

SD-FEC 技术：实现 100G 高性能传输的关键

FEC 实现光通信系统的可靠传输

伴随着网络流量的快速增长，波分复用技术作为现在通信系统的基础承载技术，也经历了容量从小到大的发展过程。在这一发展过程中，每一次单波长速率的提升都伴随着技术的重大变化：从单波长 2.5G 时代的直接调制方式到 10G 时代的外调制方式及 DCM 色散补偿；10G 时代到 40G 时代是 OOK 调制技术向 PSK 调制技术的转变；40G 时代到 100G 时代的关键技术特征则是高速 DSP (ADC 采样速率达到 56Gbit/s 以上) 使能的相干技术。

在波分复用技术的发展过程中，前向纠错 (FEC, Forward Error Correction) 技术作为实现信息可靠传输的关键，逐渐成为必不可少的主流技术。光纤通信中的 FEC 也经历了几代技术的演变，从经典硬判决，到级联码，而 100G 相干技术的出现使得软判决成为演进的方向。

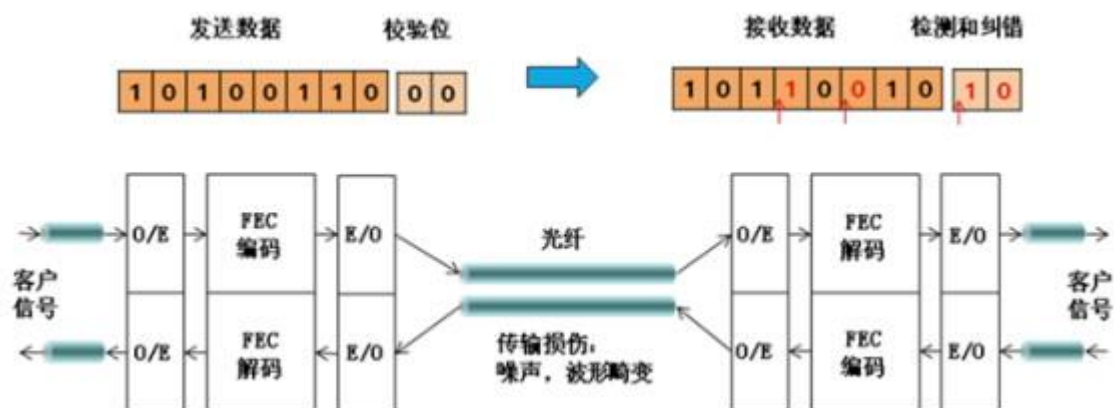


图 1 FEC 在光通信中的位置

FEC 技术是一种广泛应用于通信系统中的编码技术。以典型的分组码为例，其基本原理是：在发送端，通过将 k bit 信息作为一个分组进行编码，加入 $(n-k)$ bit 的冗余校验信息，组成长度为 n bit 的码字。码字经过信道到达接收端之后，如果错误在可纠范围之内，通过译码即可检查并纠正错误 bit，从而抵抗信道带来的干扰，提高通信系统的可靠性。在光通信系统中，通过 FEC 的处理，可以以很小的冗余开销代价，有效降低系统的误码率，延长传输距离，实现降低系统成本的目的。

FEC 的使用可以有效提高系统的性能，根据香农定理可以得到噪声信道无误码传输的极限性能 (香农限)，如图 2 所示。从图 2 可以看出，FEC 方案的性能主要由编码开销、判决方式、码字方案这三个主要因素决定。

(1) 编码开销：校验位长度 $(n-k)$ 与信息位长度 k 的比值，称为编码开销。开销越大，FEC 方案的理论极限性能越高，但增加并不是线性的，开销越大，开销增加带来的性能提高越小。开销的选择，需要根据具体系统设计的需求来确定。

