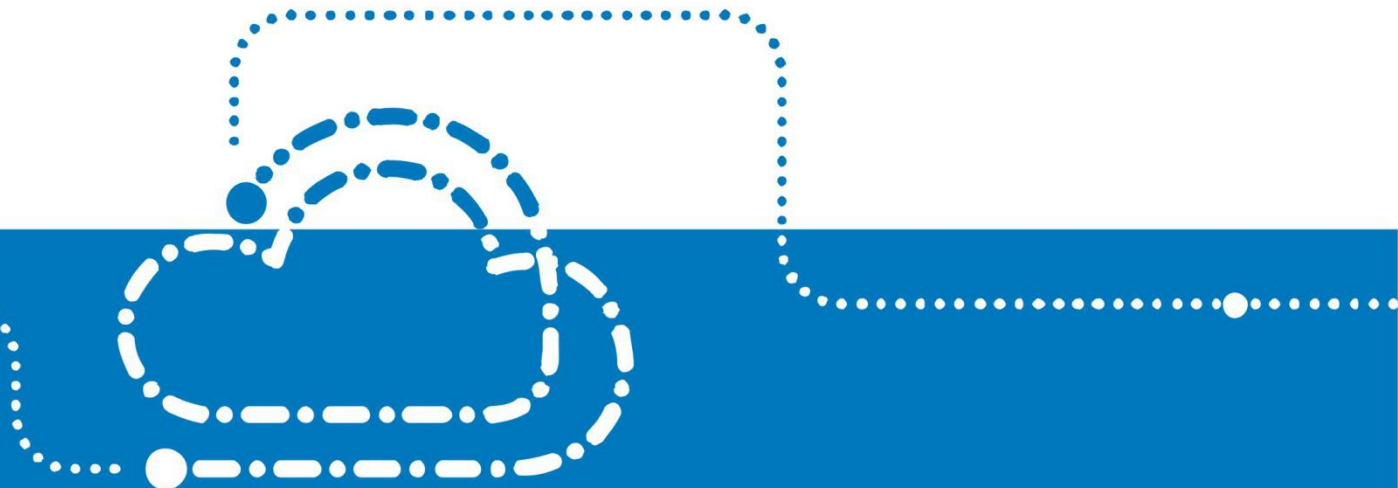


ZTE中兴

400G+技术白皮书



400G+技术白皮书

版本	日期	作者	审核者	备注
V1.0	2021/07/13	ZTE	ZTE	首次公开发布

© 2021 ZTE Corporation. All rights reserved.

2021 版权所有 中兴通讯股份有限公司 保留所有权利

版权声明:

本文档著作权由中兴通讯股份有限公司享有。文中涉及中兴通讯股份有限公司的专有信息，未经中兴通讯股份有限公司书面许可，任何单位和个人不得使用 and 泄漏该文档以及该文档包含的任何图片、表格、数据及其他信息。

本文档中的信息随着中兴通讯股份有限公司产品和技术的进步将不断更新，中兴通讯股份有限公司不再通知此类信息的更新。

目录

1 引言	4
2 400G+技术和方案	5
2.1 400G+技术	6
2.1.1 前向纠错 (FEC)	6
2.1.2 波特率和高阶调制方式	7
2.1.3 偏振复用	8
2.1.4 特种光纤	8
2.1.5 波道扩展	9
2.2 400G+方案	9
2.2.1 400G PM-16QAM	11
2.2.2 400G PCS-16QAM	12
2.2.3 400G PM-QPSK	12
2.2.4 600G PCS-64QAM	12
2.2.5 800G PCS-64QAM	13
2.2.6 1.2T PCS-64QAM	13
3 400G+ OTN 架构	14
3.1 超 100G OTN 映射和复用	14
3.2 Flex ROADM	16

4 400G+网络和设备	17
4.1 400G+网络架构.....	17
4.2 400G+交叉连接.....	18
4.3 400G+控制管理.....	19
4.3.1 路由和频谱管理.....	19
4.3.2 控制平面技术.....	20
5 400G+标准进展	21
5.1 ITU-T 标准进展.....	21
5.2 IEEE 标准进展.....	21
5.3 OIF 标准进展.....	21
5.4 CCSA 标准进展.....	22
6 中兴通讯的 400G+概况	22
7 总结	25
8 参考文献	25
9 缩略语	26

