速率（单位：bps）。

B = 通道带宽（单位：Hz）。

M = 信号电平数量。

这个公式表明，如果要提高数据速率或通道容量，那么必须增加通道带宽（B）或信号电平数量（M）。

增加可用通道带宽（B）可以通过改进物理系统来实现。但是，这种方案的成本可能非常高，而且可能要完全改变现有系统。如果不改变通道，那么我们可以通过去加重（在发送端）和均衡（在接收端）来实施改变。这种做法可以补偿通道损耗，同时改善通道响应，只不过改善程度不大，还会受到噪声的限制。

要想使通道响应获得更大改善，可以采取增加信号电平数量（M）的方法。

例如，数据速率为 56 Gbps 时，一个 NRZ（M = 2）信号所需的带宽为 28 GHz，而 PAM4（M = 4）信号仅需要 14 GHz，并且在这个频率范围内，衰减也较小。在带宽不变的前提下，这意味着数据速率可以通过增加 M 来提高。此外，您可以引入去加重和均衡来补偿损耗并提高信号质量。

PAM4 误码分析

串行数据链路的完整性通常用比特误码率（BER）来表示。请注意，这里用到的术语是“比率”而不是“比例”。它测量的是单位时间内的比特误码数。在实际系统中，大多数比特误码是由随机噪声造成的，它们随机发生，而不是呈现均匀分布率 [2]。

采用判决反馈均衡器（DFE）的系统可能会产生猝发误码，它们的分布不是随机的。

BER 是将误码比特数与发送的比特数对比得出的一个估计值。为了表征实际系统中比特误码的随机性，更便捷的方法是将 BER 理解为接收机输出端的比特差错率，这是一种统计测量。BER 衡量的是接收机的质量，也因为标准联盟定义了 BER 的一致性要求，所以 BER 测量实际上对于表征测试非常重要。只分析关于 0 或 1 的特定误码有助于诊断接收机或链路中其他部分的问题。

由于 BER 测量是一个统计过程，因此只有当被测比特数接近无穷大时，测得的 BER 才会接近实际 BER。万幸的是，我们可以通过先预定义一个阈值（即目标 BER）来执行 BER 测试。达到预定阈值（即目标 BER）所需的比特数取决于所需的置信度。置信度是利用指定的 BER（即目标 BER）确定系统真实 BER 的概率。置信度不会达到 100%，因为这将需要无穷大的比特数量，这根本是无法测量的。对于大多数应用而言，通常 95% 的置信度即已足够。置信度不同，所需的测量时间也不同。详细说明请参阅本[指南中关于如何测量 BER 的部分](#)。

比特差错率

比特差错率（BER）是误码比特数与发送的比特总数的比值。用数学方式来表达的话，BER 就是

$$\text{BER} = \frac{\text{误码比特数}}{\text{发送的比特总数}}$$

比特误码率测试仪（BERT）通常通过下式得出 BER 测量值：

$$x \times 10^{-y}$$

$x \in \mathbb{R}$ （有理数集）

$y \in \mathbb{N}$ （自然数集）

例如：一个 BER 为 5.6×10^{-6} ，它表示

在 1000 万个比特中有 56 个误码比特。有时候我们会用字母“E”来代替 10 的幂，因此，上面的公式现在变成了： $5.6\text{E}-6$ 。

符号差错率 (SER)

SER 也是一种统计测量，它表示的是误码的符号数量与传输的符号总数之间的比率。这种测量与 BER 不同，因为 BER 指示的是比特误码方面的性能，而 SER 指示的则是符号误码方面的性能。

$$\text{SER} = \frac{\text{误码符号数}}{\text{发送的符号总数}}$$

在不同的数字调制类型中，比特和符号的定义也不一样。例如，如果是 NRZ 信号的话，比特和符号是相同的。因此，BER 和 SER 概念相同。但如果是 NRZ 以外的其他数字调制方案，那么 BER 和 SER 就是不同的概念。

SER 在 PAM4 环境中的重要性

在本应用指南中，术语 SER 对应的是 PAM4 信令，不得与 IEEE 标准中前向纠错 (FEC) 规定的 SER 要求相混淆。

PAM4 中的每个符号代表 2 个比特。但是当发生误码时，一个符号误码可能是单比特误码或双比特误码。

根据误码的情况，BER 和 SER 可能是相同的，也可能 BER 是 SER 的一半（此时符号误码为单比特误码）。

生成 PAM4 的常用方法还包括使用两个二进制加权 NRZ 流，其中需要使用功率组合器对它们进行组合来生成 PAM4 信号（下文中探讨）。然而，在这种方法中，其中一个 NRZ 发射机的问题（如压摆率、不正确的电压电平和偏移）可能导致误码只出现在 PAM4 输出中的特定跳变（符号误码）上。通过对特定跳变类型执行误码分析，可以对发生这些情况的原因进行诊断。

在表征 PAM4 系统时，您必须全面了解 BER 和 SER，因为 SER 对 PAM4 信号的表征起着至关重要的作用。由于 PAM4 有四个符号，因此可能需要进行总共五项 SER 测量，其中四个是单项的 SER 测量，另一个是上述的总体 SER 测量。如果一个 PAM4 符号出现误码，那么必须知道是哪个符号出现了误码（0、1、2 还是 3）。根据这些信息，可以计算出符号 0/1/2/3 的差错率。

