

骨干传送网架构的演进 超 100G 和香农极

自电信网络产生开始，骨干传送网便随之产生。1877 年，在贝尔发明电话后的第二年，波士顿和纽约架设的第一条电话线路开通了，两地相距 300 公里。1901 年，在“马可尼无线电报有限公司”成立后 4 年，在英国与纽芬兰之间，实现横跨大西洋的无线电通讯，距离超过 3000 公里。经过 100 多年的网络变迁，骨干传送网的发展已经到一个新的高度，线路速率从 64Kb/s 提升至 8Tb/s，传送距离从数百公里提升至上万公里，成为连接全球通信网络的纽带。本文将从业务变化角度分析骨干网的挑战及发展趋势。

1、业务和网络的变迁

从传统意义上看，通信网承载的业务主要包括固定电话业务、无线电话业务及数据业务。20 世纪 60~80 年代，得益于数字通信、计算机技术等的发展，通信业务和网络完成了第一次变革，逐步从军用扩大到民用。进入 90 年代后，以 PSTN、GSM 为核心业务的通信网，取得了飞速的发展。这个阶段，业务速率以 2Mb/s 等低速为主，业务接口多元化，网络模型为逐级汇聚交换的层次化结构，并同时表现为一种业务一个网络的烟囱结构。骨干传送网在网络中的主要作用是提供长途交换局之间的连接。由于业务模型决定了长途局之间的流量流向是可规划、可控的，因此骨干传送网主要承载基于规划的 P2P 流量，并在网络上对这些流量进行汇聚和分插复用。此时，PDH、SDH 技术顺应了业务发展的要求。

进入 2000 年，以 ALL IP 和移动业务为核心的第二次通信业务变革，在新的 10 年中逐步完成。在此期间，网络架构逐步完成了 IP 化，从而实现了烟囱网络的融合和网络层次的扁平化。同时，在 3G 的带动下，移动业务快速崛起，固定电话业务逐渐衰退。互联网业务在 ALL IP 的推动下迅速发展，并历经了从 FTP 到 Web、P2P 等业务模式的变迁。这个阶段，业务速率逐步提升到 10M、100M，业务接口逐步统一到 Ethernet/IP，网络模型演变为 Client-Server 的结构。骨干承载网由多种核心网业务承载至 PDH、SDH 开始转变为统一的 IP 承载。由于互联网数据业务流量占比的快速提升，骨干网流量流向趋于离散，并受 IP 技术影响转为不可控。此时，IP 承载成为骨干网的主要承载技术，骨干传送网转为解决大带宽、长距离的底层物理组网问题，DWDM 技术逐步成为骨干传送网的主要选择。

21 世纪第二个 10 年，我们开始经历通信业务的第三次变革。以视频、云计算驱动的业务和网络架构变化正在酝酿，去电信化、IT 化成为新的方向。首先，以 OTT 为主的视频流量成为网络的主导流量，带来了低收敛、扁平化的网络需求，致使带宽增长数十倍，驱动业务速率向 Gb/s 演进，流量大型化成为趋势。其次，网络模型开始向云数据中心—本地/前端数据中心&CDN—用户的架构转变，一定程度上缓解了骨干网的流量压力，流量开始重新集中化。第三，计算机技术进一步发展，软件定义网络（SDN）等前沿技术不断涌现。软件的作用也被提升到前所未有的高度。目前，这些正在发生的变革对骨干传送网的冲击还没有完全明确。但一个架构融合的、可重构的、拥有超级带宽和强大软件功能的骨干传送网应该是我们目前可以看到的方向。

网络变迁	早期通信时代	数字通信时代	IP化通信时代	IT化通信时代
业务变迁	军用业务、模拟电话	PSTN、GSM、FTP	VoIP、3G、Web/P2P	Cloud、OTT、LTE
业务模型	点对点	逐级汇聚交换	离散、无序	部分集中
骨干网络架构	PDH	SDH	IP+DWDM/OTN	SDN