1 引言

高速光传输系统是全球电信网络的骨干，将世界的每一个角落的人们连接在一起。从主流科研机构和设备厂商的研发情况显示，20年间，光通信单通道速率从开始的2.5Gbit/s，到现在400Gbit/s和800Gbit/s，单纤系统容量更是增加到了48Tb。但这仍然不够，随着5G，云计算和AI时代的来临，每年网络流量的需求也急剧增加，主流运营商正在推进更高速率的网络以满足日益紧迫客户的带宽需求。

全球范围内的数据中心扩建推动了数据中心内部对于400G光模块的需求。数据中心之间的连接网络，干线和城域网络系统容量的增加推动了对400G相干产品的需求。Omdia预计从2021年开始400G发展会进入一个加速期，在2024年左右与100G/200G的市场规模相当。在2025年超过100G/200G市场规模。同时，800G相干产品也开始出现，并快速发展。

Coherent Ports by Maximum Data Rate

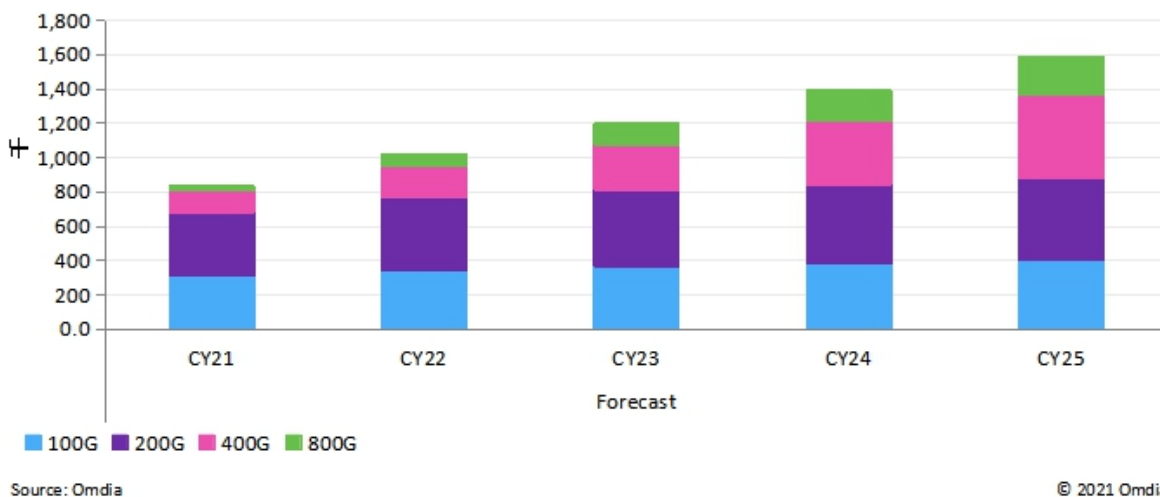


图 1 400G+发展预测

自1985年成立以来，中兴通讯一直走在光传输技术的前沿。早在2011年中兴就开始400G+的实验室测试，多年来，中兴通讯一直致力于推动400G+成熟技术在DCI/城域/长距领域传输的应

用，并不断研究其它新型调制技术的可实现性及其极限应用。

本白皮书将系统性陈述中兴通讯在超高速光传输技术方面的观点。在本白皮书的第二节，对400G+技术和方案，做个详细的介绍；在第三节讨论400G+技术新的OTN架构；第四节介绍了400G+网络的关键的元素和设备；第五节介绍了400G+标准进展；第六节介绍了中兴通讯在400G+方面的发展概况。