了解了 SER 之后，用户可以识别哪个 PAM4 符号出现误码，或是特定符号出现误码的频次。这个详细的 SER 分析有助于实现 PAM4 系统的完整表征。总体 PAM4 的 SER 和单个 PAM4 符号的 SER 可以用下式计算：

$$\text{SER (总体)} = \frac{\text{误码符号总数}}{\text{发送的符号总数}}$$

$$\text{符号 0/1/2/3 差错率} = \frac{\text{误码 0/1/2/3 总数}}{\text{发送的 0/1/2/3 总数}}$$

BERT 系统

为了查看 BER 和 SER，我们使用了比特误码率测试（BERT）系统。BERT 系统由码型发生器（PG）、误码检测器（ED）和时钟组成。PG 生成一个已知的比特或符号码型，该码型经过被测器件并环回到 ED。ED 将收到的码型与预期的码型进行比较，从而计算出 BER。图 3 显示了使用 BERT 的基本测试配置。由于发送给接收机输入的测试数据会发生损坏，所以环回路径必须干净，这意味着被测器件必须有一个合适的发射机用于环回，同时连接 BERT ED 的走线或电缆连接必须要短。

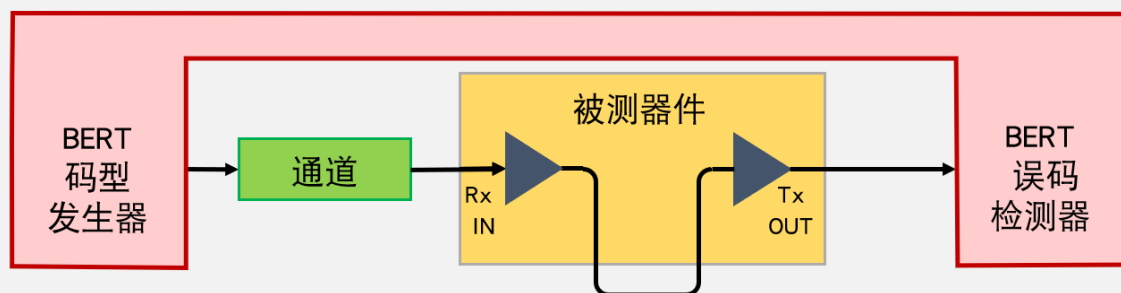


图 3：使用 BERT 的基本测试配置

BERT 的通用属性

- 以测试信号的全数据速率运行。
- 所有数据测试实时完成。
- 连续进行测试。
- 误码检测器不是采样系统。它以数据速率实时计算传输比特和误码比特的数量，而示波器则是采集数据并加以处理。
- 如需验证较低的 BER 目标（如 $BER < 10^{-12}$ ），它非常有用。
- PG 输出和 ED 输入均为电气参数：外部仪器级 E/O，光学模块的测试需要用到配有调制器和 O/E 转换器的可调激光源。
- PG 具有用户控制的误码注入功能：
 - 通常为手动（单个误码），也可设置为高 BER（如 10^2 到 10^{-6} ）。
 - 可用于验证环回配置，或检查被测器件的内部误码计数器

生成 PAM4 信号

有两种方法可以生成 PAM4 信号。第一种方法是使用两个 NRZ 码型信号来生成 PAM4 信号。第二种方法则是直接生成 PAM4 码型。下面我们分别对这两种方法展开探讨。

使用两个 NRZ 通道生成 PAM4 信号

生成一个四电平 PAM4 信号需要两个具有不同幅度的 NRZ 码型。这两个 NRZ 码型充当最低有效位 (LSB) 和最高有效位 (MSB) 码型，合在一起形成 PAM4 信号。每个 NRZ 码型分别对应逻辑状态 0 或 1。假设有两个 NRZ 流，逻辑状态是 00、01、10 或 11。

例如，在图 4 中，MSB 和 LSB NRZ 码型使用不同的幅度表示：-400 mVpp 至 400 mVpp MSB 和 -200 mVpp 至 200 mVpp LSB。

