



HFTA-010.0: 物理层性能: 测试误码比(BER)

本文最早发表于2004年9月的*Lightwave Magazine*, “Explaining those BER testing mysteries”。

所有数字通信系统物理层的根本功能是以最快的速度, 在介质(例如, 铜缆、光纤, 以及自由空间等)上尽可能正确无误地传送数据。因此, 对物理层性能的两类基本测量包括数据被传送的速率(数据速率), 以及数据到达信宿时的完整性。数据完整性的主要测量标准是误码比, 即 BER。

本文回顾电信和数据通信协议最普遍的 BER 要求, 简要介绍用于测试 BER 性能的设备, 以及怎样在测试时间和 BER 置信度上达到平衡。

1. BER 规范

数字通信系统的 BER 可以定义为任意比特通过系统传输后, 接收时出现错误的概率, 例如, 发送“1”, 接收到的却是“0”, 反之亦然。在实际测试中, 系统传输一定数量的比特, 对接收到的错误比特进行计数, 从而测量 BER。接收到的错误比特数与传输的比特总数之比便是 BER。随着传输比特总数的增加, BER 估算精度也随之提高。极限情况下, 发送的比特数接近无限时, BER 是对真实误码概率的最佳估算。

在某些材料中, BER 是指误码率, 而不是误码比。真实系统中出现的大部分错误比特主要来自随机噪声, 因此, 它是随机出现的, 而不是均匀分布的概率。BER 是通过对错误比特和传送比特之比进行估算而得到的。出于这些原因, 使用“比”来代替“率”更准确一些。

系统中被传输比特的不同排列顺序(例如, 数据码型), 会导致出现不同的误码数量。例如, 含有长串连续同样数字(CID)的码型低频分量很大, 可能会超出系统通带范围, 导致信号出现确定性抖动和其他失真。这些与码型有关的效应会增大或者减小误码出现的概率。这意味着当使用不同的数据码型来测试 BER 时, 有可能获得不同的结果。码型相关效应的详细分析已经超出了本文的讨论范围, 但是应对 BER 规范和测试结果与数据码型有关这一现象有足够的重视。

大部分数字通信协议要求 BER 性能要达到两个级别之一。SONET 等电信协议使用较长的伪随机码, 一般要求 BER 是每 10^{10} 个比特出现一个误码(即, $BER = 1/10^{10} = 10^{-10}$)。而光纤通道和以太网等数据通信协议通常使用较短的码型, 要求 BER 优于 10^{-12} 。在某些情况下, 系统规范要求 BER 达到 10^{-16} , 甚至更低。

需要指出的是, BER 实际上是统计平均值, 因此, 它在足够多的比特情况下才有意义。例如, 在一组 10^{10} 比特之内可能会出现一个以上的误码, 但是当传送的比特总数远远大于 10^{10} 时, 仍然会满足 10^{-10} BER 规范。在后续的比特流中, 如果每 10^{10} 个比特误码数少于 1 个, 就可能出现这种情况。或者, 在一组 10^{10} 比特中没有误码, 而在后续比特流中误码较多, 仍有可能达不到 10^{-10} 标准。考虑到这些例子, 很明显, 规定 BER 优于 10^{-10} 的系统必须传送远远多于 10^{10} 比特的数据来进行测试, 才能得到精确、可重复的测量结果。一个自然而又常见的问题是“我需要在系统中传送多少比特才能说明 BER 是可信的?” 第三节给出了这一问题的答案。

2. 设备和过程

BER 测试的传统方法使用码型发生器和误码探测仪(图 1)。

码型发生器向待测系统发送测试码型。误码探测仪独立产生相同的测试码型或者接收来自码型发生器的测试码型。码型发生器还向误码探测仪提供同步时钟信号。误码探测仪对来自待测系统的数据和从码型发生器接收到的数据逐比特进行对比。两组数据中出现任何不同都被计为误码。