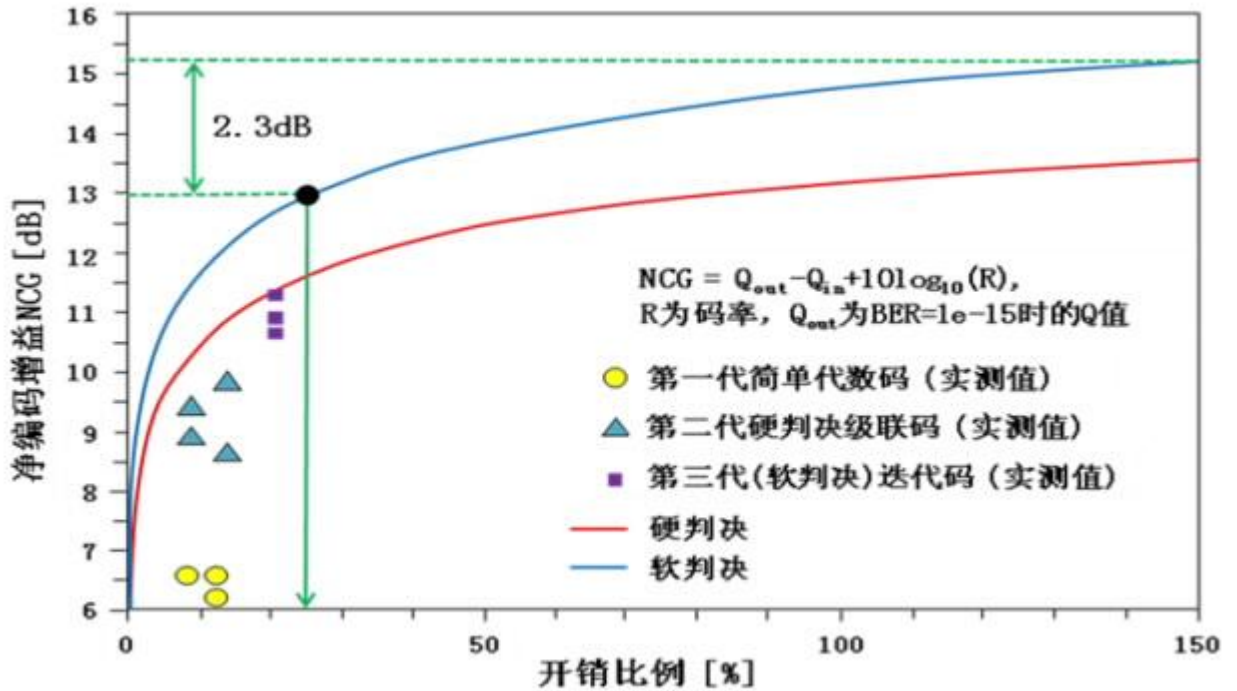


图2 硬判决 FEC 和软判决 FEC 的香农限

(2) 判决方式: FEC 的译码方式分为硬判决译码和软判决译码两种。硬判决 FEC 译码器输入为 0, 1 电平, 由于其复杂度低, 理论成熟, 已经广泛应用于多种场景。软判决 FEC 译码器输入为多级量化电平。在相同码率下, 软判决较硬判决有更高的增益, 但译码复杂度会成倍增加。微电子技术发展到今天, 100G 吞吐量的软判决译码已经可以实现。随着传送技术的发展, 100G 时代快速到来, 软判决 FEC 的研究与应用正日趋成熟, 并将在基于相干接收的高速光通信中得到广泛应用。

(3) 码字方案: 当确定开销和判决方式后, 设计优异码字方案, 使性能更接近香农极限, 是 FEC 的主要研究课题。目前, 软判决 LDPC 码, 由于其良好的纠错性能, 且非常适合高并行度实现, 逐步成为高速光通信领域主流 FEC 的方案。

第三代 FEC 是高性能传输的关键

FEC 在光纤通信中的应用研究起步较晚, 从 1988 年 Grover 最早将 FEC 用于光纤通信开始, 光纤通信中的 FEC 应用可分为三代。

第一代 FEC: 采用经典的硬判决码字, 例如汉明码、BCH 码、RS 码等。最典型的代表码字为 RS (255, 239), 开销 6.69%, 当输入 BER 为 $1.4E-4$ 时输出 BER 为 $1E-13$, 净编码增益为 5.8dB。RS (255, 239) 已被推荐为大范围长距离通信系统的 ITU-T G.709 标准, 可以很好匹配 STM16 帧格式, 获得了广泛应用。1996 年 RS (255, 239) 被成功用于跨太平洋、大西洋长达 7000km 的远洋通信系统中, 数据速率达到 5Gbit/s。

第二代 FEC: 在经典硬判决码字的基础上, 采用级联的方式, 并引入了交织、迭代、卷积的技术方法, 大大提高了 FEC 方案的增益性能, 可以支撑 10G 甚至 40G 系统的传输需求, 许多方案性能均达到 8dB 以上。ITU-T G .975.1 中推荐的 FEC 方案可以作为第二代 FEC 的代表。