2、骨干传送网的发展本质上是光、电产业链的更迭和钟摆式上升

自 2000 年以后，骨干传送网的发展开始聚焦到 DWDM 技术的发展上来。1990 年代中期，DWDM 单波以 2.5G 速率为主；2000 年左右演进至 10G；2008~09 年，40G 开始规模部署；而当前 100G 时代已经到来。这个过程中，决定性的因素其实是每 bit 传送成本。事实上，骨干网流量对带宽的诉求一直成指数增展，近年需求还有不断增加的趋势。而我们看到骨干网速率提升却不是线性发展的，可以说在整个 21 世纪前 10 年，骨干网速率的提升是较慢的，我们可以看到运营商在部署一个又一个完全重叠的 N*10G DWDM 骨干平面。直到 100G 的到来，骨干传送网才重新获得了腾飞的动力。归根到底，这和 DWDM 产业链的发展有不可分割的关系。

在 2.5G、10G、40G 波长时代，技术的进步主要取决于光技术的更新。到了 40G 时代，由于编码、调制等技术的不统一，以及光器件自身的高技术门槛和发展周期，导致整个成本的下降趋缓，产业链的投入也比较发散。因此，我们可以看到 40G 的应用一直比较迟缓。

然而业务的对流量的渴望无法允许技术的停滞。为解决光技术突破周期长的问题，引入电处理就成了一个解决办法。100G 时代最大的突破，是引入了相干光技术和 DSP 技术，而这两者又是相辅相成的。相干光使 100G 调制技术统一到 QPSK，并彻底解决了色散和 PMD 的物理限制。而这一切都得益于 DSP 的强大的信号处理能力，也就是借助电产业链去提升光产业链的能力。并使业界原本发散的研究方向，集中到相干 DSP 芯片和 FEC 算法等领域的投入上来。所以，我们看到，DWDM 在 100G 时代的性能、成本改善非常迅速，并促进运营商网络快速切换到 100G 平台。

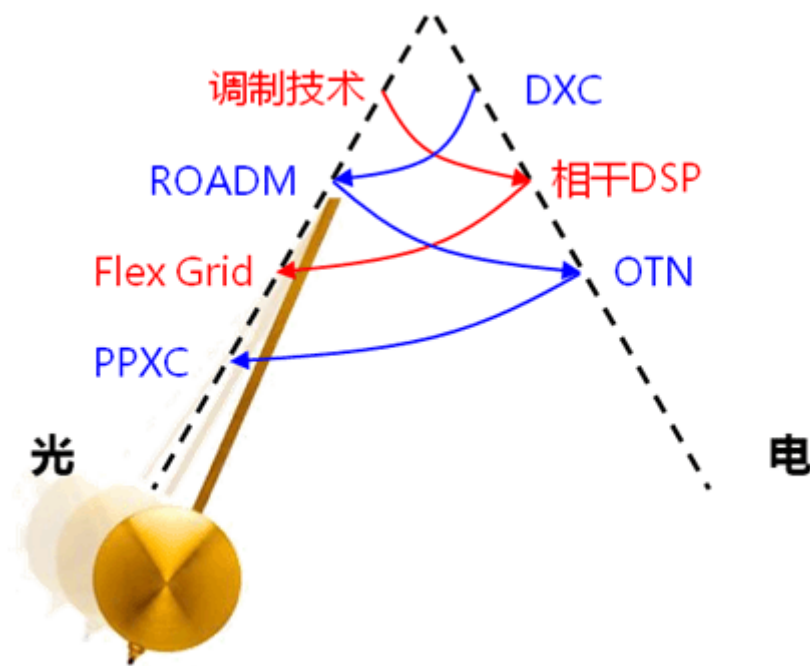
当然，我们现在再回顾骨干传送网的发展历史，才会发现这个“钟摆”式上升的规律。也就是光—电—光循环演进的规律。这个 8~9 年的周期目前已到了一个新的转变阶段。随着超 100G 的发展和流量对成本的苛刻诉求，光技术又面临新一轮的突破。如 Super Channel、硅光等新技术的兴起，代表下一个光时代即将到来。