2 400G+技术和方案

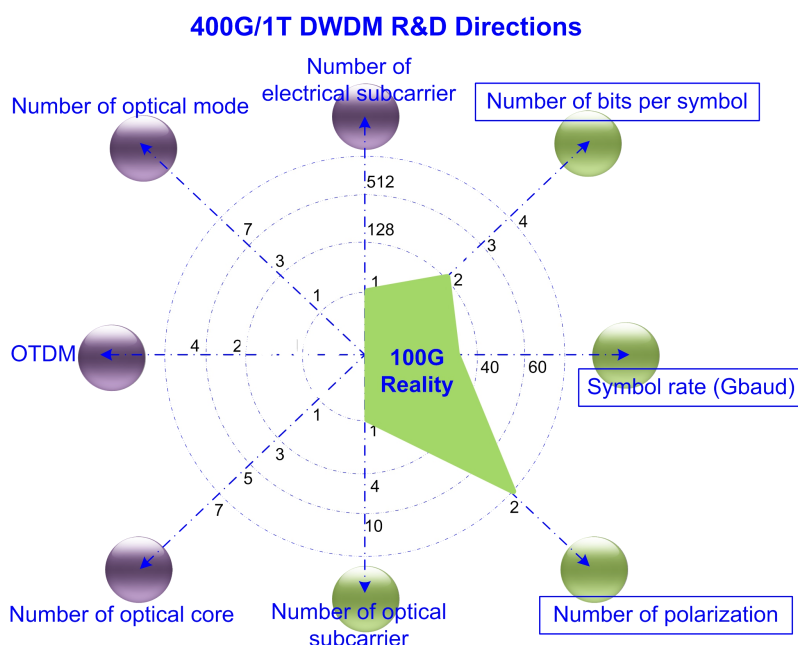


图 2 400G+技术研究发展方向

图 2 显示 400G+的发展方向和研究成果。这些研究都在积极寻求容量、数据速率和光传输距离之间的平衡，在综合考虑性能与成本方面的因素后，希望最终形成行业共识，得到可规模生产的系统方案。

2.1 400G+技术

对高容量的需求驱使光传输技术接近甚至达到通信系统的理论极限，称为非线性香农极限，这是由克劳德·香农于1948年在贝尔实验室中提出的香农极限，以适用于光纤传输系统的进一步演进。非线性香农极限为存在噪声的非线性光纤提供一个可获得的信号速率上限。是一个考虑了光信噪比（OSNR）和脉冲畸变等光纤非线性因素可获得的系统最终信息容量。

整个通信工业界，包括中兴通讯在内，都花费了大量的时间和精力来提高系统性能，高的数据速率和高噪声容忍度（低 OSNR 容限）。下面介绍用于 400G+领域提高系统性能的技术。

2.1.1 前向纠错（FEC）

FEC 在卫星通信和海底通信系统等噪声影响显著的系统中得到了有效应用。FEC 的性能通过其编码增益（低的噪声容限）和开销来衡量，即在给定信号速率下，在线速率增加和高噪声容忍度带来的低的 OSNR 之间取个平衡。

FEC 在光纤传输中的应用起源于 1991 年，写入 ITU-T G.709 “光传输网络（OTN）接口”标准中。在以后的标准中，都定义了供应商可选择的 FEC 算法和开销。FEC 从时间和性能上先后经历了三代。采用传统硬判决码、综合应用级联、交织、迭代译码等技术的硬判决级联码、最先进的软判决解码技术。

中兴通讯考虑互联互通和性能的平衡，支持标准的 15% 的 OFEC。但在长距的应用场景下，中兴通讯依然会采取更高的开销的 FEC 以获得更好的 OSNR，例如 20% FEC、27% FEC 等，但无法保证普遍的互联互通，只能保证收发同型号的互联互通。

2.1.2 波特率和高阶调制方式

信号波特率增加是一个在给定的光谱宽度下提高系统容量的经典方法。与电信号相比光纤容量可视为“无限”的，所以在 100G 波分复用（WDM）技术应用之前，频谱效率在光纤通信中并未被重视。现在随着光纤可利用的频谱将被耗尽及 5G，云计算及 AI 等带来的流量快速增长压力及降低开通运维成本的压力，提升系统容量的需求越来越迫切。信号波特率的提升可以提升传输速率，从而提升单纤系统容量。随着芯片加工技术从 16nm 提升到 7nm 和 5nm，光器件以及光电/电光转换器件的波特率也从 32Gbaud 提升到 64+Gbaud、90+Gbaud 和 120+Gbaud。各厂家采用光电/电光转换器件及 FEC 算法不同，波特率也会有一定差异。随着波特率的提升，相应的单通道传输速率从 100G 提高到 400G，800G 和 1.2T。

在一个较窄的光谱频带上维持必须的通道带宽需要更复杂的调制格式。这往往要增加设备复杂度，同时也降低了信号的噪声容忍度（更高的 OSNR 容限要求）。在相同的 32G 波特率情况下，16QAM 需要的光信噪比（OSNR）比 QPSK 高 4.8 dB，随着其星座图上星座点数的增加，需要的光信噪比也将呈指数急剧增加。因此 16QAM 或更高阶 QAM 的传输距离将进一步受限。图 3 展示一些 QAM 的调制星座图。

