

巧用 Bertscope 进行芯片 / 系统的接收端容限测试和调试分析

应用指南



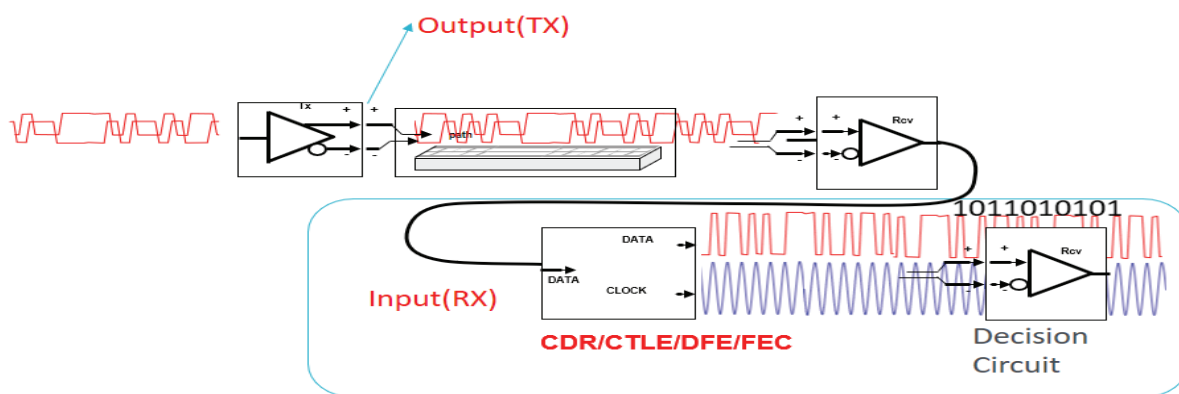


图 1. 高速串行链路的基本架构

在用户进行系统或者芯片测试的时候，一般主要验证几个方面的性能和可靠性，包括系统发送端的信号质量，链路的损耗 / 串扰，接收端的容限。如图 1，一个链路系统的基本架构。通常在发送端会使用 FFE 来补偿链路的损耗，接收端会采用 DFE/FFE 等方法来进行均衡，一些比较高速率的标准如 PCIE 4.0/5.0, SAS4 等还会采用 FEC 来进行纠错，当然接收端还需要 CDR 来从串行信号里面进行时钟恢复得到同步时钟来对信号进行采样。

对于系统 / 芯片的接收端测试，会有几个方面的挑战，第一是 loopback（环回）模式的 Training，第二是 link（链路）training。只有这两个部分的协商正确完成的前提下，才能保证测试的顺利完成。不管是 loopback training 还是 link training，都要求 Bert 具备和被测设备自动的协商功能，通过基于协议的握手和双向沟通去使被测设备进入环回模式和均衡的自适应。

如图 2，支持各种协议的系统 / 芯片在上电后会通过与对端设备的多次协商进入不同的子状态机，在接收端容限测试的时候需要使被测芯片的状态机从 Config 或者 Recovery 状态进入 loopback 的子状态，这个实现需要 Bert 模拟一个真正的对端设备去发送符合该协议的码型序列去 training 被测设备。同时 Bert 也要

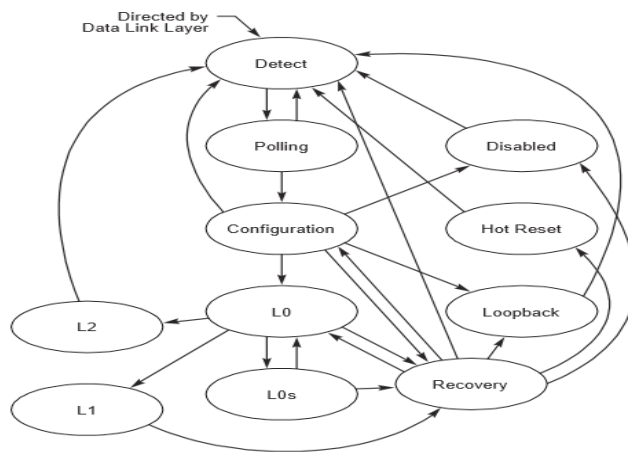


图 2. PCIe/USB3.1 等协议标准的各种状态机。

能实时的解析被测设备的协议系列以确认其是否被成功 training，否则需要重新修改设置来发送 training 的码型序列。如图 3，泰克的 BSX 系列误码仪最高可以支持单通道 32Gbps 的实时数据发送和接收，可以直接产生和接收并同时解析协议的数据包，而不像其他厂商只能在较低速的时候实现数据直接产生和接收，而高速标准则需要通过两个通道合并成单通道进行发送，并在接收端则将单通道再分解成两个通道进行接收。这样会导致高速标准的时候不能实现真正基于协议的协商。