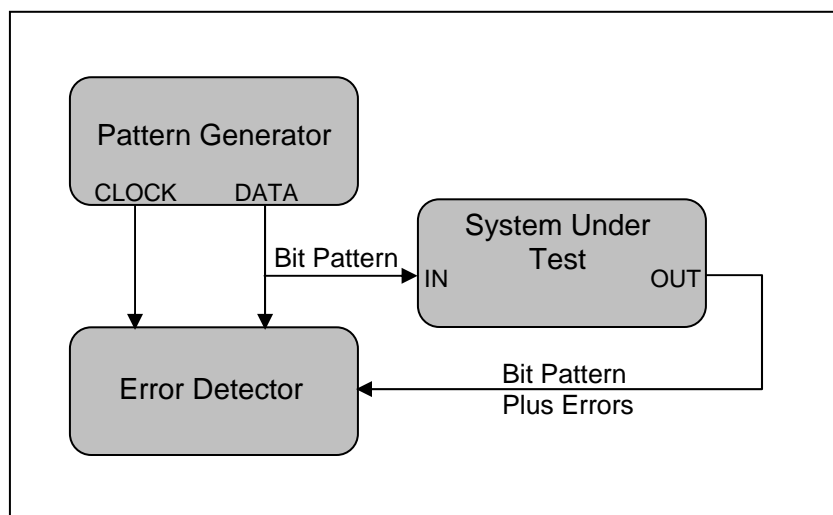


图 1. 进行 BER 测试的测试设备设置

正如前面一节所述，数字通信标准一般会规定 BER 测试所使用的数据码型。通常选择的测试码型能够模拟正常工作时可能出现的数据类型，或者，在某些情况下，选择非常接近系统“最差情况”的码型。模拟随机数据的码型被称为伪随机比特序列(PRBS)，它基于标准化的生成算法。按码型长度对 PRBS 码型进行分类，一般包括“ 2^7-1 ” (码长 = 127 位) 或者“ $2^{23}-1$ ” (码长 = 8,388,607) 等。模拟编码/加扰数据或者最差情况下数据序列的其他码型包括“K28.5” (用于光纤通道和以太网) 等。商用的码型发生器提供标准内置码型，也可以产生定制码型。

为了能够精确对比来自码型发生器的比特和从待测系统接收到的比特，误码探测仪必须与这两种比特流同步，必须补偿待测系统的时延。码型发生器时钟信号为从码型发生器接收到的比特提供同步。误码探测仪在码型发生器时钟中加入可变时延，以便实现与待测系统比特同步。可变时延作为预测试系统校准的一部分，可以进行调整，以减少误码。

3. 多少比特？

在设计良好的系统中，BER 性能受限于随机噪声和随机抖动。结果是误码随机出现(不可预测)，有可能集中在一起出现，也可能分散出现。因此，在系统寿命期内出现的误码数量是一个随机变量，无法精确地预测。要实现精确 BER 测试，系统必须传送多少比特的正确答案应该是“非常多” (实际上是无限)。

而现实中的 BER 测试只有有限的测试时间，我们必须接受不能精确估算这一事实。正如前面所述，BER 估算的质量随着传送比特数量的增加而提高。问题是怎样量化估算质量提高了多少，这样，我们可以确定要达到所需的估算质量，到底需要传送多少比特。这可以采用统计置信度这一概念进行衡量。在统计术语上，BER 置信度可以定义为一种概率，它基于在 N 个传送的比特中探

测到 E 个误码，“真实”的 BER 将小于设定的比例 R (出于此定义的目的，真实的 BER 意味着，如果传送的比特数是无限的，BER 将是可测的)。在数学上，这可以表示为：

$$CL = \text{PROB} [BER_T < R] \text{ given } E \text{ and } N \quad (1)$$

其中： CL 表示 BER 置信度， $\text{PROB}[\]$ 表示“条件概率”， BER_T 是真实的 BER。由于置信度被定义为一种概率，其可能的范围在 0 到 100% 之间。一旦计算出 BER 置信度，我们可以说，真实 BER 小于 R 的置信度是百分之 CL 。也可以理解为，如果我们能够在系统中重复传送相同数量的比特 N ，数出探测到的误码 E ，每重复一次测试，我们得到的 BER 估算结果 E/N 有百分之 CL 会小于 R 。

在方程 1 中令人感兴趣的是，我们希望知道怎样反过来计算，需要传送多少比特才能得出 BER 置信度。为此，我们使用包括二项分布函数和泊松理论在内的统计方法。详细的计算和推导已经超出了本文的范围，参考文献[1]中对此有介绍。结果是：

$$N = \frac{1}{BER} \left[-\ln(1 - CL) + \ln \left(\sum_{k=0}^E \frac{(N \times BER)^k}{k!} \right) \right] \quad (2)$$

