



高速 40Gbit/s DWDM 的发展

张宾 胡庚强

烽火通信

【摘要】 本文主要分析了 40Gbit/s DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing, 密集波分复用系统) 的技术难点以及关键技术, 特别是编码与调制、动态色散补偿技术, 简单地阐述了烽火通信在领先的 40Gbit/s DWDM 平台的研发以及工程实用情况。

【关键词】 40G, DWDM, OSNR, PMD, 色散

随着业务的近一步发展, 特别是数据业务对骨干网带宽的拉动, 高速 WDM 技术慢慢的走进了我们的视野, 从 2.5G、10G 的普遍商用, 到高速 40G WDM 迅速发展, 预示着传送网正在跨入了新的纪元。人们已经从当初“该不该发展 40Gbit/s DWDM 技术”的疑惑中走出来, 越来越多的设备供应商以及网络运营商投入到高速率 DWDM 系统的研究和建设中。

诚然, 技术的进步总是伴随着一些新的障碍, 在高速 40G WDM 的发展过程中, 也同样提出了很多新的问题。那些在低速短距离传输可以忽略的因素又开始显现, 而且问题越来越棘手, 例如 PMD (Polarization Mode Dispersion, 偏振模色散)、OSNR (Optical Signal to Noise Ratio, 光信噪比) 容限、CD (Chromatic dispersion, 色度色散) 色散等都成为 40G 发展中非常重要的技术难题。而选择不同的编码方式, 会使系统的色度色散、非线性、信噪比、PMD 都有不同的表现。因此在应用中编码方式的选择显得尤为重要。

1. 编码与调制

传统的 WDM 应用都是 NRZ (non-return-to-zero, 非归零调制) 编码方式, 目前已经得到广泛的商用, NRZ 编码以其实现简单、技术成熟、成本低廉的特点受到了普遍的欢迎, 在 2.5G、10G 系统里尤其如此, 而且在实际的工程中也基本上满足了应用的需求。然而, 速率如果上升到 40G 是不是 NRZ 还适合? 是不是有新的编码方式更适合? 高速 40G WDM 的发展又提出了新的挑战。

可喜的是, 技术进步始终没有停止, 一批批新的编码与调制技术不断涌现, 来解决传送过程中遇到的问题, 包括 ODB (Optical Duobinary, 光双二进制码调制)、CS-RZ (Carrier suppressed RZ Modulation, 载波抑制归零调制)、DPSK (Differential Phase Shift Keying Modulation, 差分移相键控调制格式)、RZ-DPSK、DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying Modulation, 差分正交相移键控调制格式) 等。各种编码有其不同的特点, 有着不同的应用场景, 如图 1 所示。例如, ODB 编码方式有较好的色散容忍性能, 较低的成本, 但非线性和信噪比容忍性能却明显不足, 而 RZ-DPSK 编码方式具有较好的信噪比容限和非线性容限, 但目前成本相对较高。

