



前向纠错解决方案

比特误码率测试仪基础知识

全球范围都在要求通过现有的基础设施以更快的速度获取更多数据，这给通信带来了诸多挑战。由于通信信道不够可靠或者环境嘈杂，高数据速率、更小的信号和被压缩的信道都会造成编码错误。比如，硬盘没过几天就随机丢失数据，或者手机仅在天气晴朗时才能通话，这就会使它们变得毫无用处。此外，如果围绕行星运行并与地球进行通信的卫星解码错误过多的话，就会需要重新传输并产生长达 5 小时的延迟。为了防止这些错误，我们现在有了编码理论。前向纠错 (FEC) 或信道编码是可以显著减少这些数据传输错误的技术。

FEC 的基本原理是添加冗余比特，使解码器能够确定来自发射机的真实消息。FEC 技术可以应用于数字比特流，或者在对数字调制的载波进行解调的过程中使用。许多 FEC 编码器可以生成比特误码率 (BER) 信号，作为反馈信息对模拟接收电子设备进行微调。简言之，发射机会对消息进行编码，并且使用纠错码 (ECC) 添加附加比特（我们称之为冗余）。这种冗余使接收机能够检测并纠正消息中任何地方可能出现的有限数量的误码。更强的代码需要更多的冗余和系统带宽，以便降低有效比特率，同时提高接收的有效信噪比。

工作原理

利用某种算法将冗余比特添加到所发送的信息中，从而实现前向纠错。冗余比特可以是许多原始比特的复合函数。FEC 的简单示例是将每个数据比特发送三次。这被称为 (3, 1) 重复代码，如下面的图 1 所示。接收机会收到八个版本的 3 位代码的输出。

收到的数据	FEC 解析
000	0 (无误码)
001	0
010	0
011	1
100	0
101	1
110	1
111	1 (无误码)

图 1: 编码八个不同比特信息的 FEC 结果

三个采样中任何一个的误码都可以通过叫做“多数投票”的功能来纠正。上面的这种三重模块冗余的方法得到了广泛使用，但它是一种效率稍低的 FEC 形式。有效的 FEC 代码通常检查接收的最后几十或几百个比特，然后确定如何解码少量比特（通常以 2 到 8 比特的组合为单位）。

交错法

为了改善突发模式应用中的 FEC 性能，经常使用交错法。交错法会在多个代码字之间混合数据来实现，从而创建更均匀的误码分布。例如：

没有交错的传输

一条无误码的消息： TTTTUUUUUVVVVWWWWWXXXXYYYYZZZZ
具有突发误码的传输： TTTTUUUUUVV_____WXXXXYYYYZZZZ

每个相同字母组代表一个 4 比特、1 比特的纠错码字。代码字 VVVV 中有一个改变的比特，这个比特可以被纠错。代码字 WWWW 中有四个改变的比特，它们都不能被解码，或者可能会被错误地解码。

没有交错的传输

无错代码字： TTTTUUUUUVVVVWWWWWXXXXYYYYZZZZ
交错代码字： TUVWXYZTUVWXYZTUVWXYZTUVWXYZ
具有突发误码的传输： TUVWXYZTUVW___UWXYZTUVWXYZ
解交错之后收到的代码字： TT_TUUUUUVVVVWWWWWX_XXY_YYZ_ZZ

以下每个代码字中只改变了一比特：TTTT、XXXX、YYYY、GGGG。因此，一个 1 比特的纠错码即可正确解码这些代码。图 2 以另一种方式显示了交错的效果。

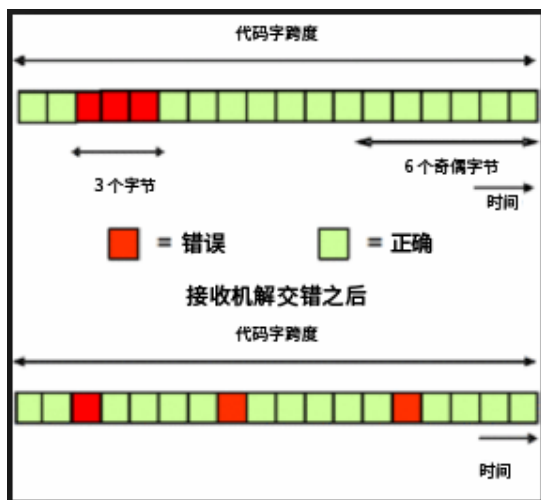


图 2：交错对误码位置的影响

FEC 编码类型

分组码是预先定义的、固定大小的比特或符号块（分组）。实际的分组码可以被硬解码，从而限制它们的分组长度。以下是几种类型的分组编码方案：

Reed Solomon 码

一种使用一组或一族纠错码的交错编码，其字母大小、消息长度和分组长度具有一定的特征。它使用线性循环系统非二进制分组码，与低密度奇偶校验和涡轮码相比具有更少的编码增益。但该方法具有非常高的编码率和低复杂性，使其适用于许多应用，包括存储、传输和大块比特。