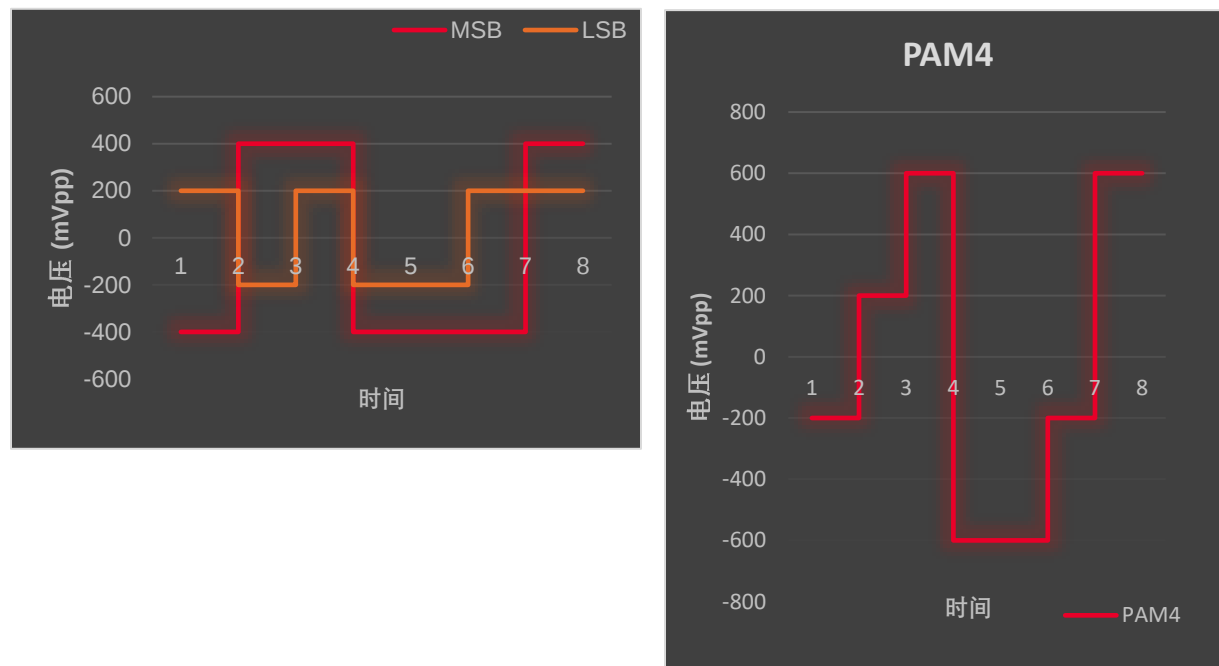


图 4：使用两个 NRZ 通道生成 PAM4 信号

图 4 中提到的值为示例值。如图 5 所示，在 LSB NRZ 通道中添加一个 6 dB 的衰减器可以实现不同的幅度。添加一个时延（相当于输出中表示 MSB 的衰减路径，使用射频功率分配器将这两个信号相加。在实际操作中经常使用两个衰减器，一个为 10 dB，另一个为 3 dB。传输线失配会造成反射效应，导致 PAM4 系统出现问题，而这两条路径上的衰减可以减少这种失配。由于 9 dB 衰减器不常见，因此 LSB 输出中使用的是 10 dB 衰减器。使用幅度控件校正码型发生器输出中的 1 dB 误差 [3]。图 5 显示了简化框图。

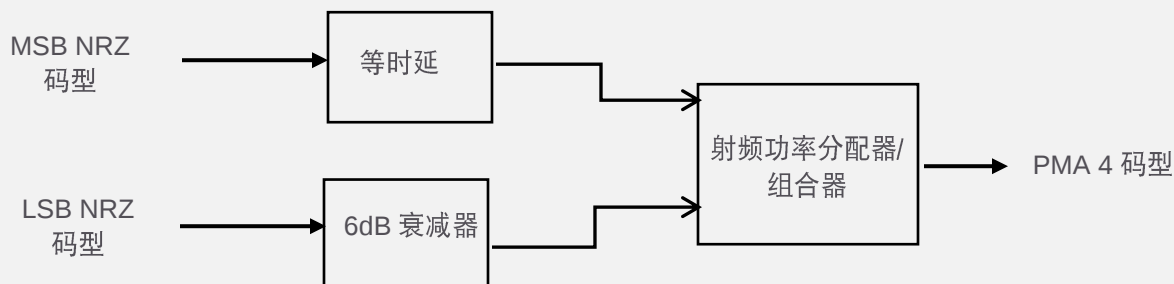


图 5：使用两个 NRZ 通道生成 PAM4 信号

虽然这种方式看起来简单明了，但它存在一定的局限性。

使用两个 NRZ 通道生成 PAM4 信号的挑战

- 灵活性下降：单个眼图的高度不能独立变化。要改变眼图的高度，两个 NRZ 通道的幅度都会发生变化。然而，这对于单独调整三个眼图的高度没有帮助。
- 偏移：确保组合的 NRZ 通道彼此之间的相位完全对齐并与时钟完全对齐。各 NRZ 相位之间的微小差异会导致眼图张开度缩小，直接影响到质量。随着抖动的注入，这个问题越发突出。
- 去加重：通过引入去加重来补偿通道损耗，操作起来比较复杂。需要在每个 NRZ 通道上应用去加重，才能在输出端得到去加重结果。
- 外部附件会影响信号质量，使得可用的幅度范围变小。

采用 PAM4 本地生成方法可以消除这些问题，而且它除了解决灵活性下降和偏移问题之外，还可以避免使用外部附件。但是，使用两个 NRZ 通道生成 PAM4 时，为了消除通道路径上的不规则特性，需要用到一个衰减器和一个功率分配器。

Keysight M8040A BERT PG 使用 PAM4 本地生成技术生成具有不同电平的四电平 PAM4 信号。图 6 显示的就是该信号在 DCA-M 采样示波器上的眼图。