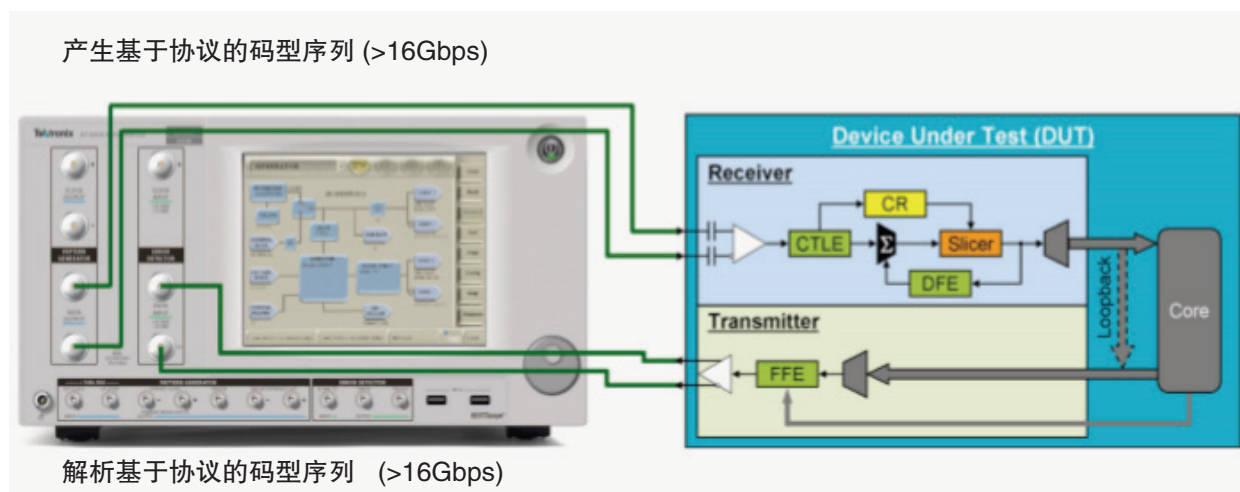


图 3. BSX 系列误码仪支持单通道的高速协议数据的发送和接收解析

如图 3，除了 loopback training 以外，另一个重要的步骤是 link training(链路协商)，需要 Bert 和 DUT 进行 FFE/DFE 的实时协商来补偿链路的损耗，以达到最低的误码率。在 USB3.1/PCIe 协议中发送端会有多个级别的 FFE 来灵活对信号发送端进行均衡补偿，在接收端也会有 CTLE 和 DFE 多级组合来进行补偿。(详细的链路协商步骤细节可以参考泰克的相关应用文章 - 《克服第 4 代 I/O 应用中的接收机测试挑战》)。这个链路协商同样需要 Bert 能够在一定程度上去模拟一个真实设备和被测设备进行沟通，解析并响应被测设备的要求去调节信号输出的 FFE 参数，并根据误码率来请求被测设备调节其输出的 FFE 参数和接收端的 CTLE/DFE 参数，以达到最佳的误码率。同样这个时候也需要 BERT 具备单通道直接输出和接收并解析基于协议的码型序列达到与被测设备的实时协商。

除了进行一致性测试以外，对于芯片的验证过程中还经常会进行问题定位，当出现误码的时候，大部分工程师会去搬一台示波器来使用示波器观察信号波形来进行抖动和眼图分析来进行调试，这时候得把信号重

新连接到示波器来进行信号的捕获，而且并不容易把误码和示波器捕获的波形直接关联起来找到误码的原因。往往你旁边并没有一台高带宽示波器供你随意使用。由于泰克的 BSX 系列误码仪能够精确的统计误码的个数和误码出现的时间，所以能够实现精准的误码定位。这个强大的误码定位功能和抖动眼图分析功能可以供你进行系统和芯片级别的调试，下面会举一些真实用户使用 Bert 进行调试分析的实例来说明。

案例一：使用误码仪 Error Free interval 功能来验证芯片的自适应时间。

客户在做芯片 IP 的选型验证，该芯片支持的速率为 20.62Gbps, 不同 IP 厂商会给出不同的芯片自适应时间，一般为几百微妙到几百毫秒不等，如前面所述，有一些芯片的关键参数会影响到这个自适应时间，如芯片的 FFE/DFE 的均衡自适应时间，CDR 的锁定时间，误码判决电路的采样点的自动调节等。客户的需求是测试从芯片开始初始化那一刻直至误码率低至 10^{-12} 左右的时间。

