

# FEC 判决技术助力 100G 实现高性能传输

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 的相干技术。

## FEC 技术概述

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。FEC 技术的原理是在发送端对  $k$  bit 信息进行分组编码，并加入  $(n-k)$  bit 冗余校验比特组成长度为  $n$  bit 的码字；而在接收端则通过译码来完成错误比特的筛选和纠正，以提高通信系统的可靠性。FEC 的纠错性能主要取决于如下三个因素：判决方式、编码开销以及码字方案。

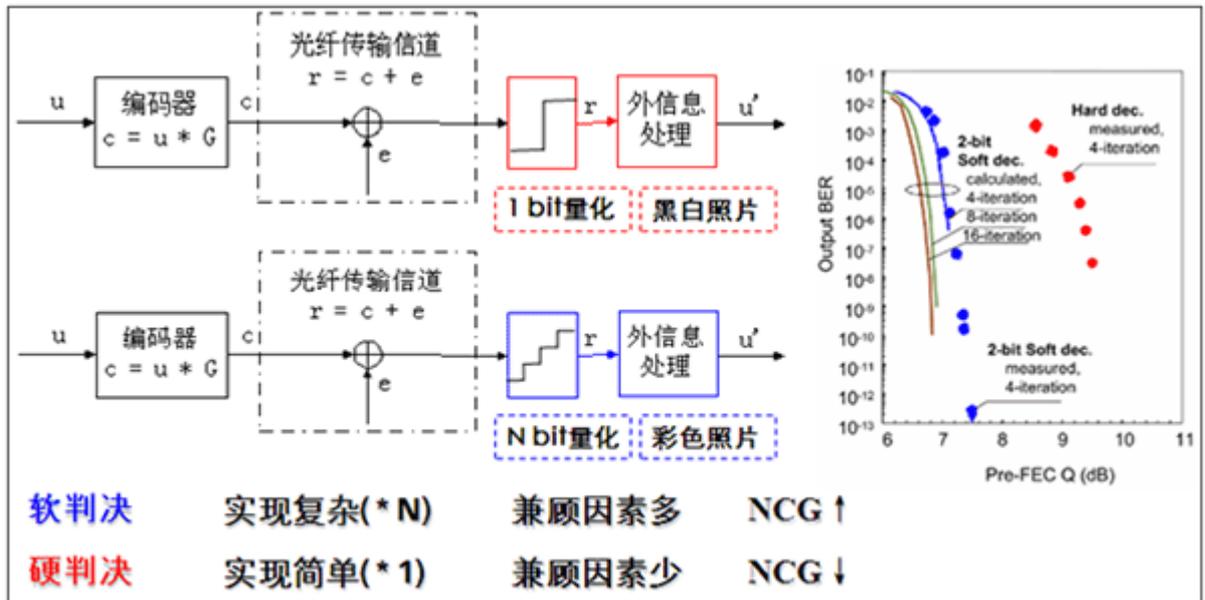
## 软判决和硬判决 FEC 技术

FEC 的判决方式可分为硬判决 (HD) 和软判决 (SD) 两种。HD-FEC 广泛用于 10G, 40G 非相干及早期的 40G/100G 相干传输系统，是一种复杂度低，理论成熟的判决方式。HD-FEC 的特点为，在 FEC 译码单元之前，有一个阈值电平判决电路，对携带有噪声的传输后的信号进行 1 比特量化。即先设定一个固定的判决电平，若信号高于此阈值电平则被判决为 1，低于此阈值电平则被判决为 0。该两电平信息输入译码器，后者再根据纠错算法将被误判为 1 的 0 比特纠正为 0，将被误判为 0 的 1 比特纠正为 1。由于 HD-FEC 的 1 比特量化过程不够精细，不能估计 1 比特量化过程中的可信度，更无法向译码器传递量化的可信度，因此提前损失了待判决信号的电平分布的概率性信息；类似于用黑白相机拍摄世界，不可避免地忽略了大千世界丰富的色彩信息。反映在纠错性能上，HD-FEC 的净编码增益不能做得很高，在 7% OH 条件下净编码增益一般不超过 9dB。

硬判决 FEC 对前端电路的要求是比较低的，对阈值电平判决电路之前的信号是模拟信号也可以正常工作。因此硬判决 FEC 广泛用于 2.5G, 10G, 40G 非相干等采用模拟接收机的传输系统。另一方面，对于业已采用了数字接收机的 40G/100G 相干传输系统，传输后的信号在相干接收后即经由 ADC 实现了多比特量化，已经包含了待纠错信号的电平估计值和概率性信息。此时再使用 HD-FEC，则要对多比特量化信息重新进行单比特量化，即没有充分利用数字相干接收机带来的多比特量化的好处。而 SD-FEC 技术则可克服 HD-FEC 的这种局限性。