在交换领域也遵循着类似线路领域的规律。早在 2000 年通信泡沫阶段，光交叉的概念就已经被热炒，当时主要是基于 MEMS 的 OXC 方案。由于其应用场景、技术实现都没有完全理清，加之泡沫破灭导致需求回归理性，因此，在 21 世纪早期，仍由 SDH/DXC 完成该网络部件的功能。自 SDH 骨干网发展为 IP+DWDM 骨干

网后，DWDM 曾一度沦为纯线路技术，也就是不参与组网，仅提供 P2P 连接。但这也带来了业务疏导、承载效率和管理的问题，因此骨干传送网的交换技术在 DWDM 系统上也应运而生。2004~06 年，以 FOADM、ROADM 为代表的光交换技术在 DWDM 系统上商用。受业务模型影响，具备交换能力的 DWDM 系统首先在城域应用，然后逐步延伸到干线领域。

随着 IP 化的深入发展，传统的 FOADM、ROADM 越来越不适应业务的变化。其较大的交换粒度和较高的器件成本，决定了应用场景相对受限。与此同时，基于 OTN 的电交换技术开始飞速发展。网络化的 DWDM 系统需求和分组技术的引入，使基于电交换的 OTN 价值凸显。目前，正是 OTN 部署的黄金时代，其与分组交换技术的融合也成为行业的共识。

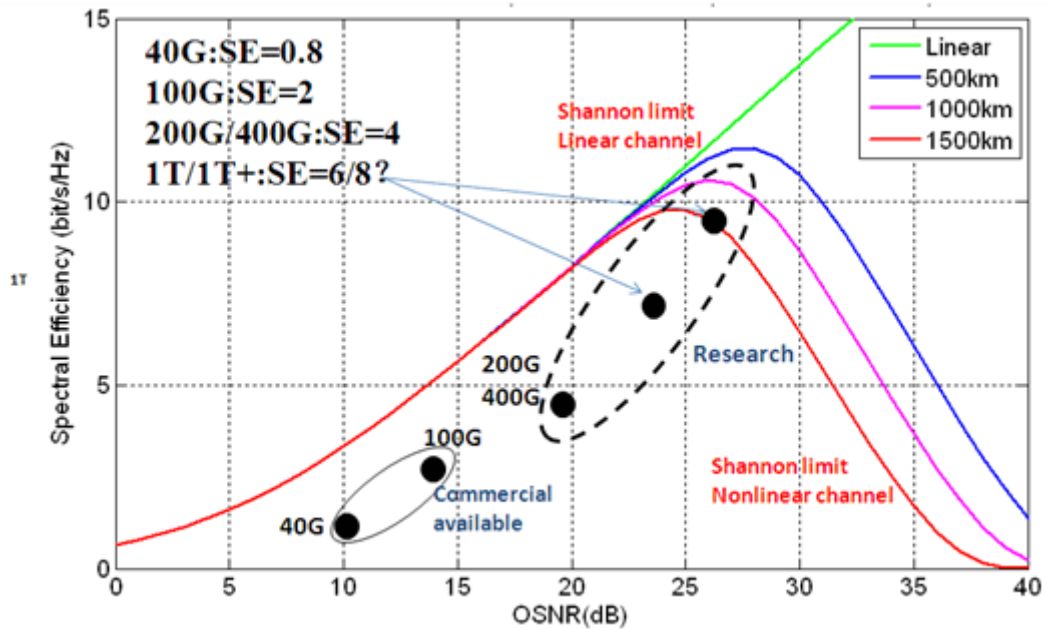
交换技术的未来发展，也不可避免的将回到“钟摆”模式。目前，大家都在等待光技术的突破。电交换在容量和功耗上会遇到电子瓶颈，必须依赖光技术来解决。PPXC 等前沿技术，有可能是下一个周期内全光交换的主导者。