现有 10G 系统多采用第二代硬判决 FEC, 采用更大开销的硬判决 FEC 可以支撑现有系统的平滑升级。例如, 10G 海缆传输系统目前采用 ITU-T G .975.1 推荐的开销为 6.69% 的硬判决 FEC 方案, 若采用 20% 开销的高性能硬判决 FEC, 较现有方案可提高 1.5dB 左右的编码增益, 极大改善系统的性能。

第三代 FEC: 相干接收技术在光通信中的应用使软判决 FEC 的应用成为可能。采用更大开销 (20% 或以上) 的软判决 FEC 方案, 如 Turbo 码、LDPC 码和 TPC 码, 可以获得大于 10dB 的编码增益, 有效支撑 40G、100G 至 400G 的长距离传输需求。

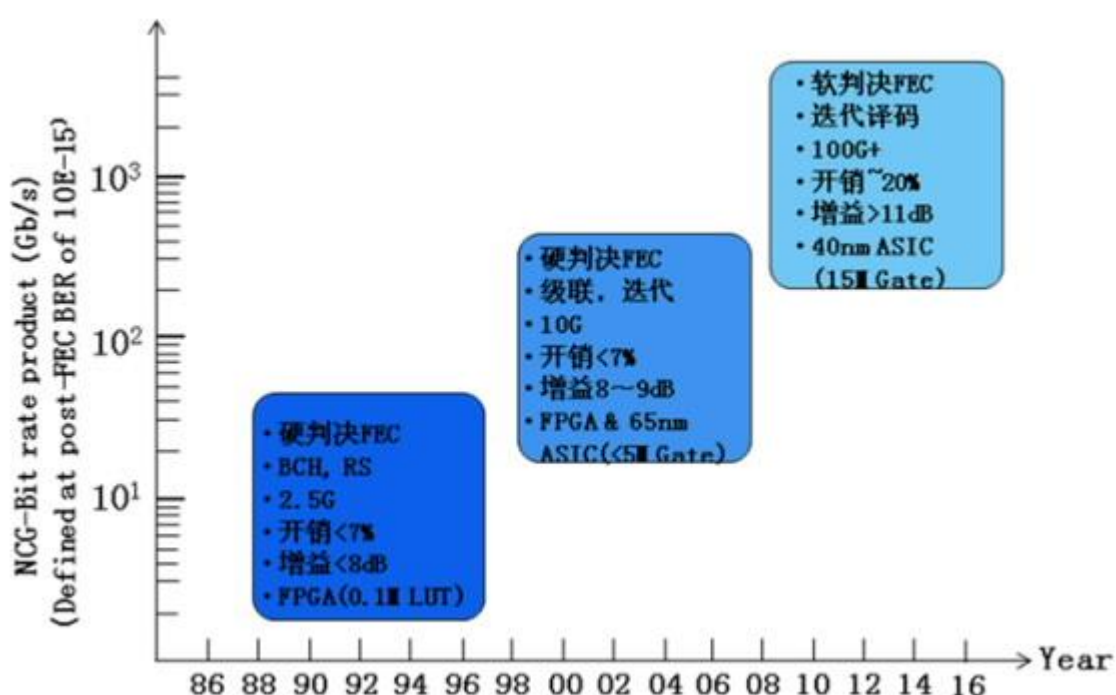


图 3 光通信 FEC 的演进

现有 40G 系统可以采用更大开销硬判决 FEC 完成平滑升级, 也可以基于相干接收方案采用软判决 FEC, 从而提供更强的传输性能。而 100G 以及 400G 光传输系统采用相干接收技术, 非常适合采用软判决 FEC 技术。基于软判决 FEC, 采用级联、卷积、交织等技术, 可以提供 11dB 以上的高性能 FEC 方案, 有效支撑 100G 和 400G 系统的应用需求 (见图 3)。