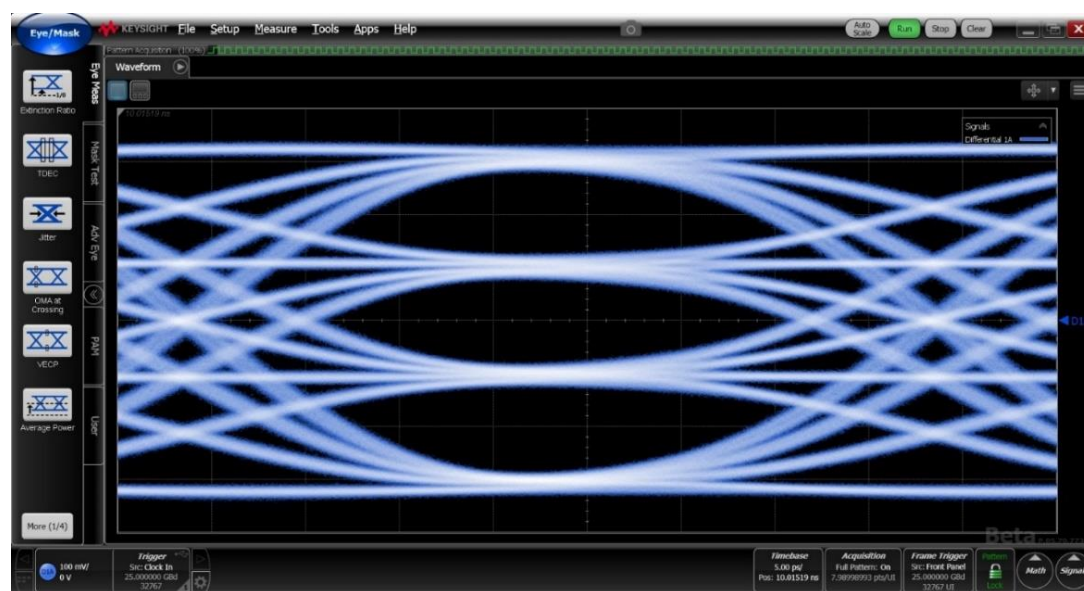


图 6：在 DCA 采样示波器上看到的差分 PAM4 信号。

误码检测方法

ED 接收码型并将其与预期码型进行比较，从而计算出 BER。预期码型可以由算法生成（如 PRBS），也可以从存储器中获得。要建立有效的 BER 测量，ED 需要知道数据速率，以便与进入的码型同步并调整采样时延点。此外，ED 还需要知道幅度电平，通过采样阈值做出准确的决策。

ED 的质量可通过以下要素确定：

- 实时误码分析结果。
- 它可以支持的各种预期码型：PRBS、SPQR、PRBS31Q 或是存储器中保存的码型。
- 支持的数据速率。
- 支持的输入幅度电平；ED 的灵敏度。
- 全采样，即对每个单位间隔（UI）进行采样。
- 真实的 BER 测量结果；与预期码型的比较。
- 固有抖动。
- 均衡；眼图打开能力。
- 检测 PAM4 的能力。
- 测量能力，如抖动容限、BERT 扫描、总体抖动测量，以及 Q 因子（它以高精度移动阈值电平）。
- 参数扫描。

ED 的工作方式：

- BERT 系统中有一个 ED，但它不是采样系统，而是以规定的速率对比特和误码比特进行实时采样。它的预期码型（如 PRBS 码型）可以预先保存在存储器中或是通过算法生成。通过将预期码型与接收的码型进行比较，它能够实时计算 BER。

NRZ ED 的操作

如果输入信号是 NRZ 码型，单个阈值电压足以检测输入信号。阈值电压设置为 0 V，这是两个 NRZ 跳变时刻的中点。如果采样电压高于阈值，它将被解释为逻辑 1；如果采样电压低于阈值，它将被解释为逻辑 0。

采样阈值必须位于 NRZ 眼图的中点，因此在采样时刻确定输入信号电平时不会产生混淆。取决于采样阈值和采样点时延（采样时刻或时延时刻），可以确定 NRZ 是 1 或是 0。将输入码型与预期码型进行比较，计算出 BER。BER 测量实时进行，因为在这个时刻有预期的比特可用于比较。

