

# 光纤的复杂调制方法

## 要点：

•运营商要在现有的光纤中挤进 100 Gbps 的流量，而这些光纤原设计用于 10 Gbps 甚至 2.5 Gbps 光链路。

•DWDM（密集波分复用）系统不能使用 100 Gbps 数据流，因为有邻道串扰问题。

•QPSK（正交相移键控）信号要比 NRZ（不归零）信号对噪声和非线性相位失真更加敏感。

新的调制方法必须能处理长距离传输。短距离通信即所谓的园区与本地城域网中的客户端，它们不需要复杂的调制，因为距离很短，足以容纳较高的速度（图 1）。对客户端，当距离远至 40 km 时，100 Gbps 链路可以使用四个 25 Gbps 的通道。IEEE 802.3ba 就定义了这些数据链路。由于短距离 100 Gbps 链路要在一根光纤上使用四种波长，甚至要在最短距离上使用 10 根 10 Gbps 的光纤，因此，可能需要更多光纤来增加现有的 10 Gbps 速度。在短距离上安装额外的光纤花费并不高，如在一个园区网的建筑之间。

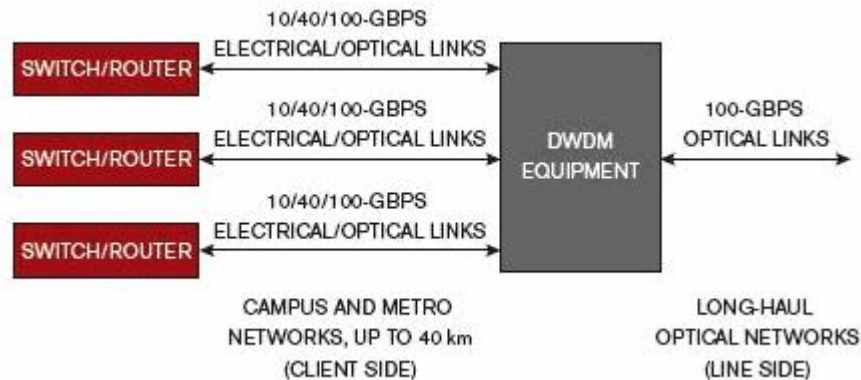


图 1，运营商用一个数据链路的线路端作城际间的长距离传输。客户端传输则用于连接园区和本地城市地区。

长距离传输的情况就完全不同了，每家服务供应商网络的“线路端”都需要传输数百公里的距离。为了补偿增加的通道而加光纤，成本太高昂了。Tektronix 公司产品工程师 Pavel Zivny 说：“运营商要在现有的光纤中挤进 100 Gbps 的流量，其中很多原来设计用于 10 Gbps，有些甚至是为 2.5 Gbps 光纤链路而设计的。”

要简单地将一个 100 Gbps NRZ（不归零）流硬塞入现有光纤，显然是不现实的。当前的 DWDM（密集波分复用）光纤采用各信道之间 50 GHz 的间隔。尽管对采用 NRZ 调制的 10 Gbps 数据流，这个信道间隔足够用了，但对 100 Gbps NRZ 流则太窄。LeCroy 公司业务发展经理 Mike Schneck 认为：“你不能直接将 100 Gbps 流加在载波上。”原因是：对一个 100 Gbps NRZ 信号，每一比特的宽度只有 10 ps。

Anritsu 公司的光产品专员 Hiroshi Goto 则称：“由于邻道的串扰问题，DWDM 系统中不能使用 100 Gbps 数据流。PMD（极化模式色散）和 CD（色散）阻止了这种情况。有太多的失真。脉冲失真与重叠。”

为解决这个问题，OIF（光互连论坛）建议采用复杂调制，从而能以现有光纤，在每秒每赫兹内装入更多比特。OIF 提议采用 QPSK（正交相移键控）和双极化，在一个单波长上实现 100 Gbps 流量。QPSK 常见于数字 RF 通信，但对光纤通信是新鲜东西。