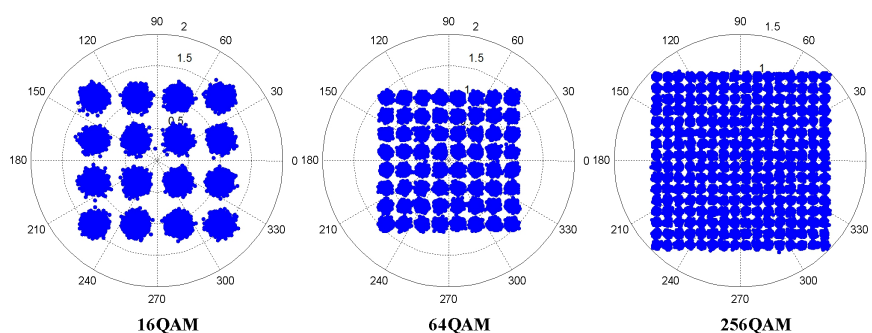


图 3 16/64/256 QAM 信号星座图

在有限的带宽约束范围内，中兴通讯也在数据速率和高阶调制模式之间寻求平衡，技术路线包

含概率整形、混合调制等，其目的均在于在有限的带宽条件下，获得更好的传输特性，并降低模块的平均占有成本。

2.1.3 偏振复用

在 OIF 多源协议中规范 100G 商用系统调制格式为 PM-QPSK，使用了偏振复用。偏振复用基于光在光纤中传输有两个彼此不互相干扰的独立并正交的偏振状态，PM-QPSK 将激光器发出的光分成两个偏振态分别调制，送到光纤发射前将两个偏振态复用到一起。在接收端处理过程相反，使用两个偏振态使系统容量翻倍，在给定的容量下使线速率减半。

采用基于 PM-QPSK 的 100G 已经大量商用，而在超 100G 时代，PM-QPSK 仍然是调制技术基石，使用 PM-QPSK 调制方式的高性能 400G，800G 使用范围更广。

2.1.4 特种光纤

使用多芯光纤（MCF）或者少模光纤（FMF），并融合多输入多输出（MIMO）信号处理的空分复用（SDM）目前正得到广泛的研究。理论预测和近期的进展都表明在特殊的光纤结构和传输性能上能够做到很好的结果。但除了设计和制造，在连接、耦合、熔接以及放大器和收发器的集成方面都将面临很大的挑战，而且使用这些技术需要对现场光纤替换，这是最大障碍。因此该项技术进入商业应用还为时尚早。

在 100G 时代，G.652 光纤由于较好的非线性和较大的模场直径作为一个大容量、长距离传输介质得到广泛商用。进入 400G+时代，随着传输速率提升，OSNR 容限降低很多，系统对传输后的 OSNR 要求提高。因此，需要寻找提升系统 OSNR 的解决方案。系统 OSNR 与入纤光功率以及光

纤衰减成正比。入纤光功率受限于光纤的非线性，当超过最优入纤光功率后会导致传输性能的下降。通过加大光纤的模场面积可以改善光纤的非线性提高入纤光功率。同时，降低光纤的传输损耗可直接提升系统的信噪比。尤其在海底系统，由于其传输距离远，对于 OSNR 改进提出更高的要求。在此背景下，以 G.654E 为代表的超低损耗和大有面积光纤的研究工作广泛开展。G.654E 光纤分为海缆应用和陆地应用两种。其中，海缆应用的 G.654E 有效面积可以达到 $150 \mu\text{m}^2$ ，光纤衰减系数 0.17dB/km 。对于陆地应用，光纤的有效面积各厂家不完全相同，在 $110\text{--}130 \mu\text{m}^2$ 。低损耗 G.654E 光纤衰减系数 0.19dB/km ，超低损耗 G.654E 光纤衰减系数可达 0.17dB/km 。多个运营商已经进行了 G.654E 陆地应用的现网验证测试，预计随着 400G+ 的商用，G.654E 也会得到广泛的应用。

2.1.5 波道扩展

随着调制速率的提升，波道间隔也同步增加，当要求波道数不变时，光纤可利用的频率段将势必要求扩展。对于 64Gbaud，200G PM-QPSK 和 400G PM-16QAM 需要采用 75GHz 波道间隔，对于 80 波系统，需要 C 波段扩展到 C++ 波段。C++ 波段的光传输系统已经正式商用。对于 90+Gbaud 和 120+Gbaud，400G PCS-16QAM、400G PM-QPSK、800G PCS-64QAM 以及 1.2T PCS-64QAM 需要采用 100GHz、112.5GHz、137.5GHz 和 150GHz 波道间隔，系统的工作波带需要由 C++ 进一步扩展到 L。所以超高速的发展还要克服信号在新的波段应用所带来的一些问题，包含产品生态支持力度、产品成本、产品可获得性等。