其中， E 代表探测到的总误码数， $\ln[\]$ 是自然对数。没有探测到误码(即， $E = 0$)时，方程 2 中的第二项为零，大大简化了此方程的解。 E 不是零时，也可以凭经验解出方程 2 (例如，使用计算表)。

作为怎样使用方程 2 的一个例子，我们假设，需要确定系统必须无误码传送多少比特，才能实现真实 BER 小于 10^{-10} 的置信度为 95%。在这个例子中， $E = 0$ ，因此，第二项(求和项)是零，我们只需要注意 CL 和 BER。结果是 $N = 1/BER \times [-\ln(1-0.95)] \approx 3/BER = 3 \times 10^{10}$ 。结果表明，只凭经验，无误码传送的比特数是设定 BER 倒数的三倍时，系统满足 BER 规范的置信度将达到 95%。相似的计算表明，如果没有探测到误码， $N = 2.3/BER$ 达到 90% 置信度， $4.6/BER$ 达到 99% 置信度。

图 2 显示了在出现零、一个以及两个比特误码时，必须传送的比特数(相对于 BER 进行归一化)和置信度之间的关系。90%、95% 和 99% 等常用的置信度结果列在表 1 中。在使用图 2 中的曲线时，选择需要的置信度，从横轴垂直画一条线，直到与测试期间探测到的误码数曲线交叉为止。从交叉点开始，向左水平画一条线，直到与纵轴交叉，确定必须传送的归一化比特数 $N \times BER$ 。这一数字除以设定的 BER，得到要满足所需置信度必须传送的比特数。