一个 100 Gbps 链路包含了两个极化——TE（横电）与 TM（横磁）的两个 50 Gbps 流，它们在两个正交的极化平面上传输。每个 50 Gbps 流都包含 25G 符号/秒。QPSK 调制可将 2 个比特封装在一个符号内。由于 QPSK 信号是以两个极化面传输，因此它可以叫做 DP-QPSK（双极化 QPSK），或叫 PM-QPSK（极化模式 QPSK）；两个词语都经常使用，可以互换。本文在指双极化时使用 DP-QPSK，而单极化时用 QPSK。

### 复杂调制

图 2 表示了调制过程。单个 100 Gbps 码流被分成 TE 与 TM 极化。这一步骤产生出相同频率的两个载波。然后，每个载波去做 I/Q（同相/正交）调制，得到两个 25G 符号/秒的流。总计为 100 Gbps，但实际的数据速率略高些（见附文 1《一个 G 里有什么》）。图 2 中的极性分离器出现在 QPSK 调制器以前。有些收发器设计可能会先放 I/Q 调制器，然后再将调制后的信号分离为两个极性。

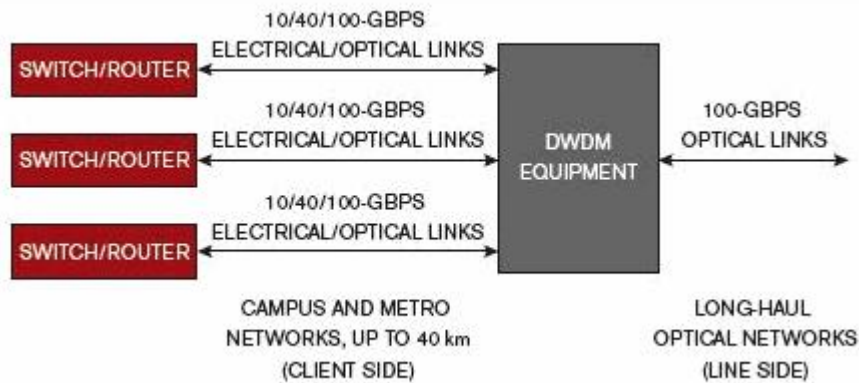


图 2，一个 100 Gbps 的发送机将一束激光分离成两个极化面，然后将四个 25 Gbps 数据流调制在一根单波长光纤上。

QPSK 调制是响应进入的码对 (00、01、10、11)，对光载波作移相，在每个符号放 2 个比特。每个符号代表 2 比特。接收器将每个符号解调为 2 个比特，获得一个 50 Gbps 的数字数据流。另外，比特要在调制前做预编码，调制后作解码。然后，接收器对进入的 DP-QPSK 信号作解调和解码，产生四个 25 Gbps 的电信号。

QPSK 信号中每符号承载的比特数是 NRZ 信号的两倍。因此，当两种调制所产生的信号通过光纤时，其降级程度也有区别。EXFO Sweden 总监 Peter Andrekson 解释说，QPSK 信号较 NRZ 信号对噪声和非线性相位失真更加敏感。他说：“由于对噪声的敏感度较高，

QPSK 调制信号需要的功率高于 NRZ 信号。”



图 3,用于客户端传输的光收发器是基于针对一个线路卡尺寸以及电气连接的 CFP 多源协议

不过，QPSK 信号也有一个较 NRZ 信号的重要优势。即在相同码率下，它们对于来自色散和群延时的误码不太敏感。这是因为 100 Gbps 数据的一个 UI(单位间隔)宽度为 10 ps。由于线路传输采用的是四个 25 Gbps 通道，因此每个符号宽度为 40 ps，它有较低的带宽。一个 25G 符号/秒流的 40 ps 宽符号比较短，需要的带宽高于一个 10 Gbps、100 ps 宽的 NRZ 信号。因此，25G 符号/秒信号要比 10 Gbps NRZ 信号对色散的误差更加敏感，但对降级的敏感度小于 100 Gbps NRZ 信号。Andrekson 解释说：“在一个确定码率下，复杂性和 SNR（信噪比）以及色散容限和硬件带宽之间存在着一个折中。”