图 7 显示了 NRZ ED 的质量。质量取决于它的分辨率和调整采样点的精度，以及找到眼图打开中心的阈值电平。

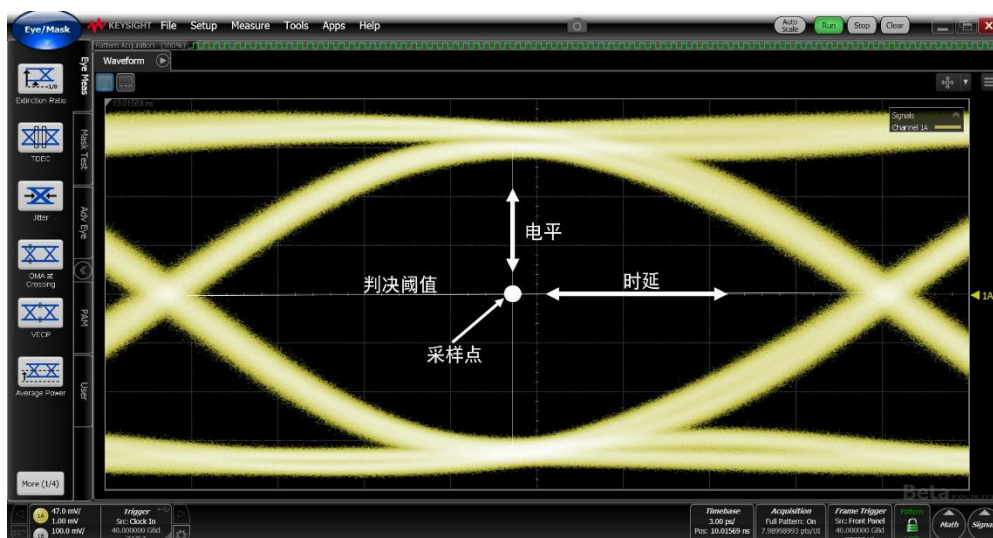


图 7: NRZ ED 采样点。

NRZ 信号由支持上述属性的 NRZ ED 实时进行完全表征。我们来看看如何使用 ED 分析 PAM4 信号。

PAM4 误码分析

使用 NRZ ED 分析 PAM4

使用 NRZ ED 检测 PAM4 BER 有几种不同的方法。在这些方法中，有三种方法比较突出。

1. 使用单通道 NRZ ED 时，每个眼图的采样点都不一样。计算单个眼图的 BER 并使用该信息获得 PAM4 信号。这种方法只使用一个 NRZ ED。这种方法的主要缺点是一部分数据缺失，只能看到一个眼图。
2. PAM4 信号通过编码到两个 NRZ 通道中来去多路复用。利用两个通道的 BER 来计算输入 PAM4 信号的总体 BER，如图 8 所示。



图8: PAM4 解码成两个 NRZ 流

3. 输入的 PAM4 信号由两个功率分配器分成三个信号，每个信号均与 NRZ ED 连接。同时为每个眼图生成 PAM4 BER。但是，这不是 SER。这种方法的优点是眼图水平偏移，采样点时延不同。但是，这种方法有一个缺点，即需要额外使用功率分配器来降低信号幅度。

NRZ ED 挑战

这些使用 NRZ ED 的方法都存在相应的挑战：

- 在第二种方法中，如果时钟信号有抖动，或者被测器件有时钟恢复功能能够重新计时，那么去多路复用器的时钟就会成为问题。
- 在第三种方法中，当使用功率分配器分割 PAM4 信号时，信号会减小到最小值，导致 SNR 变低。PAM4 信号降低到一个很低的值，甚至可能达到误码检测器的检测极限（灵敏度），从而有可能被错误地解释，将 1 解释为 0。
- 在信号路径中添加任何元器件都会带来损耗，增加时延和信号失真。
- 双重计数问题：这个问题关系到符号误码率。误码检测器使用三个独立限幅器来监测每个眼图，容易受到这个问题的影响。例如，如果 PAM4 符号的期望值为 0（二进制为 00），并且模拟输入信号在 2 到 3 之间，那么监测下方和中间眼图的限幅器都会输出高信号。如果不使用额外的逻辑来屏蔽第二个限幅器的输出，那么这一个坏符号会计数为两个符号误码，如图 9 所示。

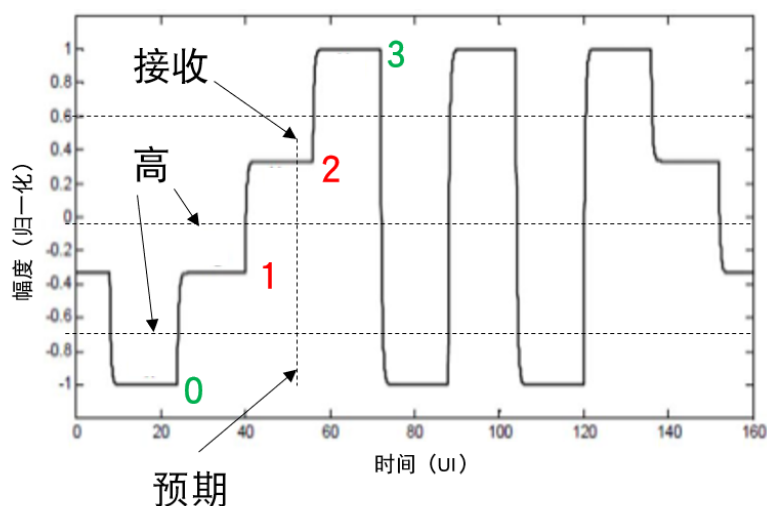


图 9：重复计数问题

误码检测系统需要额外的逻辑，由该逻辑使用屏蔽码防止重复计数。屏蔽码与预期码型一起存储在码型存储器中。只有全部三个 ED 通道都进行了比特同步，屏蔽才有效。码型编辑器中的软件提取对码型进行编码，生成正确的屏蔽码。取决于预期符号代码的值，ED 中的特定逻辑会屏蔽多个限幅器的输出。