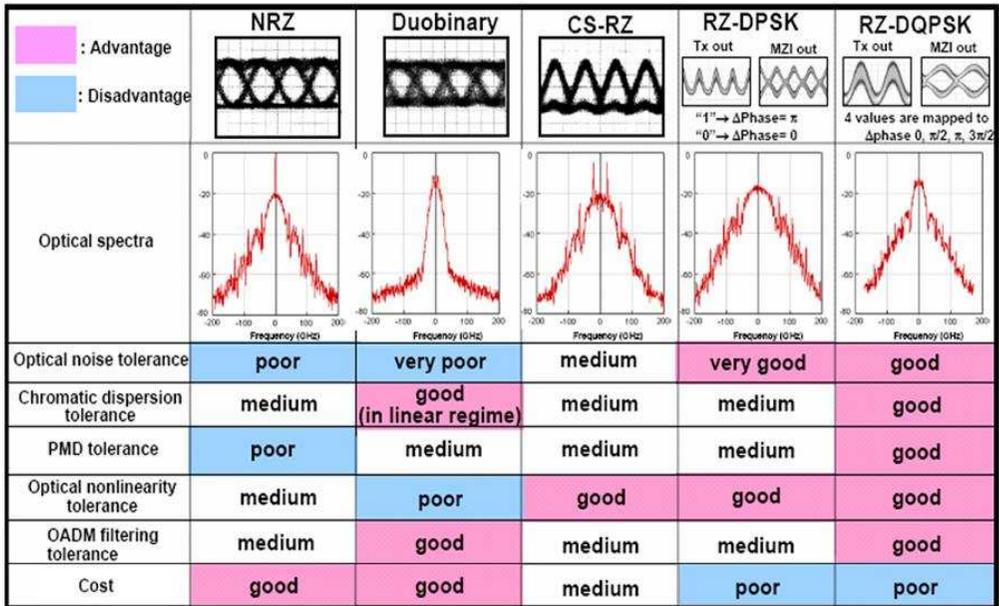


图 1: 编码与调制

诚然，没有哪一种技术或码型具有绝对的优势，在具体的应用当中，需要关注各个方面指标的性能，包括 OSNR、成本、PMD、波长间隔、非线性抵抗能力、CD 色散容限、等进行综合考虑，没有最好的编码方式，只有更适合的编码方式。

在 40G 长距离传输系统中，合适的编码方式可以提高系统的容忍能力，降低对系统的性能要求，但对于长距离 40G 传输系统来说，OSNR 劣化仍是其不得不面对的技术难题。

2. OSNR 的挑战

OSNR 是光层一个非常重要的指标，特别对于近似模拟系统的波分来讲，OSNR 很大程度上决定了信号的传输质量。高速 40G WDM 也不例外，OSNR 指标同样对其有着至关重要的影响。相对来说，40G 速率更高，接收机带宽是 10G 系统的 4 倍，理念上要求 40G 比 10G 有 6dB OSNR 的余量。以普遍商用的 10G WDM 系统为例，在采用 NRZ 编码方式下，国标中要求 10G 速率的 WDM 系统采用 SFEC (Super Forward Error Correction, 超强前向纠错) 时，OSNR 大于等于 18 dB，意味着在 40G WDM 系统中，在采用 SFEC 情况下，至少要求达到 24 dB 的 OSNR。显然，在网络中要达到如此高的 OSNR 要求是比较困难的，特别对于普遍建设的一干系统来讲，很多长距离、大跨段 10G WDM 已经在 18—20 dB 左右。40G WDM 如何大规模地组网应用成为一个非常重要的难题。烽火通信早在 2003 年就开展了相关的研究，通过几年的努力，在大量仿真实验以及工程经验的基础上，目前主要有通过引入新的编码与调制格式来降低系统的 OSNR 容限，采用低噪声放大器提高系统的 OSNR 等。

另外，WDM 传输系统除了要考量 OSNR 值，还要考虑系统色散，在 40G 高速率传输系统中，由于色散容限的降低，使得色散成为制约 40G WDM 系统长距离传输的重要因素。

3. CD 色散的挑战

CD色散也是影响WDM系统的一个非常重要的因素，在2.5G升级到10G WDM系统当中，当时色散被认为是主要的技术难题，人们通过增加DCM补偿的方式进行解决，而且从近几年10G WDM系统的商用情况来看，DCM (Dispersion Compensator Module, 色散补偿模块) 补偿方式非常成熟，实际的运行效果也很好。40G WDM相对于10G WDM系统速率上升了4倍，色度色散再次成为阻碍其发展的重要因素，单单采用传输的DCM补偿方式已经很难适用40G WDM的发展。以NRZ编码的40G WDM系统为例，典型的色散容限为60ps/nm·km，如此小的色散容限如何进行长距离传输，成为摆在40G WDM发展过程中必须克服的难题。目前来看，比较可行方案的主要是采用两级补偿的方式，DCM补偿和TDCM (Tunable DCM, 可调色散补偿) 补偿相结合的方式。第一级粗补偿，采用DCM的方式，和10G WDM系统类似，第二级采用TDCM精确补偿方式（主要通过光纤光栅实现）。在实际的系统设计当中，通常要求第一级DCM补偿之后在整个C波道的各个波长的残余色散在800PS之内，再次通过TDCM来进行每个波道精确调节。目前技术的发展焦点集中在自动色散补偿的方式上，烽火通信2005年完成上海—杭州首条40G WDM工程后，一直在推动40G WDM的发展，包括现在所正在进行的自动可调色散补偿功能的开发，致力于为用户提供完善的、全面的40G WDM解决方案。该方案在系统接收末端配置可调色散补偿器件即TDCM板卡，利用TDC (Tunable Dispersion Compensator, 可调色散补偿) 器件对分段固定光学补偿后的残余色散进行精确管理。带有FEC功能的OTU板卡都可以进行FEC (Forward Error Correction, 前向纠错) 的0纠错和1纠错计数，对这两种纠错计数的实时统计信息可以通过板卡间CPU接口单元通信告知TDCM板卡，TDCM板卡接收到此信息后可以按照预设的色散调整步进对色散补偿量进行调整，整个调整过程如图2所示。接收OTU板卡对线路侧O/E转换后的信号进行FEC解码，利用解码芯片提供的纠错计数可以大致判定当前线路的色散是属于过补还是欠补，并根据纠错信息由CPU接口单元控制TDCM单元进行补偿调节，一直到线路侧FEC纠错消失即线路色散补偿量与线路色散量达到匹配。