DP-QPSK 技术如此之新，现在还没有用于线路端的收发器模块。Finisar 公司高级技术师 Chris Cole 解释说，线路端的收发模块要大于客户端的模块（图 3），现在正在确定一个多实体协议。Cole 指出，设计者甚至可以将线路端的收发器实现为一个线路卡，而不是模块。

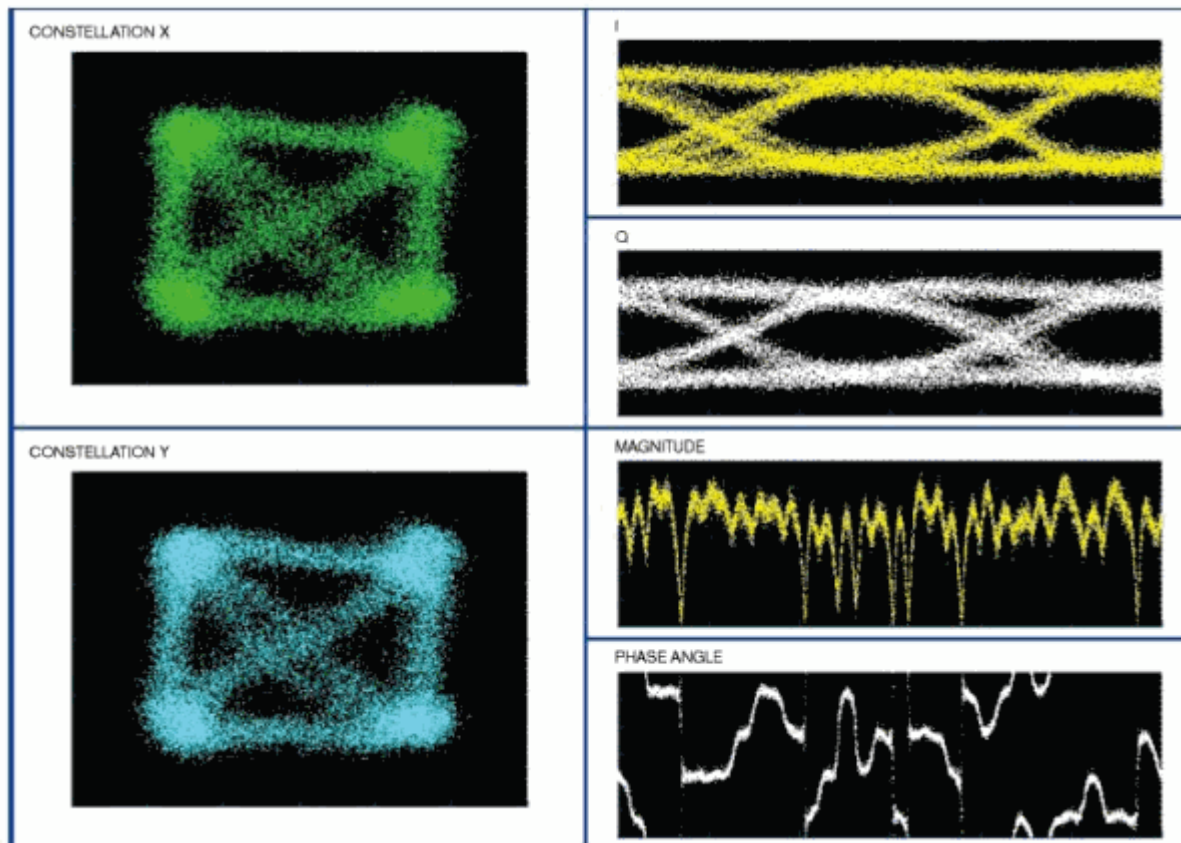


图 4，星座图将成为分析 DP-QPSK 调制信号的一个主流工具

### 测试也要改变

从 NRZ 向 DP-QPSK 调制的转移为光纤前端的测试带来了星座图。尽管星座图在 RF 无线传输中很常见，但对光通信还是新鲜事物。对一个 QPSK 传输做的第一个测量就是星座图。星座图提供了有关传输信号完整性的信息。色散与非线性都可以造成信号的降级，从而产生失真。图 4 表示了一个 DP-QPSK 信号中两极性的星座图。图 4 中，星座的点清晰可见，但经过了太多失真后就可能变得模糊不清。