就上例而言，预期值为 0。监测中间和上方眼图的限幅器的输出将被屏蔽，只使用监测下方眼图的限幅器为误码计数器提供输入。这种方法是可行的，但只能按照存储在码型中的屏蔽码信息，使用存储器中保存的码型进行操作。

它不适用于长 PRBS 码型，如最常用于 400G 级别标准接收机一致性测试的 PRBS31Q 码型。

直接 PAM4 分析

为了克服上述挑战，可以实施实时和直接的 PAM4 分析。这需要在三个信号眼图中同时对输入的 PAM4 信号的全部三个阈值进行采样。

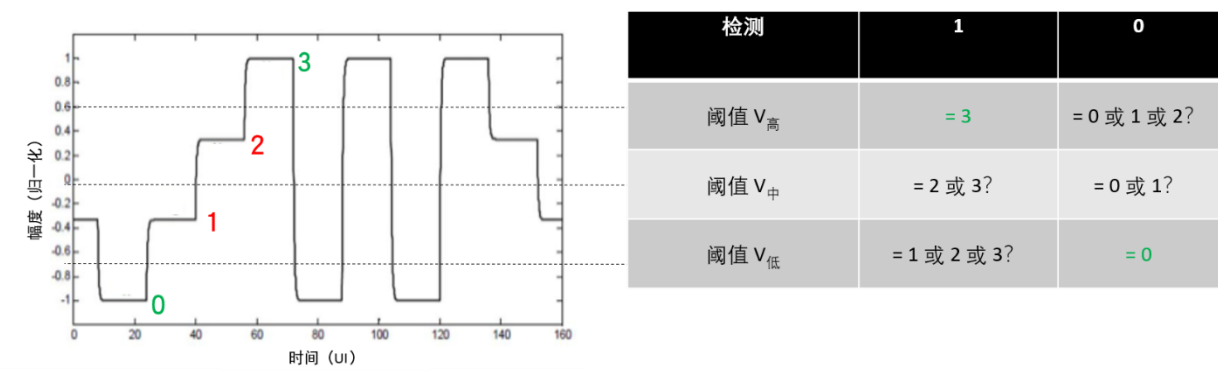


图 10: PAM4 电压阈值

图 10 显示了 PAM4 信号及其阈值电压。在除了跳变时刻之外的任何其他时刻，输入的 PAM4 序列代表电压电平 0、1、2 或 3。通过对三个电压阈值同时采样，各个电压阈值的逻辑 1 或逻辑 0 状态会与 PAM4 符号和相应的格雷码对应，然后可以使用查找表成功地实时解码。表 2 对操作进行了总结。

PAM4 电平	V 高	V 中	V 低	格雷码	
3	1	1	1	1	0
2	0	1	1	1	1
1	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0

表 2: PAM4 解码表

例如：如果采样的阈值电压为： $V_{\text{高}}=0$ ， $V_{\text{中}}=1$ ， $V_{\text{低}}=1$ ，则输入符号为 PAM4 电平 2 符号。

直接的 PAM4 符号接收操作至此完成。将其与预期的 PAM4 符号进行比较，计算出 BER 和 SER 测量值。

您也可以检测不同眼高的 PAM4 信号。限幅器（采样器）阈值根据预期的 PAM4 信号来设置。

直接 PAM4 检测的优势

尽管可以采用不同的方法来测量 PAM4 信号的 BER 或 SER，但是相比之下直接 PAM4 检测具有下列优势：

- 实时 PAM4 分析：直接 PAM4 检测是实时进行的，不涉及后期处理。这一优势非常重要，因为它使您可以测量超出捕获存储器深度的长 PRBS 码型（如 QPRBS31），并且通过实时更新 SER 和 BER 计数器，将低目标 BER（ 10^{-12} 或更少）的测量时间控制到最短。
- 使用查找表可以避免重复计数，并且无需使用模板，也避免了对存储器中保存的码型的限制。
- 支持标准推荐的格雷编码码型。
- 详细的误码分析：可以对接收的符号进行详细的误码分析，包括符号 0、1、2 和 3 的单独符号差错率测量。这一功能至关重要，只有实时对照 PAM4 预期码型进行比较，才能进行详细的 SER 分析。详细分析是一种功能强大的故障诊断工具，可以帮助我们分析误码的可能原因。
- 检测具有不同眼高的眼图：此功能使用户能够根据自己的要求检测具有不同眼高的 PAM4 信号。您可以根据预期的 PAM4 信号设置采样点阈值，实现这个检测目的。
- 由于只有一个 ED，因此无需进行偏移校正。

使用 M8040A 进行差错率分析

Keysight M8040A 是一台高度综合的 BERT，可用于物理层表征和一致性测试。它支持 PAM4 和 NRZ 信号，以及最高 64 Gbaud（相当于 128 Gbit/s）的符号率，因而适用于新兴 400/200 GbE 和 CEI-56G 标准的测试。M8040A BERT 具备真正的误码分析功能，能够提供精确且可重复的结果，优化器件的性能裕量。