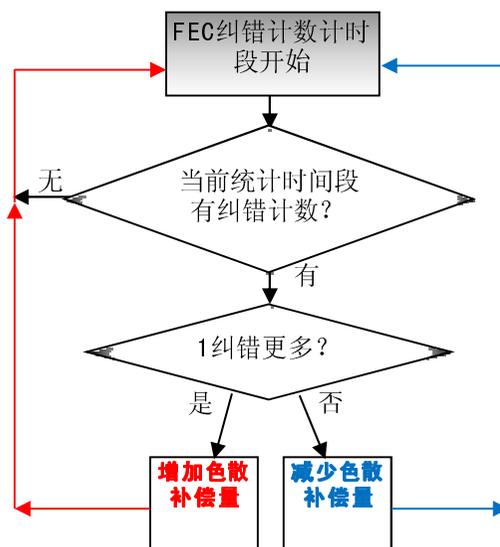


图 2：纠错计数控制 TDCM 调整流程图

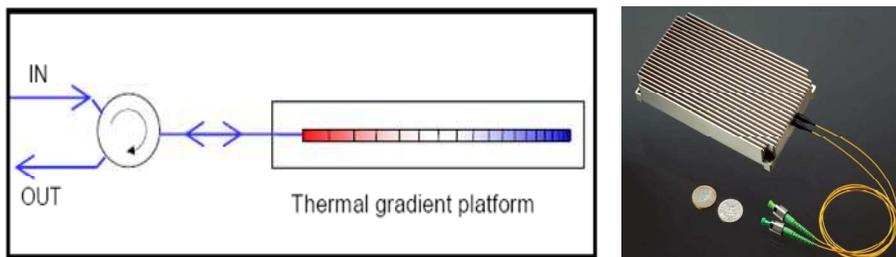


图 3: TDCM(可调色散补偿)

在 40G 波分系统中,除了信噪比和色度色散等制约因素外,原本在 10G 系统中并不为人所关注的 PMD,由于 DGD 容限的降低,使得人们不得不重新审视 PMD 对于 WDM 系统性能的重要影响。