图 4 中右下角的两个波形显示了经 QPSK 调制的信号波幅（上）和相位（下）。注意相位角图上有明显的不连续。它们源于相移，因为 QPSK 调制中是成对比特的编码。

在测试光 DP-QPSK 信号时，可以使用光调制，或采用一台光信号分析仪。这些仪器可生成星座图，将其解码为电子数据流，并将其显示为眼图。服务于这个市场的公司有安捷伦科技、安立、EXFO 以及 Optametra 公司，而 Optametra 公司的产品采用的是 Tektronix 示波器。

Finisar 公司的 Cole 称：“对 100 Gbps 长程光波还不存在测试规范，因此测试设备制造商必须与光模块制造商交流，看他们需要测量些什么。每家公司都有不同的需求。”Cole 还指出，测试设备必须能支持 28G 和 32G 符号/秒的信号。“现在有可以运行在 22G 符号/秒的 DP-QPSK 测试系统，用于 40Gbps 链路，但新设备要能运行在 28G 和 32G 符号/秒，才能支持 100 Gbps 链路。”

对光收发器接收端的测试更是悬而未决，因为尚不存在对压力接收机 (stressed-receiver) 的测试规范。Cole 称测试设备必须能够生成 DP-QPSK 信号，但这种要求可能产生一些控制缺陷，如色散和极化模式色散。这些缺陷会使 TE 和 TM 载波通过光纤时产生旋转。经过解调和解码后，这些缺陷一定会产生出压力眼图，因此一旦成为电子形式，工程师就可以对其作测量。

图 4 亦显示了两个眼图 (右上角)，表示一个极化的两个 25Gbps 通道。Cole 说：“你还必须看眼图遮罩的余量、抖动，以及消光比；这与 10 Gbps 链路是一样的。”

现在，工程师们可以用示波器和 BER (误码率) 测试仪来分析眼图了。有些工程师会使用高带宽的示波器去捕捉 DP-QPSK 信号。LeCroy 公司的 Schneckner 说：“由于作了调制，接收器处的信号看上去像噪声。信号不再是重复的，因此你需要一台实时示波器。”Tektronix 公司的 Zivny 曾与一些工程师在 DP-QPSK 信号上用过实时示波器。一台四通道示波器就可以看到全部四个有高时基相关性的经解码解调的数据流。

开发 DP-QPSK 收发器的工程师们还用 BER 测试仪为一个 QPSK 信号的每个 I 和 Q 相生成 25 Gbps 的数据流。他们还使用 BER 测试仪测量在已调制和编码信号上的 BER。安捷伦技术公司与 SyntheSys Research 公司的 BER 测试仪最高可以测到 28 Gbps 的数据速率。

今后几年，业界将继续发展 100 Gbps 的线路端传输。测试规范也将出现，光模块制造商会与测试设备制造商及标准化团体合作，确定测试方面的问题，开发出测试例程与设备。

附文 1：一个 G 里有什么？

“100G”、“40G”和“25G”这些术语均指一个光链路中的数据流量。由于格式化和 FEC (前向纠错) 原因，实际的数据流要高于数字所表示的值。

例如，一个 100 GbE (千兆以太网) 传输的数据速率实际上是 103.125 Gbps，但数据流量是 25 Gbps。因此，每个 25 Gbps 的通道上实际为客户端承载了 25.78125 Gbps (26 Gbps)。因此，如果一个测试设备制造商声称自己的产品有 26 Gbps 速度，就意味着该产品覆盖了 25.78125 Gbps 数据速率。另外对于以太网客户端网络，也在考虑一个 27.739 Gbps (28 Gbps) 的数据速率。

对于线路端网络，长距离传输链路需要额外的 FEC。有 7% FEC 的 100 Gbps 链路线路速率大约为 112 Gbps，转换到每个通道上就是约 28 Gbps。根据光互连论坛的“100G 超长距离 DWDM 框架文件”，准确的速率尚未确定。这些传输也可以采用较高的 20% FEC 开销，这样码率会增加到大约 32 Gbps。