它由 M8045A 码型发生器模块和 M8046A 误码检测器模块组成。它可以执行非常广泛的测量，加速进行差错率分析。M8040A 高性能 BERT 的主要特点如下：

- 可对 NRZ 和 PAM4 信号进行真正和实时的分析
- 高度整合抖动、去加重和均衡功能支持多种码型，如通过算法生成的 PRBS、QPRBS 码型，以及在存储器中预存的码型，并包括具有环路和误码注入功能的码型序列发生器
- 可扩展、可升级
- M8070A 系统软件能够控制 M8040A BERT。图 11 显示了具有差错率测量功能的 M8070A 用户界面

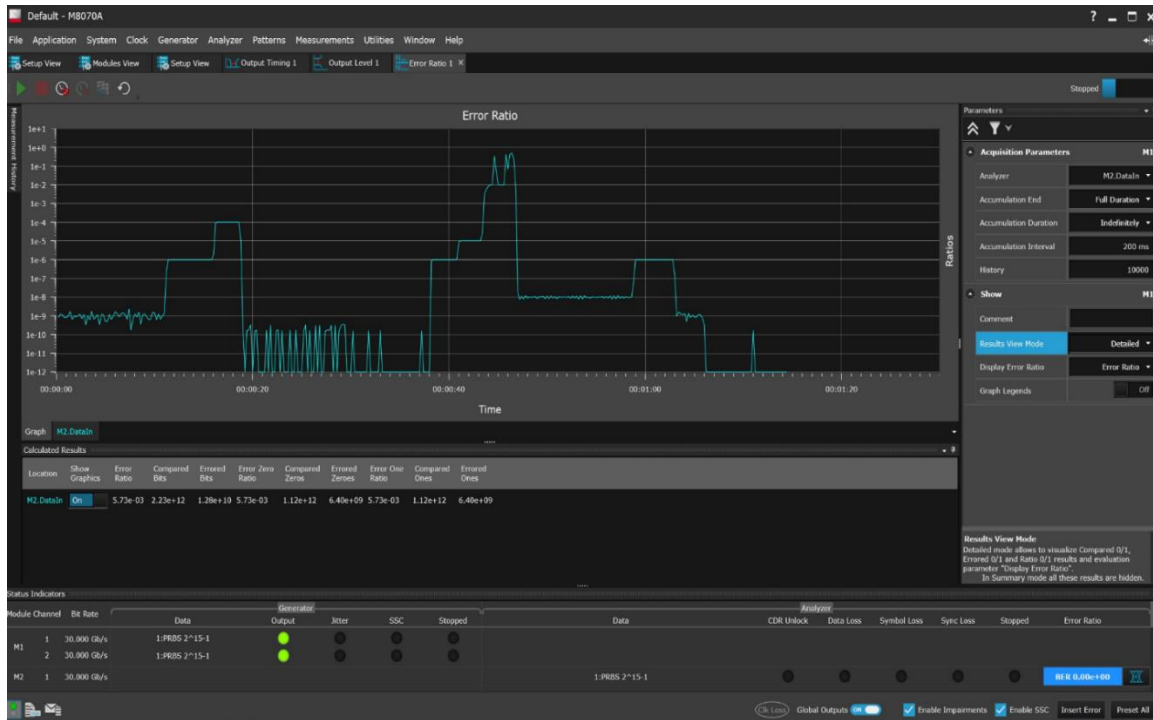


图 11: M8070A 详细的 BER 测试界面

M8040 介绍

Keysight M8040A 高性能 BERT 的真正优势体现在 PAM4 的生成和分析上。M8040A 提供针对 PAM4 信号的详细 BER 和 SER 分析。M8040A 高性能 BERT 包括两个主要部件，分别是 M8045A PG 和 M8046A ED。

M8045A PG 提供高达 64 Gbaud 的数据速率，并支持 NRZ 和 PAM4 线路代码。它还支持众多码型，如 PRBS、QPRBS、SSPR 以及存储器预存的码型。M8045A PG 可与 M8057A 远程前端模块连接。远程前端可以减少所需的电缆长度，并让 PG 输出尽量靠近被测器件。M8045A PG 的主要优点是 PAM4 线性度十分出色，因此可以通过 M8070A 软件界面调节各个眼图高度，并根据各自的要求生成 PAM4 眼图。这种线性度优势使得 M8045A PG 独具特色。

M8046A ED 提供对 PAM4 和 NRZ 信号的实时分析。

误码分析仪模块 M8046A 的主要功能包括：

- 每个分析仪模块配有一个差分通道
- PAM4 信号的符号率高达 30 Gbaud；NRZ 信号的符号率高达 64 Gb/s
- PAM4 本地解码
- 内置均衡功能，可在分析仪输入端重新打开闭合的眼图
- 可选择的预期码型（如 QPRBS31）、码型存储器、码型排序、模板、格雷编码和自定义 PAM4 符号映射
- PAM4 和 NRZ 信号的时钟恢复
- 被测器件控制界面允许从 M8070A 软件访问内置误码计数器