4. PMD 的挑战

PMD 一直被认为是限制通信系统的非常重要的因素,特别是对高速 WDM 系统,问题显得很突出。理论上讲,为了保障传输系统,PMD 容限为脉冲周期的十分之一。

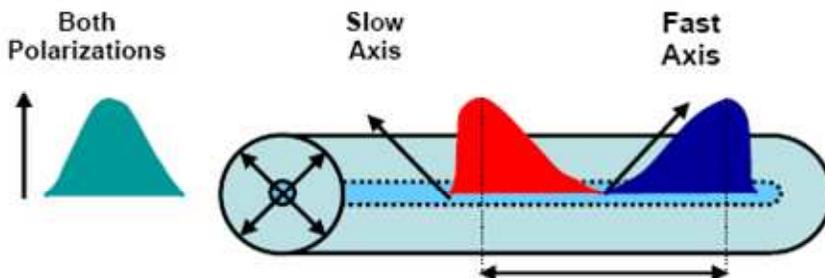


图 4: PMD 产生机理

对于 40G WDM 来讲,当采用 NRZ 编码时,其平均 PMD 容限大约为 2.5PS。如此小的 PMD 容限如何适应长距离的传输?目前来看,可行的解决方法通常有三种:一是从源头上解决问题,采用新的光纤光缆来承建 40G WDM 系统,一般来说 2005 年以后铺设的光缆的 PMD 值都很小,能够满足 40G WDM 系统的对 PMD 指标要求,特别是 G.652D 和 G.655D 光缆;二是采用新的技术来提升系统的 PMD 容限,包括特殊的编码与调制技术,如 DPSK、RZ-DQPSK 等来改善系统对于 PMD 的适应能力;三是采用 PMD 补偿技术,目前来看,研究的重点主要集中在光域的 PMD 补偿,电域的 PMD 补偿、光电混合的 PMD 补偿,基本原理是通过检测输入信号的 PMD 状态,与理想状态相比较的差值作为控制信号来改变 PMD 控制器的状态,从而将输入信号偏振状态调整到正常状态。PMD 补偿技术多停留在实验阶段,大规模的工程应用目前看来困难重重。烽火通信一直致力于 PMD 补偿的研发,目前研究的重点主要集中在一阶的 PMD 补偿,从而使系统获得更远的传输距离以及更大的传输容量。

此外,40G WDM 技术上还面临着 40G 放大技术、40G 的成帧、FEC/SFEC 的实现等,不过随着技术的进步以及时间的推移,实现的方案越来越成熟。

烽火通信一直致力于大容量 DWDM 系统的研究，早在 2005 年在和中国电信合作，成功开发出了 3.2T (80×40G) DWDM 平台，并在国内首次成功实现了工程应用。充分显示了烽火通信在光通信领域的技术领先水平，在国内首次采用 NRZ 码进行 40Gb/s DWDM 传输；国内首次将喇曼光纤放大器技术成功应用于 80×40Gb/s DWDM 系统，在 40Gb/s DWDM 系统中的精确色散管理、分布式喇曼放大和不等跨距的分布式喇曼放大的 OSNR 分析软件等方面具有多项创新，上海至杭州 40G WDM 工程加载了实际业务，全线运行稳定，填补了国内空白。

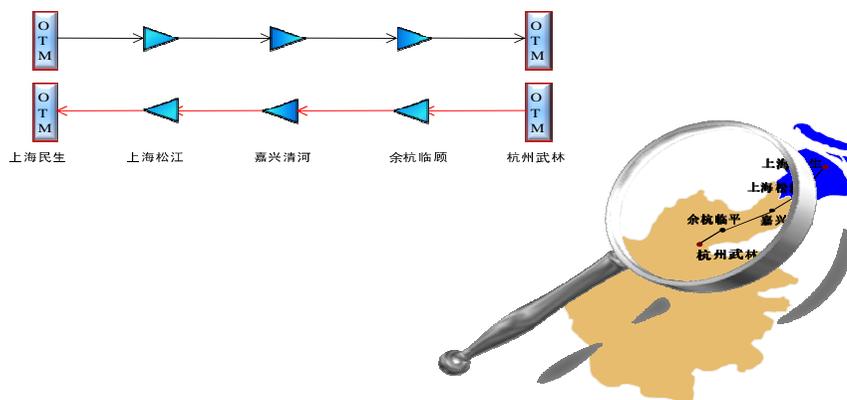


图 5：上海至杭州 40G WDM 工程

目前烽火公司主要对 40G WDM 高速平台系统进行完善，包括新型的编码与调制方式、自动色散补偿的实现，随着国内需求的进一步启动，基于 40Gb/s 系统的超高速超大容量光传输技术，将大大改善通信网的结构，将使传输系统带宽快速扩展，满足社会信息传输需求，并将产生巨大的社会效益和经济效益。

参考文献

1. YD/T 5092-2000 《长途光缆波分复用(WDM)传输系统工程设计暂行规定》
2. YD/T 1274-2003 《光波分复用系统(WDM)技术要求-160×10Gbit/s, 80×10Gbit/s 部分》
3. ITU-T G.652-2005 《Characteristics of a single-mode optical fibre and cable》
4. ITU-T G.655-2003 《Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable》
5. 黄章勇. 光电子器件和组件. 北京: 北京邮电大学出版社
6. 胡先志, 张世海, 陆玉喜. 光纤通信系统工程. 第一版. 武汉: 武汉理工大学出版社,
7. Michael bass. 光纤通信—通信用光纤、器件和系统. 第一版. 北京: 人民邮电出版社,