(1) 软判决原理

硬判决译码器接收的序列中仅包含“0”和“1”序列, 主要利用码字中的代数结构进行硬判决译码。这种方式实际上丢失了信号中包含的信道干扰的统计特征信息。

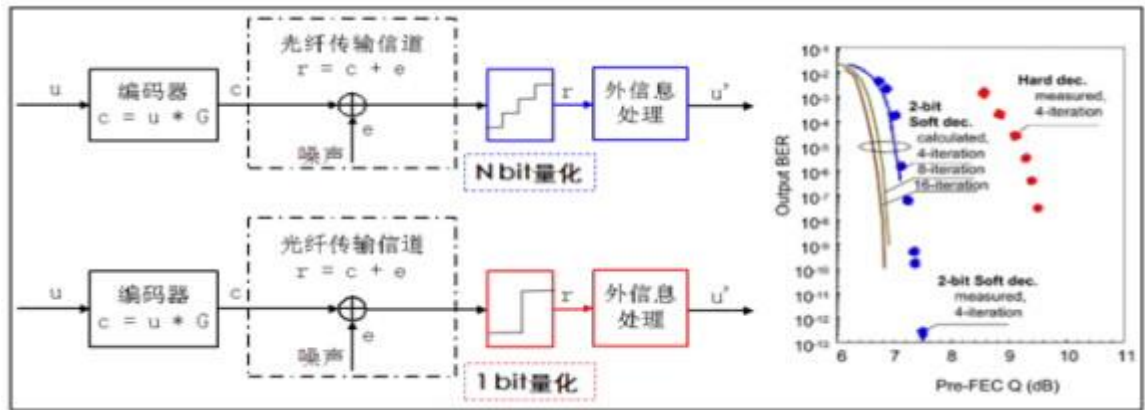


图 4 软判决与硬判决的差别

为了充分利用接收波形中的信息，提升译码器的正确判决概率，可以将接收的信号进行量化采样（见图 4）。译码器利用这些信息可以获得更高的译码准确度，系统性能得到较大幅度的提高。相同码率下，软判决 FEC 增益性能比硬判决高 1.5dB 左右。

虽然软判决性能优良，但其实现需要高速 ADC 做信号的采样量化处理，译码器比特吞吐量也是硬判决的好几倍。同时软判决译码算法需要处理更多的信息，也需要考虑由于信道劣化特征造成的噪声概率分布变化，算法复杂性大为增加。幸运的是，集成电路技术的迅猛发展使得软判决得以实现商用。

(2) LDPC 原理

1962 年，Gallager 首先提出 LDPC 码（Low Density Parity Check Code，低密度校验码），并给出 LDPC 码简单构造和硬判决译码算法。但由于其算法复杂度高且当时计算机处理能力的限制，LDPC 码很长时间内被忽视。1996 年，MacKay 和 R. Neal 重新研究了 LDPC 码，发现其具备逼近香农极限的优良性能，LDPC 码成为编码领域被关注的热点之一。

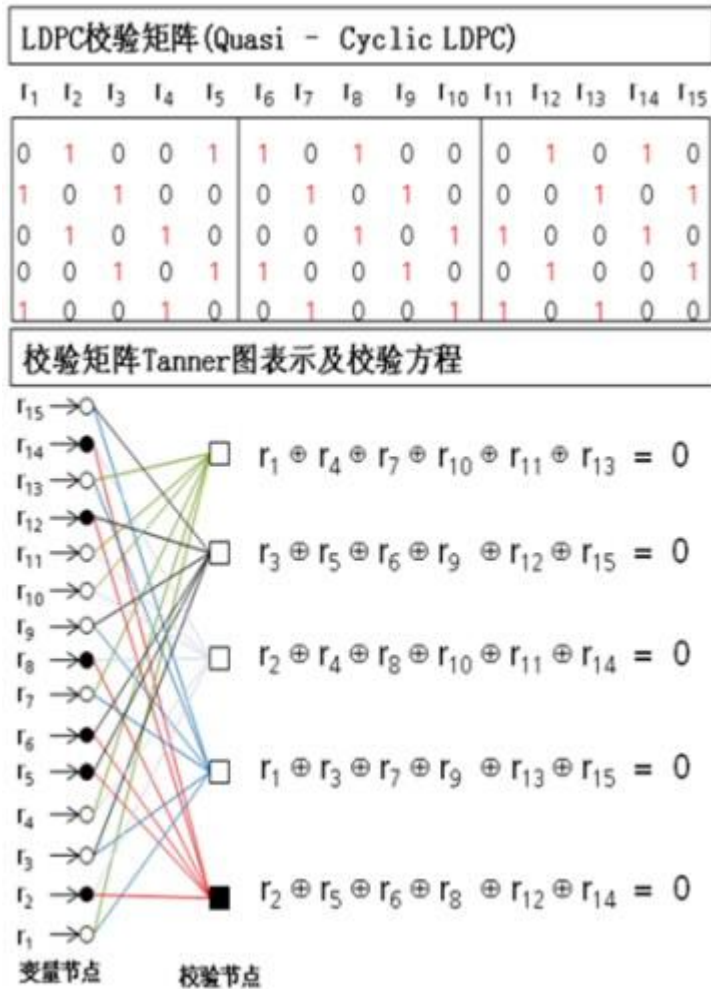


图 5 LDPC 码校验矩阵及其 Tanner 图表示

LDPC 码的名称来源于其校验矩阵是稀疏矩阵，即校验矩阵中只有数量很少的元素为“1”，大部分元素都是“0”，这样码字之间可以有较长的码距离。

LDPC 软判决译码算法采用置信度传播 (Belief Propagation, BP) 算法或和积 (Sum-Product) 算法译码。该算法利用量化电平提供的信道信息以及通过校验矩阵建立的码字内比特间建立的运算关系来判断比特的置信度 (见图 5)。通过在 Tanner 图上相邻的变量节点和校验节点间传递这些置信度信息，并通过多次迭代的方式，可以有效提升判决的准确度。