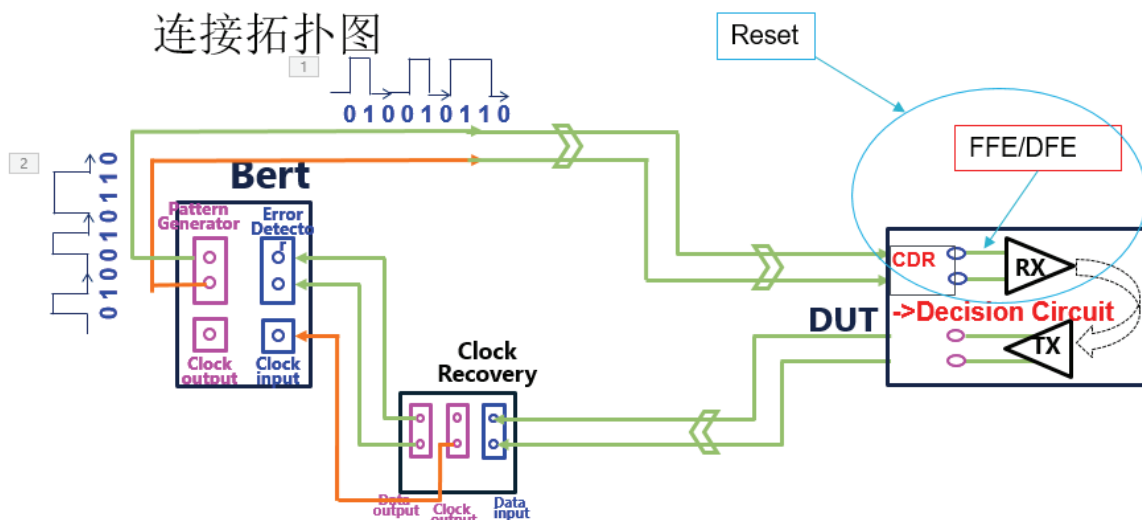


图 4.

先按照上面图 4 的连接图连接好，将被测芯片设置为环回模式，设置 Bertscope 的 PG 输出为被测速率，码型设置为 PRBS31，确认 CDR 模块可以正确锁定，Error Detector 能够正确的 Sync 码型，并且测试没有误码。将 Bert 的 Error Detector 端设置为 Auto-resync。

然后选择 Bert scope 的 View 里面的误码分析功能 (Error analysis)，选择 Error free interval。点击 Error free interval 界面，设置 Hist 的 end 为 500000(bit)，这个参数需要根据芯片的特性灵活调节，如果芯片的自适应时间较长，则可以适当增加，以保证整个自适应过程的误码变化情况都能够在所选的时间范围之内。这个界面的横轴是 bit，可以根据信号的速率转化为绝对的时间，纵轴是误码个数。我们可以根据误码的变化从而计算出自适应的收敛时间。设置好以后点击 auto center。然后点击 Run。

设置好误码仪后，用命令将芯片的 RX 部分进行一次 hot reset，这时候芯片会进行一次时钟恢复的同步，重新调节 DFE, FFE，在 Bertscope 的 Error Free interval 里面就可以看到出现大量误码然后再慢慢减少到没有误码的过程。在 300000bit 左右就不再出现误码，表示这个时候自适应过程就已经完成。为了保证测试结果的重复性和一致性，建议将这个 hot reset 的过程做十次，Error free interval 会自动将这十次的结果进行叠加。从测试的结果看，芯片的自适应时间约为 $250000 \times (1/20.62\text{G})$ 约为 12.5us 左右。

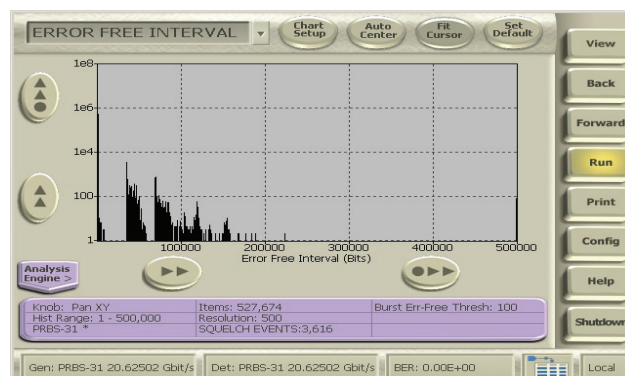


图 5.