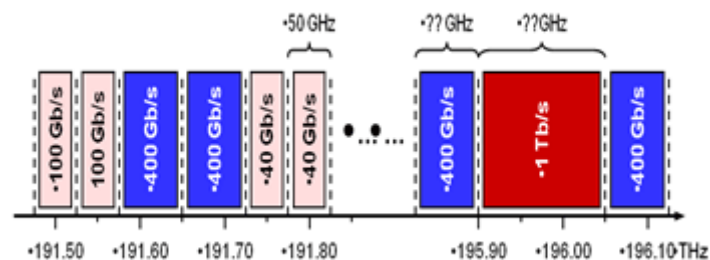
纵观骨干传送网架构的发展，是一系列技术进步的组合，而不是单点的演进。光领域技术更迭的长周期特性，导致了必须依赖电领域的快速技术进步来促进整体技术的发展。这也就是我们前面提到的“钟摆”模式。在可以看到的未来，这个趋势还会更加明显。下文，我们再进一步阐述骨干传送网在线路技术、交换技术和软件技术等领域的发展。

3、线路技术的发展，超 100G 和香农极限

骨干网线路技术一度沿着 SDH 155M→622M→2.5G→10G, DWDM 2.5G→10G→40G→100G 的规律发展。当单波速率超过 100G 后, 规则开始改变。近 20 年来, 业界一直致力于提升单波速率和缩小单波谱宽, 以换取在光纤可用频谱内最大的传送带宽, 并通过编码、调制、补偿等技术的进步来克服衰减、色散、PMD、OSNR 等的物理层性能影响。



实际上, 抛开错综复杂的技术, 骨干传送网的本质是在指定的频谱和距离内传送更多的信息。而这受香农定理的制约。【香农定理: 描述了有限带宽、有随机热噪声信道的最大传输速率与信道带宽、信号噪声功率比之间的关系。在有随机热噪声的信道上传输数据信号时, 数据传输率 R_{max} 与信道带宽 B , 信噪比 S/N 关系为: $R_{max}=B \cdot \log_2(1+S/N)$ 。】因此, 要提升传送容量, 要么使用更多的频谱, 要么降低对噪声的容忍程度。在光纤传送系统内, 当前 100G 系统使用 50GHz 的谱宽, 采用 PDM-QPSK 调制, 在 2000km 传送距离上的频谱效率约 2b/Hz。如果要提升至 200G, 在同样谱宽的效率就需要达到 4b/Hz, 需采用更高阶的调制如 16QAM, 传送距离相应会缩短至约 1500km 以满足 OSNR 的要求, 这也符合香农定理的约束。在当前商用的技术条件下, 4b/Hz 的传送效率已经开始逼近香农极限。要传送更高的速率, 要么用更宽的频谱, 要么传更近的距离, 最终取得一个平衡。当前我们已经看到运营商在进行单波长 2T 的传送实验, 在 375GHz 的谱宽内传送 2T 信号, 采用 16QAM 的编码, 在约 1500km 光纤内获得了 C 波段 21T 的容量。



因此，从 100G 时代开始，传送的规则已经开始改变。从追求频谱效率的提升开始向追求系统总容量改变，Flex Grid 将成为速率提升的关键。此外，从香农定理可以看到，OSNR 成为另一个决定因素。基于软判决的 FEC 成为业界研究的主要方向，用以改善系统对噪声的容忍程度，以获得更长距离的传送性能。因此，软件算法也成了光领域的追逐对象。