2.2 400G+方案

线路速率与调制阶数和波特率成正比。调制阶数增加，会导致噪声容忍度降低，从而要求更高的 OSNR，影响传输距离，导致应用场景受限。波特率提升，高速电信号在传输中的损耗增加，抗

干扰能力下降，需要对现有电路进行优化。400G+商用方案需要综合考虑调制方式和波特率提升的影响。同时，结合 FEC 算法来保障传输性能及频谱效率。对于 400G+，第一阶段波特率由 32GBaud 提升到 64GBaud，对应的高阶调制方式为 400G PM-16QAM。第二阶段波特率由 64GBaud 提升到 90+GBaud。相应的可实现 400G PCS-16QAM 和 600G/800G PCS-64QAM。第三阶段提升到 120+GBaud，相应可实现 400G PM-QPSK 和 600G/800G/1.2T PCS-64QAM。

基于 64GBaud 的 400G PM-16QAM 有 400km-600km 传输能力，满足城域的要求。采用扩展 C++波段可实现 80 波传输。基于 90+GBaud 的 400G PCS-16QAM 及基于 120+GBaud 的 400G PM-QPSK 进一步提升了传输性能，覆盖从干线，城域，接入到 DCI 的所有场景，为 2022 年 400G 全面商用打下基础。

基于 90+GBaud 的 800G PM-64QAM 只适合 DCI 的应用需求。下一代基于 120+GBaud 的 800G PCS-64QAM 进一步提升了传输性能，应用范围扩展到部分城域，接入到 DCI。预计从 2022 年开始会有少量商用。基于 120+GBaud 的 1.2T PCS-64QAM 其性能只适用于 DCI 场景，有待于进一步测试和验证。

表 1 400G+技术方案比较

	400G			600G		800G		1.2T
调制格式	PM-16QAM	PCS-16QAM	PM-QPSK	PCS-64QAM		PCS-64QAM		PCS-64QAM
符号速率 (GBaud)	64	90+	120+	90+	120+	90+	120+	120+
占用频谱 (GHz)	75	100/ 112.5	137.5/ 150	100/ 112.5	137.5/ 150	100/ 112.5	137.5/ 150	137.5/ 150
频谱效率	5.3	4/3.6	2.9/2.	6/5.3	4.4/4	8/7.1	5.8/6.3	8.7/8

(bit/s/H z)			7					
波段	C++	C++&L	C++& L	C++&L	C++&L	C++&L	C++&L	C++&L
80 波系统 容 量 (Tbit/s)	32	32	32	48	48	64	64	96

2.2.1 400G PM-16QAM

2018 年采用 16nm 芯片技术，多个厂家推出了 64+G Baud DSP 芯片，传输性能提升很大，主要应用调制格式相比之前的产品也多了很多。在 200G 方面主要改进点是支持 PM-QPSK，远优于 PM-8QAM 和 PM-16QAM，满足长距应用需求，解决国干传输应用。200G PM-QPSK 也促使了光层波道间隔变化和波道扩展，波道间隔突破传统的 50GHz，达到 75GHz。波段也从传统的 C 波段和 CE 波段扩展到 C++波段，总体实现 80 波 200G PM-QPSK，保证了单波带宽提升的同时，总带宽也相应提升。目前，200G 技术比较成熟，存在 200G PM-QPSK、200G PCS-16QAM 和 200G PM-16QAM 等多种调制方式，传输性能优异，完整覆盖干线、城域、接入和 DCI 应用场景，因此得到大量应用。

400G PM-16QAM 采用相同的技术，波道间隔 75GHz，应用于扩展 C++波段系统，可实现 80 波 400G，系统容量达到 32Tbit/s，传输性能可满足城域应用场景。目前，400G 线路侧相干光模块有 MSA 封装及 CFP2 封装两种，前者 OSNR 容限优于后者，但功耗较高，适用于对传输性

能要求较高的场景。400G PM-16QAM OSNR 容限 21dB，应用场景受限，主要适用于部分城域网应用。目前以测试及试商用为主，预计 2022 年随 400GBASE 业务需求的出现，会逐步商用。