另外 Error free interval 的功能还能够用来分析误码出现的时间间隔和规律，如下图，如果测试过程中出现了误码，但不知道误码如何引起，根源在哪里，可以使用这个功能定位出误码随时间变化的规律，如果它是以一定规律出现的话，可以使用光标测量出两个相邻间隔的突发误码的时间，这个时间的倒数就是干扰这个信号传输可靠性的频率来源，从而查找出系统中这个频率相关的干扰源。

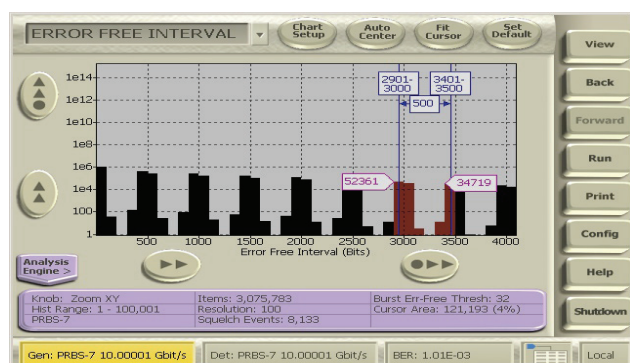


图 6. 使用 Strip chart 功能记录整个长时间老化过程误码变化

案例二：使用误码的 Strip chart 的记录功能来进行长时间的误码分析。

由于客户的系统要进行长时间的（-20 到 +80 度下）的高低温老化测试，客户要看误码的性能和温度变化的相关性，一般的误码仪只能统计温度变化过程中误码的总的个数和误码率，而无法得知在整个十几个小时里面任一时刻误码率的变化。而 BSX 系列误码仪则可以使用 Strip chart 的记录功能将整个过程中记录下来，后面可以根据需要查询任意时刻的误码率变化情况。如下图，在第 10/20/30 秒的时间点出现了一些突发的误码，这个如果仅仅是通过简单的误码统计是无法看到时间相关的细节的，而且其累积记录时间可以长达几十小时甚至几天。

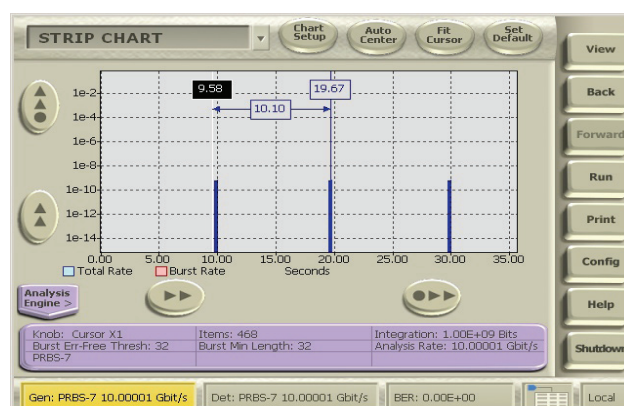


图 7. 使用 Strip chart 功能记录整个长时间老化过程误码变化

案例三：使用误码仪的眼图和抖动分析功能进行信号特性的分析。

1. 客户在测试误码的同时想快捷的观察 TX 端输出信号的质量，确保芯片输出的信号是否满足一定的要求。
2. 客户想真正的测试 10^{12} 次方下的总体抖动的值，因为一般示波器的 Tj 都是通过测量 RJ 和 DJ 然后再通过一定的外推算法去得到 10^{12} 次方下的抖动的，由于示波器存储深度和计算时间的限制，无法得到真正的 Tj@ 10^{12} 。但误码仪是可以通过连续 bit 的测量从而得到真正的 10^{12} 的抖动的，并且其内置的两个高精度的比较器实时全速的对每个 bit 进行扫描和比较。而传统的 Bert 只有一个比较器。两个比较器不仅眼图扫描速度更快，而且在扫描眼图的时候同时也能把信号质量进行准确测量。所以能够快速得到信号的眼图（如图 7）。并根据每个 bit 的与采样点的偏差计算该 bit 的 TIE 的抖动偏移量，从而通过算法计算信号的 Rj/Dj 并进行抖动的进一步细分。同时由于 BSX 系列的误码检测输入端的带宽高达 22GHz 以上，所以对高速信号的眼图和抖动分析的精度非常高。