4、交换技术的发展，自由网络

骨干网交换技术发展的精彩程度一点也不逊于线路技术。交换技术与线路技术一样，都是骨干传送网的核心组成。只要骨干网业务模型是离散的，业务速率是不统一的，交换技术就有应用价值，用以实现业务的疏导、调度、整合、复用/解复用等。其目的是构建一个对业务自由的网络。

早期骨干传送网的交换是基于 DXC 的电交换，目的是完成多种级别低速信号的调度，期间 OXC 曾短暂的兴起。在 ALL IP 时代，IP Router 完成了大部份的交换功能，DWDM 退缩为线路技术。这种架构很大程度上限制了网络的自由性，所有业务必须逐站上下来完成整合，极大的增加了网络的成本。FOADM 技术出现，一定程度上降低了 DWDM 系统的复杂度。但 FOADM 的缺点是不灵活，在业务调整 and 变化时限制很大。因此，ROADM 随之产生。可以说，ROADM 在很大程度上使 DWDM 系统和上层业务设备解耦，业务传送不再受限，并让 DWDM 从 P2P 的线型结构重回网络化的结构。目前无色 (colorless)、无方向 (directionless)、无阻 (contention less) 成为研究的热点，CDC ROADM 可以构建一个完全意义上的无阻塞光网络。未来，PPXC 等更大容量的光交换技术也会逐步走向商用。

第三代：无阻塞 ，ROADM(CDC)	•40G/100G (相干) •Contentionless <i>Any combined waves to any ports</i>
第二代：动态 ，ROADM(CD)	•10G/40G (非相干/相干) •Directionless <i>Any wave to any direction</i>
第一代：固定 ，FOADM •2.5G/10G •Directioned & Colorled <i>Fixed wave to fixed direction</i>	•Colorless <i>Any wave to any port</i>

ROADM 代表了典型的光层交换网络，其特点是容量巨大 (当前 9 维 ROADM 交换容量可达 72T)、功耗低，但缺点是成本高、无法处理小颗粒业务。因此，电交换就成了不可缺少的补充。OTN 作为骨干传送网的电交换架构，前后经历了近 10 年的坎坷发展。由于 ROADM、SDH、IP 分别覆盖了波长级、155M~2M 级别、IP 包级别粒度的交换范围，留给 OTN 这类子波长级别的交换场景一度较少。随着 40G、100G 等线路速率的不断提升，而客户侧速率仍停留在 GE、10GE 时代，速率差导致 OTN 调度的需求越来越强烈。因此，自 2010 年开始，OTN 在全球的部

署进入高速增长阶段。同时，OTN 技术也在不断的发展。ODU flex 技术使 OTN 的粒度更加灵活。同时，OTN 交换也开始融合 SDH 交换和分组交换，极大的增强了 OTN 的生命力。

5、软件的价值，网络的自觉

在谈到软件对于骨干传送网的价值时，我们不得不去面对这个网络自觉的命题。当前骨干网最新、最热的网络自觉，就离不开 SDN 了。自 2008 年从斯坦福大学提出 OpenFlow 以来，SDN 的原始诉求是解决网络复杂、封闭的问题，推进网络的开放和标准化。但事实上，这是一次网络彻底自觉的开始。SDN 带来标准化的底层网元、独立和集中的控制器和面向应用开放的 API，将软件能力彻底从设备层面解放出来，获得与硬件同样甚至更广的发展空间，可以预见将极大的推动网络的智能化。对于骨干传送网而言，在 ASON 时代打下的良好基础有助于传送网快速走向 SDN。预计基于 PCE 的技术在 1 年内将商用，并成为传送 SDN 的基础部件，给骨干传送网带来网络虚拟化、应用层与网络层协同等全新的功能。

骨干传送网的技术演进已到了一个全新的高度。未来，基于超 100G、大容量 OTN、全光交换和 SDN 的技术进步必将推动骨干传送网持续发展。

作者 1：郑波（中讯邮电咨询设计院有限公司高级工程师）

作者 2：翟丽平（华北水利水电学院讲师）