与基于乘积码构造的 Turbo 码相比，LDPC 同样可以获得接近香农极限的优异性能，在高误码率情况下仍然具有很强的纠错能力。不仅如此，LDPC 码还具有较低的错误平层 (Error floor) 效应；译码复杂度仅随着码长线性增长，计算复杂性相对较低；可以实现并行译码，适合于高速通信系统。因而，LDPC 码在光通信、无线通信、深空通信以及磁记录方面得到广泛的应用。

中国探月工程二期嫦娥二号工程中，LDPC 被列为嫦娥二号任务的六项工程目标和四大创新技术的核心内容之一。2010 年 11 月，清华大学研制的低密度奇偶校验码 (LDPC) 遥测信道编码试验取得成功，这是

LDPC 信道编码技术首次应用于中国航天领域。LDPC 纠错能力强、编码增益高的特点，可进一步提高信道余量，进而大幅度提高整星测控的可靠性，为未来深空探测提供技术储备。

在光通信领域，100G 已经被业界认为是下一代主流的传输速率。随着电子技术的飞速进步，高速 ADC（超过 56Gbit/s 的采样速率）和 DSP 的商用化，100G 相干技术以其高频谱效率、高 OSNR 灵敏度、电 CD/PMD 补偿，成为主流的 100G 传输技术。这也为基于 LDPC 的软判决前向纠错（SD-FEC）应用到 100G 传输提供了技术基础。

同时，100G 相干技术虽然在性能上相比非相干技术有大幅提升，但与当前已经被广泛应用的 10G/40G 传输相比，仍然存在传输距离不够远、覆盖范围有限的问题。基于 LDPC 的软判决前向纠错（SD-FEC）为进一步提升 100G 传输性能提供了很好的解决方案。

基于 LDPC 码的软判决高性能 FEC 方案

软判决方案的性能受码字构造，译码算法的影响较大。合理的构造，高效的译码算法，采用交织、级联、卷积等技术手段，充分利用冗余信息可以有效提高软判决方案的性能。

华为基于 LDPC 码构造的高性能 FEC 方案 BICC，在传统的 LDPC 码基础上，创新地融合了交织技术、级联技术等手段，获得了 11.5dB 以上的高编码增益，相对传统的硬判决方案提升了近 2.6dB 编码增益，可以很好支撑 100G 高速光传输系统的应用需求。

华为 100G SD-FEC 软判决算法具有如下特点：

- 创新的全软判决 FEC，可获得更高的增益、更高的集成度和更低的功耗。
- 采用 100% 的软判决，没有级联 HD-FEC 码，延时大为降低。
- 独特的级联流水线架构，显著降低了软判决译码的实现复杂度。
- 创新软判决架构，可扩展实现不同功耗、不同性能的灵活解决方案。
- 软判决 FEC 采用 20% 以上的开销，结合发端频谱压缩技术，可以在传送带宽增加的同时，降低速率提升的传输代价，保证高开销软判决 FEC 带来的增益性能。
- 软判决 FEC 与独特的 DSP 算法相结合，提供差异化的应用场景解决方案。

随着 FEC 技术的发展，码字性能越来越接近香农限。然而，FEC 技术在光传送系统中的应用需要结合系统的需求，选择合理的开销和判决方式，设计低复杂度、高性能的码字方案。

我们知道，硬判决 FEC 将长期应用于光通信领域，通过对融合、高性能的硬判决方案的研究，可以有效支撑现有 10G、40G 系统的升级需求。针对 100G、400G 甚至 1T 的高速光传输应用，软判决算法将在如何提升吞吐量和净编码增益，降低错误平层和算法复杂度，以及软判决算法如何适应 Non-AWGN 非线性信道等方面持续改进，以适应更高速率系统的性能要求。我们相信，高性能低复杂度的软判决将成为主流，支撑和推动光传送应用与发展。