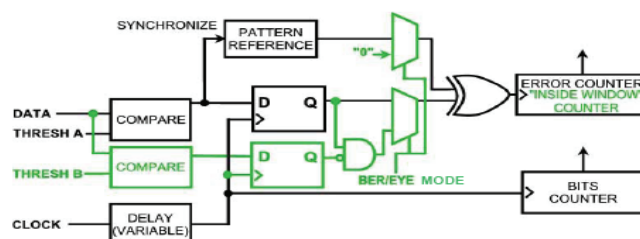


图 7. Bertscope 的误码检测端自带的两个 1bit ADC 的比较器

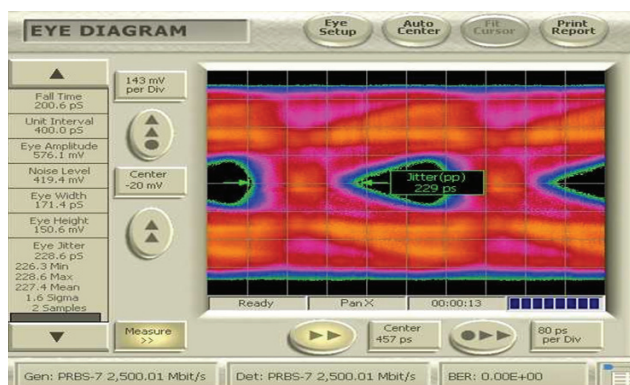


图 8. 眼图分析功能

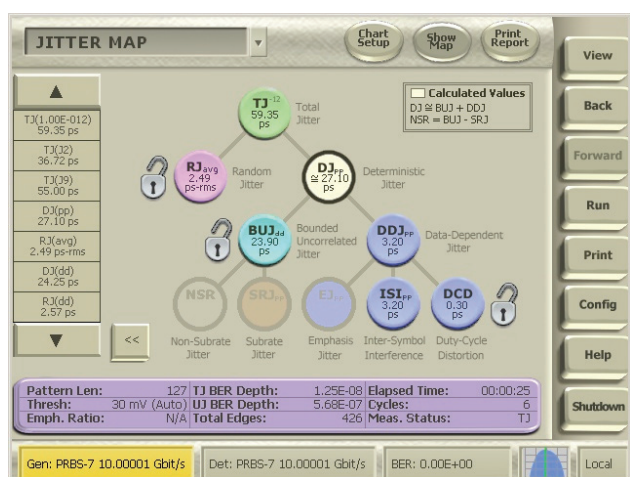


图 9. 抖动分析功能

案例四：使用误码仪的 FEC emulation 功能快速模拟芯片的 FEC 算法。

由于现在芯片和标准的速率越来越高，为了加强容错能力，如 SAS4, PCIe 4.0/5.0, 100G 以太网的标准都广泛使用了 FEC 来进行纠错，即便是牺牲了一些额外的开销，但能够很大的降低误码率，也是值得的。客户的芯片的接收端可以支持 FEC 的纠错功能，但要测试在不同的 channel 条件和不同的发送端均衡的设定下，芯片经过 FEC 后的误码率能降低到多少，如果将信号直接环回到芯片的输入端的话，需要不停的修改芯片的 FEC 的参数来进行测试，但由于其芯片每修改一次 FEC 的参数如 FEC 的 symbol size, block size,

content size 等等都需要重新对芯片进行代码编译和下载，每次下载需要几分钟的时间，由于不同的条件都要测试，则组合数量很多，导致测试效率非常低。但是 BSX 系列误码仪的 FEC 功能能够灵活实时的调节上述各种 FEC 的参数，并且实时的更新经过 FEC 后的误码率变化情况，而完全不需要重新下载芯片的代码 (如图 11 和图 12)。大大的提高了测试和调试的效率，而且客户也做过认真的对比，误码仪对 FEC 后计算得到的误码率和其真实芯片经过 FEC 的误码率是非常匹配的。这个功能使客户之前几天的时间进行调试过程缩短到一天之内完成，作为泰克工程师的我之前也没有怎么用过这个功能，觉得它是个鸡肋，当现场看到客户的调试过程后也是感叹不已。