图 3 显示了配有 M8045A PG、M8046A ED 和 M8057A 远程前端的 M8040A 高性能 BERT 系统。



图 12: 配有 M8045A PG、M8046A ED 和 M8057A 远程前端的 M8040A BERT 系统

使用 M8040A BERT 进行 PAM4 分析

为了有效地表征 PAM4 系统，进行直接的 PAM4 检测很重要。如上所述，对 PAM4 而言，SER 是一个重要的测量值。M8046A ED 让您能够完全实时地表征收到的 PAM4 信号。M8040A ED 通过对全部三个阈值同时进行直接 PAM4 检测采样，可以实时分析输入的 PAM4 信号。它使用一个采样时延点，一次性对全部三个阈值进行采样。直接 PAM4 检测的所有优点同样适用于 M8040A 高性能 BERT。M8040A 提供 BER 和 SER 测量，还提供详细的误码分析，如全部五种 PAM4 SER 测量（其中四种适用于单独的 PAM4 符号，另外一种适用于考虑全部符号的总体 SER 测量）；从符号 0 到符号 3 的每个符号出现的误码数，比较的比特总数和比较的符号总数。M8040A 能够提供 PAM4 信号的所有可能的 BER 和 SER 测量值。

以 BER 为例，它能够显示总体 BER 系统的测量结果，包括比较比特总数、发送比特、误码 0、误码 1、0 的 BER 和 1 的 BER。图 3 为 M8070A 软件界面上呈现的 PAM4 误码分析详细结果。

Symbol Error Ratio	Compared Symbols	Errored Symbols	Error Ratio	Compared Bits	Errored Bits	Symbol 0 Error Ratio	Symbol 0 Compared Symbols	Symbol 0 Errored Symbols	Symbol 1 Error Ratio	Symbol 1 Compared Symbols	Symbol 1 Errored Symbols
0.00e+00	1.15e+11	0.00e+00	0.00e+00	2.30e+11	0.00e+00	0.00e+00	2.88e+10	0.00e+00	0.00e+00	2.88e+10	0.00e+00
Symbol 2 Error Ratio	Symbol 2 Compared Symbols	Symbol 2 Errored Symbols	Symbol 3 Error Ratio	Symbol 3 Compared Symbols	Symbol 3 Errored Symbols	Error Zero Ratio	Compared Zeros	Errored Zeroes	Error One Ratio	Compared Ones	Errored Ones
0.00e+00	2.88e+10	0.00e+00	0.00e+00	2.88e+10	0.00e+00	0.00e+00	1.15e+11	0.00e+00	0.00e+00	1.15e+11	0.00e+00

图 13: M8070A 软件界面上呈现的 PAM4 测量结果。

总结

- PAM4 是一种高效利用带宽传输串行数据的方法，所需的通道带宽仅为 NRZ 所需带宽的一半。
- 在表征、设计和调试使用 PAM4 信号的链路时，需要对 PAM4 系统进行表征，BER 和 SER 是两个至关重要的参数。对于 PAM4 信号，可能需要进行总共五种 SER 测量，其中四种是单独符号的测量，剩下一种是总体 SER 测量。
- PAM4 信号可以通过组合两个 NRZ 信号来生成，也可以直接生成。组合两个 NRZ 信号限值能够让您独立设置每个电平，或是引入去加重，但这种做法需要时延/偏移校准。直接生成方法则没有这些限制。
- 典型的 BERT 系统配有 ED，它会以规定的速率实时对所有比特和误码比特进行计数。
- 使用 NRZ ED 执行 PAM 信号误码分析有一定的局限性，包括需要增加硬件，同时不能进行实时分析。
- 本地 PAM4 生成是生成 PAM4 信号的最高效方式，同时没有任何限制。它还支持格雷编码，可以避免重复计数的问题。
- Keysight M8040A 高性能 BERT 采用了直接 PAM4 生成和检测方法，可以充分发挥上面所列的各种优势。它不仅能够提供关于 BER 和 SER 的详细误码分析（包括单度符号值的 SER），还支持长 PRBS 码型以及存储器预存的码型。即使是对于长 PRBS 231-1 或 QPRBS31 码型，它也能够测量最低 10⁻¹⁵ 的差错率。这种详细的差错率分析有助于用户表征数字系统并进行故障诊断。

参考文献

[1] 实施协议：OIF-CEI-04.0，CEI-56G-VSR 第 16 条，第 4.0 版，2017 年 12 月 29 日，第 335 页

[2] Justin Redd，《破解 BER 测试之谜》，www.lightwaveonline.com，2004 年 9 月 1 日，<http://www.lightwaveonline.com/articles/print/volume-21/issue-9/technology/explaining-those-ber-testing-mysteries-53908512.html>

[3] 5992-0527CHCN —《PAM4 设计挑战及其对测试的影响》

[4] 《M8040A 高性能 BERT 64 Gbaud 技术资料》，第 1.9 版，5992-1525CHCN

[5] 《使用 M8070A 控制的实时示波器进行 BER 测量》，5992-2676CHCN

如欲了解更多信息，请访问：www.keysight.com

如需了解关于是德科技产品、应用和服务的更多信息，请与是德科技联系。

如需完整的联系方式，请访问：www.keysight.com/find/contactus