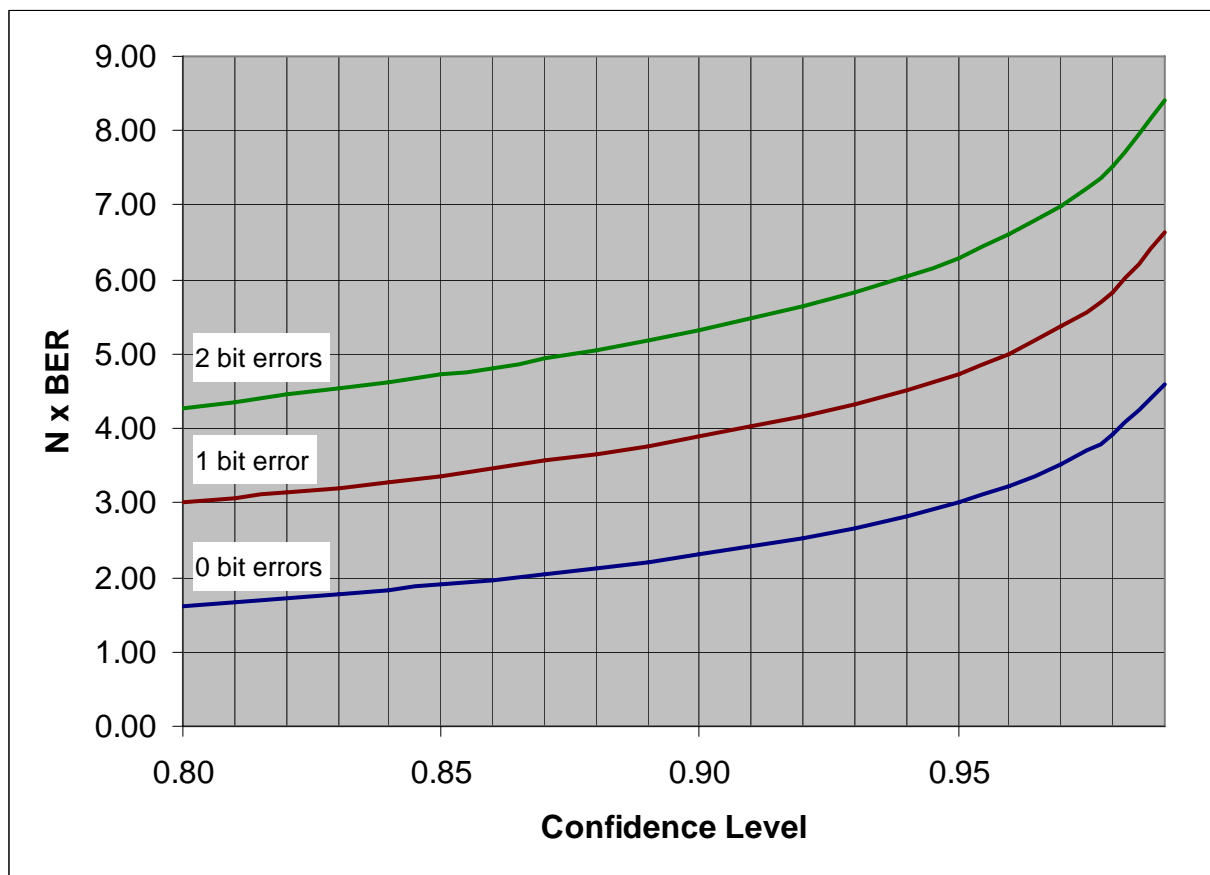


图 2. 0、1 和 2 个误码时，传送的比特数(相对于 BER 进行归一化)与置信度之间的关系

表 1. 90%、95%和 99%置信度对应的 N x BER

Errors	N x BER		
	CL = 90%	CL = 95%	CL = 99%
0	2.30	3.00	4.61
1	3.89	4.74	6.64
2	5.32	6.30	8.40

4. 缩短测试时间

如果测试需要较高的置信度，或者 BER 较低时，会花费很长的测试时间，特别是数据速率较低的系统。对于 BER 为 10^{-12} ，置信度为 99% 的 622Mbps 系统，从表 1 中，零误码需要的比特数为 4.61×10^{12} 。622Mbps 时，测试时间为 4.6×10^{12} 比特 / 622×10^6 比特/秒 = 7,411 秒，大概两个多小时。在实际测试中，两小时有些太长了，那么，怎样才能缩短测试时间呢？

一种缩短测试时间常用的方法是在测试期间，有意降低一定量的系统信噪比(SNR)。结果是出现较多的误码，更快地测量劣化后的 BER (参考文献[2])。如果我们能够知道 SNR 和 BER 之间的关系，那么可以从劣化后的 BER 结果来估算 BER。采用这种方法基于假设——接收器输入热噪声(高斯分布)是导致系统出现误码的主要原因。

可以通过高斯统计方法得出 SNR 和 BER 的关系，很多通信教科书对此进行了介绍[3]。虽然 SNR-BER 关系没有解析解，但是可以通过数值积分得出结果。计算这一关系一种常用的方法是使用 Microsoft Excel™ 标准正态分布函数 NORMSDIST[]。使用该函数，可以计算得出 SNR 与 BER 的关系：