Golay 码

提供接近单向、无误码的校正，但代价是数据加倍。使用此编码方案，您必须发送与数据比特一样多的校验比特。

汉明码

为消息中的每四个数据比特添加三个额外的校验比特。

Bose-Chaudhuri-Hocquengham (BCH) 码

可对该代码纠正的符号错误的数量进行精确控制。它基本上是一种用于多重纠错的一般化汉明码。

多维奇偶校验(MDPC) 码

一种简单类型的纠错码，通过将消息排列到多维网格并计算每行和每列的奇偶校验比特来工作。

卷积码

任意长度的比特或符号流。以下是一些卷积码方案：

维特比码

实施一种软判决算法，从被噪声破坏的模拟信号中解调数字数据。它通过增加卷积码的约束长度获得渐近最优的解码效率，代价是增加了复杂性。它也不需要准确了解信噪比。

涡轮码

一种迭代的软解码方案，组合了两个或更多个相对简单的卷积码和交错器。得到的分组码传输速率非常接近理论最大值。

低密度奇偶校验 (LDPC) 码

由多个单奇偶校验 (SPC) 码组成的高效线性分组码。其性能非常接近理论最大信道容量。

信道码

找到快速传输且包含大量合格码字的代码，同时还能检测到许多错误。

可在本地解码和测试的代码

适用于在不查看整个信号的情况下对消息中的单个比特进行解码。例如，在流设置中，码字可能太大而不能足够快地进行经典解码，而且我们仅对消息中的某几个比特感兴趣。

本地可测试码

可进行概率性检查，从而通过仅查看少量代码来确定信号是否接近码字。

级联码

它是经典（代数）分组码与卷积码的结合。一个短约束长度的维特比解码卷积码可以完成大部分工作；而具有较大的符号大小和分组长度的分组码（通常为 Reed-Solomon）则可以“消除”由卷积解码器产生的任何错误。

权衡

选择编解码解决方案时，需要考虑许多注意事项，因为 FEC 往往高于某个最小信噪比而不是低于它。此外，FEC 要么能够出色地恢复数据，要么就根本没法恢复数据。这被称为悬崖或砖墙效应。随着信号强度降低，模拟通信数据的恢复能力会逐渐下降。

当信道错误倾向于以突发形式出现时，FEC 编码数据的交错可以缓解 FEC 码“全有或全无 (all-or-nothing)”的特性，尤其对窄带数据更有帮助。大多数 FEC 系统使用“信道代码”设计来容忍预期的最坏情况误码率，但是，如果误码率比预测情况更差，它们根本就不能工作。

因此需要在关键的可靠性与数据速率间做出权衡。冗余比特使用与数据比特相同的信道；它们会影响可用的数据速率。冗余比特数越高，可用的数据速率越低，解码信号的可靠性越高。冗余比特数越低，可用的数据速率越高，解码信号的可靠性越低。

另一个必须的权衡是性能与复杂性。优化码率是为了达到降低误码率和减少重传次数之间的平衡，以降低通信的能量成本。编码复杂程度的增加会产生一些额外的延迟。银行业务和图像识别等数据中心的应用程序对此非常敏感，它们会把比特率加倍而不是转向 PAM4，从而继续使用 NRZ 或 ENRZ 编码。

码率是由信息比特数除以总比特数而得出的。接近零的低码率意味着强代码，此时使用了许多冗余比特来获得良好的性能。接近 1 的大码率意味着弱代码。例如，强代码（具有低码率）会使接收机的信噪比增加，同时，也会使比特误码率和有效数据速率降低。然而，如果不使用任何 FEC（即码率等于 1），而是使用全信道来传送信息的话，则会使比特失去任何额外的保护。

采用上述纠错码方案之后，单通道解码可以实现非常低的错误率；但是对于像外太空那样的长距离传输条件，建议采用迭代（解析）解码。

应用

- 数据中心网络 (100G 和 400G 以太网)
- 长距离通信网络 OTN
- 卫星
- 大容量存储设备
- 调制解调器
- 纠错码存储器 (ECC 存储器) 计算机系统
- 数据存储
- 条形码
- 非 NRZ 数据格式, 如 PAM-4
- 具有高达 16 Gb/s 和 32 Gb/s 串行 I/O 端口的芯片、器件、电路板和系统的一致性和表征测试
- 消费者、计算机、移动计算、数据中心和通信行业
- 测试流行的串行总线标准, 如 SATA/SAS、MIPI®M-PHY、100GbE/CFP2、400GbE、OIF-CEI-56 Gb/s 和 112 Gb/s
- 对下一代数据中心网络和服务器接口使用的器件进行数字接收机表征

结论

使用前向纠错可使接收机恢复损坏的消息并将其转换回原始消息 实现可靠通信的关键组件, 如电话, 卫星通信和数据存储。点击[比特误码率测试仪解决方案](#), 了解更多信息。

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