用于 100G 相干传输系统的 SD-FEC 可直接使用数字相干接收机和 DSP 处理后的多电平信号， $N$  比特量化输入信息中有 1 比特携带 (0, 1) 等猜测信息， $N-1$  比特提供该猜测信息的可信度 (概率信息)。再利用后续算法进行处理，提升译码器的正确判决概率。可见 HD-FEC 和 SD-FEC 的差异主要在于所利用的待判决的信号的量化程度不同。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，对应的 ASIC 电路的规模和复杂性远比硬判决译码大。随着微电子技术和 ASIC 制作工艺的发展，软判决 FEC 技术已经成熟，成为 100G 传输关键技术的重要组成部分。



软判决与硬判决 FEC 之间的差别

### 编码开销和码字方案

编码开销定义为 FEC 中的冗余校验比特与信息比特数目的比值。一般来讲，编码开销越大，FEC 的纠错能力越强，但两者之间并不呈简单的线性关系。

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。当前 HD-FEC 的发展趋势是在经典的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, 40G 非相干传输系统的性能需求。而 SD-FEC 方案的性能受码字构造，译码算法的影响较大。合理地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大大提高 SD-FEC 方案的性能。当前的发展趋势是，采用更大开销(20%或以上)，选择合理的码字构造(Turbo 码、LDPC 码和 TPC 码等)，并结合交织、级联、卷积等技术手段，可以提供大于 11dB 的编码增益，有效支撑 40G, 100G 至 400G 的长距离传输需求。其中 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。

### 高性能软判决 FEC 技术

在业界现有的 SD-FEC 技术基础上，华为推出了性能更优异的 SD-FEC 算法，功耗更低，净编码增益更强，可延伸 33% 的传输距离。早在 2011 年，华为即在业界首次提出了高新能 LDPC SD-FEC 算法，采用卷积、级联技术手段，以及独

特的级联流水实现架构，大大降低了 SD-FEC 的实现复杂度。这种高性能 SD-FEC 技术的独特价值在于：

创新的 SD-FEC 可获得更高的编码增益、更高的集成度和更低的功耗，延时大大的降低；

采用创新架构 SD-FEC 方案，兼容 100G/400G/1T/2T 等传输系统的要求，因此可扩展实现不同功耗，不同性能的解决方案；

SD-FEC 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 SD-FEC 带来的增益性能；

该 SD-FEC 可更好的和 DSP 算法相结合，提供差异化的系统场景解决方案；

应该指出，在当前实际网络应用过程中，不必认为软判决 100G 传输系统将完全取代硬判决 100G 传输系统，而是两者各有其最优的应用环境。硬判决 100G 传输系统的功耗较小，成本较低，能很好地用于城域网、本地网和一部分长途骨干网，建网的 CAPEX 较低。而软判决 100G 传输系统技术领先、抵抗 ASE 噪声累计及光纤非线性效应的能力更强，因此尤其适用于传输距离达到 2500km 及以上的 ULH 传输系统，有利于节省电中继数目、提升网络的覆盖面积。两种 100G 传输技术高低搭配，才能在建网过程中获得最佳的效费比。

## 发端 DSP 技术

软判决 FEC 的应用，会使得 100G 传输码型的线路速率达到 130Gbit/s 左右，相应的 100G 码型的光谱更宽，会导致 100G WDM 信号之间的线性串扰问题。此外在组建 ROADM 网络过程中，较宽的 100G 光谱穿通多个 50GHz 滤波器，会带来比较明显的光谱窄化效应，导致光滤波器级联代价上升，显著降低 ROADM 网络中的 100G 组网能力。为避免这种情况发生，业界提出了发射端光谱整形（也称为频谱压缩）的方案，即通过在发端调整电域驱动信号的波形及其频谱分布，进而优化光域信号的频谱的集中程度。光谱整形技术需要在发端使用 DSP 芯片和 DAC（模-数转换器），以实现频谱形态的控制。光谱整形技术的优势是显而易见的，可以大大增加传输系统的频谱利用效率，有助于提升系统容量，但同时也增加了技术的复杂度，此外对光器件的响应特性也有一定要求。

## 结语

在 100G 日益成为传送网络主流应用的今天，作为少量的完全掌握 100G 相干核心技术及自研能力的设备厂家，华为领先提供了基于 PDM-QPSK 及相干 DSP 技术的 100G 解决方案，极大地提升了系统容量，单纤可达 8T 容量。其优异的传送性能、可帮助运营商从当前的 10G、40G 网络升级至 100G，最大程度降低网络 CAPEX 和 OPEX，充分保护现网投资，同时快速响应市场的 100G 业务需求，并改善带宽瓶颈。

华为 100G 产品具有多种码型及硬判/软判 FEC 技术选择方案,其完备的技术组合有利于运营商根据自身网络特点灵活选择,以最佳的效费比实现 100G 网络升级与扩容。