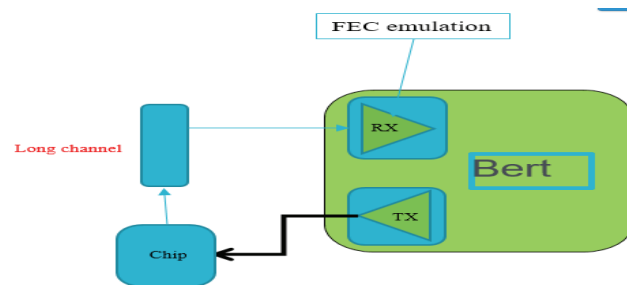


图 10. 用户的测试拓扑结构

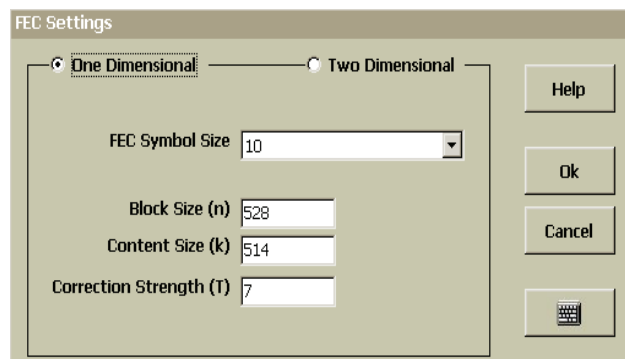


图 11. RS-FEC 的设定，可以任意修改，即时生效

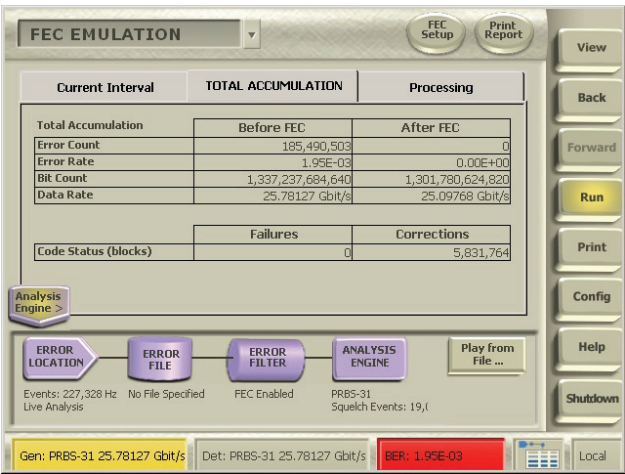


图 12. FEC 的仿真功能，实时计算出 FEC 之前和之后的误码率的变化。

案例五：使用 BSX 的 pattern sensitivity 的功能定位误码出现的特定比特位

在客户进行误码测试的时候，由于链路的损耗和芯片的输出特性，导致出现了误码，但客户却想知道究竟是哪一个 bit 位出现了误码，以定位误码出现的根源。设置 Bert 的输出 / 输入端设置为 PRBS7 的码型，在误码分析功能里面选择 Patten Sensitivity，则可以直接观察 PRBS7 的 127 个比特的每一位所出现误码的个数，看最多误码所对应的比特位的前后特性，如下图十三，移动光标到任意一个比特上面，可以看到连续多个 0 而中间有一个 1 跳变的 bit 即 127 比特的第 94 比特出现误码的个数最多，达到 5043598 个误码。从而判断由于链路 ISI 的影响导致突然的跳变位出现较高的误码率。

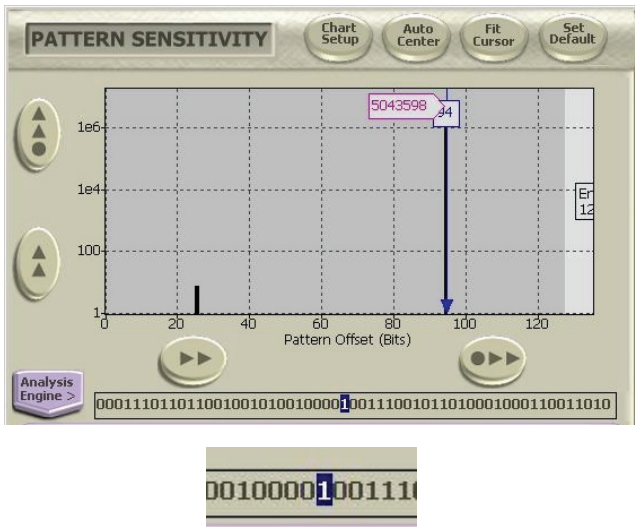


图 13. 基于码型系列的误码定位

从上述的用户实际案例可以看出，Bertscope 的眼图抖动和误码定位分析可以给客户带来很多调试的手段，把时域和误码极好的相关联起来，帮用户极大的提高了测试和调试的效率。



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：www.tek.com.cn

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

如需更多资源，敬请访问 WWW.TEK.COM.CN。

© 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。