$$\text{BER} = 1 - \text{NORMSDIST}(\text{SNR}/2) \quad (3)$$

图 3 是这一关系的图形表示。

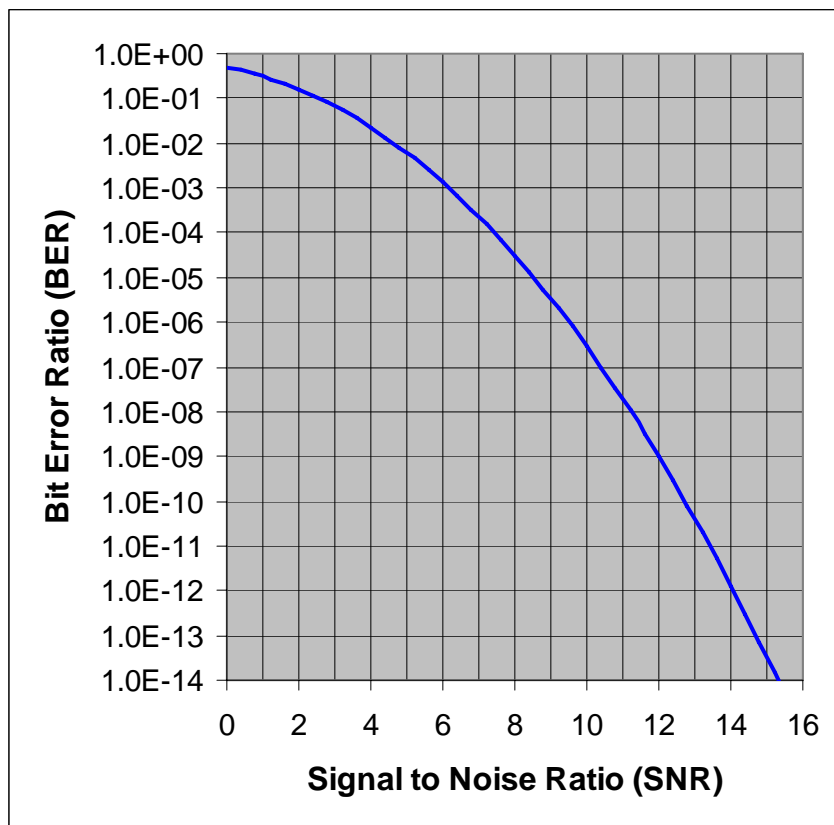


图 3. BER 和 SNR 的关系

为说明这种能够加速测试的方法，我们参考本节开始介绍的例子。在这一例子中，622Mbps 系统 BER 为 10^{-12} ，99%置信度时需要测试两个多小时。从图 3 中，可以看出 10^{-12} 的 BER 对应的 SNR 大概为 14。在待测通信系统中，我们可以中断发射器和接收器之间的信号通道，插入一个衰减器。由于信号在输入到接收器之前已经被衰减，那么，基于主要噪声源位于接收器输入的假设，我们衰减了信号，而不是噪声。因此，SNR 的衰减量和信号的衰减量相同(但是要注意，应确保信号没有被衰减到信道噪声电平以下)。在这个例子中，我们使用 14.3% (0.67dB)的衰减量，将 SNR 从 14 衰减到 12。从图 3 中，我们注意到，把 SNR 衰减到 12 对应于 BER 变化到 10^{-9} 。对于 10^{-9} BER 时 99% BER 置信度，我们需要传送 4.61×10^9 个比特(比最初的测试少 1,000 倍)，测试时间为 7.41 秒。因此，如果我们使用衰减器，7.41 秒测试无误码，那么，可以推断出，去掉衰减器后，BER 应该是 10^{-12} 。听起来很好，对吗？

通过减小 SNR 并进行推断来缩短测试时间并不是没有代价的。其代价是进行推断后，降低了置信度，推断范围越大，置信度降低得越多。为了说明这一情况，考虑一个 SNR 衰减导致 BER 降低 100 倍的测试。如果 SNR 衰减后的测试达到 99%置信度，零误码，那么可以预计重复测试 100 次，将得到 99 次测试没有误码，一次测试有一个误码。现在，如果我们将 100 次重复测试接收到的比特连起来，得到 100 倍的比特数中只有一个误码。从 100 次重复测试中推出最初没有降低 BER 时，在 $1/\text{BER}$ 比特中有一个误码，即 $N \times \text{BER} = 1.0$ 。使用方程 2，可以看出对应的置信度只有 63%，置信度非常低，已经超出了图 2 的范围，远远偏离了我们开始使用的 99%置信度。

从上面的例子可以看出，要获得较实际的测试时间，应尽可能少的衰减 SNR。必须认识到，推断会降低置信度。同样的，在对结果进行推断时，由于取整、测量误差等因素导致的误码会大大增加，因此，必须提高测量和计算的精度。

5. 结论

数字通信系统的误码比是定量说明数据通过系统传输后信号完整性的一个重要指标。在有限的时间内进行测试可以估算得出接收出现误码的概率。随着测试时间的延长，估算质量随之提高，可以使用统计置信度方法来定量说明估算质量。关于缩短测试时间的理论已经发表了很多，但是，这些理论会大大降低置信度，因此，在使用时要非常小心。

参考文献:

- [1] J. Redd, "Calculating Statistical Confidence Levels for Error-Probability Estimates," *Lightwave Magazine*, pp. 110-114, 2000 年 4 月(参见网址 <http://lw.pennnet.com>)。
- [2] D.H. Wolaver, "Measure Error Rates Quickly and Accurately," *Electronic Design*, pp.89-98, 1995 年 5 月 30 日。
- [3] B. Sklar, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, pp. 773-743, 1988。