2.2.2 400G PCS-16QAM

2020 年部分厂家采用 7nm 芯片技术，90+GBaud DSP 芯片，配合 FEC 及概率整形算法实现了 400G PCS-16QAM。现有线路侧相干光模块为 MSA 封装，非可插拔，与 400G PM-16QAM 相比 OSNR 容限降低 3dB 以上。传输性能可满足省干和城域需求。由于波特率提升到 90+GBaud，波道间隔相应也提升到 100GHz/112.5GHz。采用 100GHz 波道间隔进行传输，传输性能有所损伤，滤波代价高，ROADM 穿通能力受限。同时，现有 C++波段无法传输 80 波，需要扩展到 L 波段。2021 年 400G PCS-16QAM 主要是进行实验室和现网测试，预计 2022 年会有批量商用。

2.2.3 400G PM-QPSK

2021 年部分厂家采用 5nm 芯片技术，120+Gbaud DSP 芯片，配合 FEC 和概率整形算法实现 400G PM-QPSK。与 400G PCS-16QAM 相比，OSNR 容限进一步降低。传输性能可满足国干、省干需求。400G PM-QPSK 需要采用 137.5GHz/150GHz 波道进行传输。同样，为实现 80 波传输，需要由 C++波段扩展到 L 波段。预计 2022 年会有批量商用。

2.2.4 600G PCS-64QAM

采用 7nm 芯片技术，90+GBaud DSP 芯片，多个厂家推出了 600G PCS-64QAM 相干线路侧光模块，传输性能可满足接入和 DCI 应用。预计 2021 年采用 5nm 芯片技术，120+Gbaud DSP 的 600G PCS-64QAM 相干线路侧光模块也会推出。在 600G PCS-64QAM 出现的同时，800G

PCS-64QAM 也在快速发展。考虑到 400GE 已标准化，同时 800GE 接口标准 MSA 已启动，与线路侧 400G 和 800G 相匹配。因此，预计线路侧 600G PCS-64QAM 应用较少。

2.2.5 800G PCS-64QAM

800G PCS-64QAM 与 600G PCS-64QAM 采用相同的技术。第一代 800G 线路侧相干光模块采用 7nm 芯片技术，90+GBaud DSP 芯片，传输性能仅可满足 DCI 应用需求。预计 2021 年采用 5nm 芯片技术，120+Gbaud DSP 的第二代 800G PCS-64QAM 相干线路侧光模块也会推出。传输性能会有所提升，可满足城域，接入以及 DCI 应用。800G PCS-64QAM 需要采用 137.5GHz/150GHz 波道进行传输。同样，为实现 80 波传输，需要由 C++ 波段扩展到 L 波段。800G 目前只支持 PCS-16QAM，传输性能与 400G 相比相差较大，预计前期主要用在 DCI 场景。

2.2.6 1.2T PCS-64QAM

受芯片技术以及光器件，DA/AD 器件波特率提升的限制，800G 以后会采哪种速率作为标准目前还在研究中。在 5nm 新品技术成熟后以及将来的 3nm 芯片技术商用后才会有结论。部分厂家基于 5nm 芯片技术开始了 1T+ 的开发工作。预计 2021 年采用 5nm 芯片技术，120+Gbaud 的第一代 1.2T PCS-64QAM 相干线路侧光模块会推出。其传输性能预计可满足 DCI 应用需求。

3 400G+ OTN 架构

前面的章节中在传输速率、传输距离和光谱效率等维度上介绍了 400G+硬件的最新研究进展。在超 100G 方面还可通过软件来选择系统的调制方案，如调制方式是否用 QAM，及所用超级通道的载波数量，也可结合传输距离优化所用载波的速率和频谱带宽。这些新的思想可通过将可变的 ITU 栅格和灵活的 OTN 实现。这是对传统的 OTN 架构与刚性数据传输速率的一个改革，超 100G 需要提供个灵活可变的超级速率，多片 ITU 栅格片段将被整合起来，形成一片可使一个超级通道穿过。

3.1 超 100G OTN 映射和复用

客户侧 100GE/200GE/400GE 接口将客户侧信号进行光电转换等处理后映射到 ODU4/ODUflex 中，然后将 ODU4/ODUflex 映射到的 ODUC1/ODUC2/ODUC4 中，最终封装为 OTUC1/OTUC2/OTUC4 信号。支线路分离方式下，线路板可通过集中交叉单元进行各级别 ODUk 颗粒业务调度并实线映射复用处理，实现更加灵活的电层信号调度及更高的带宽利用率。

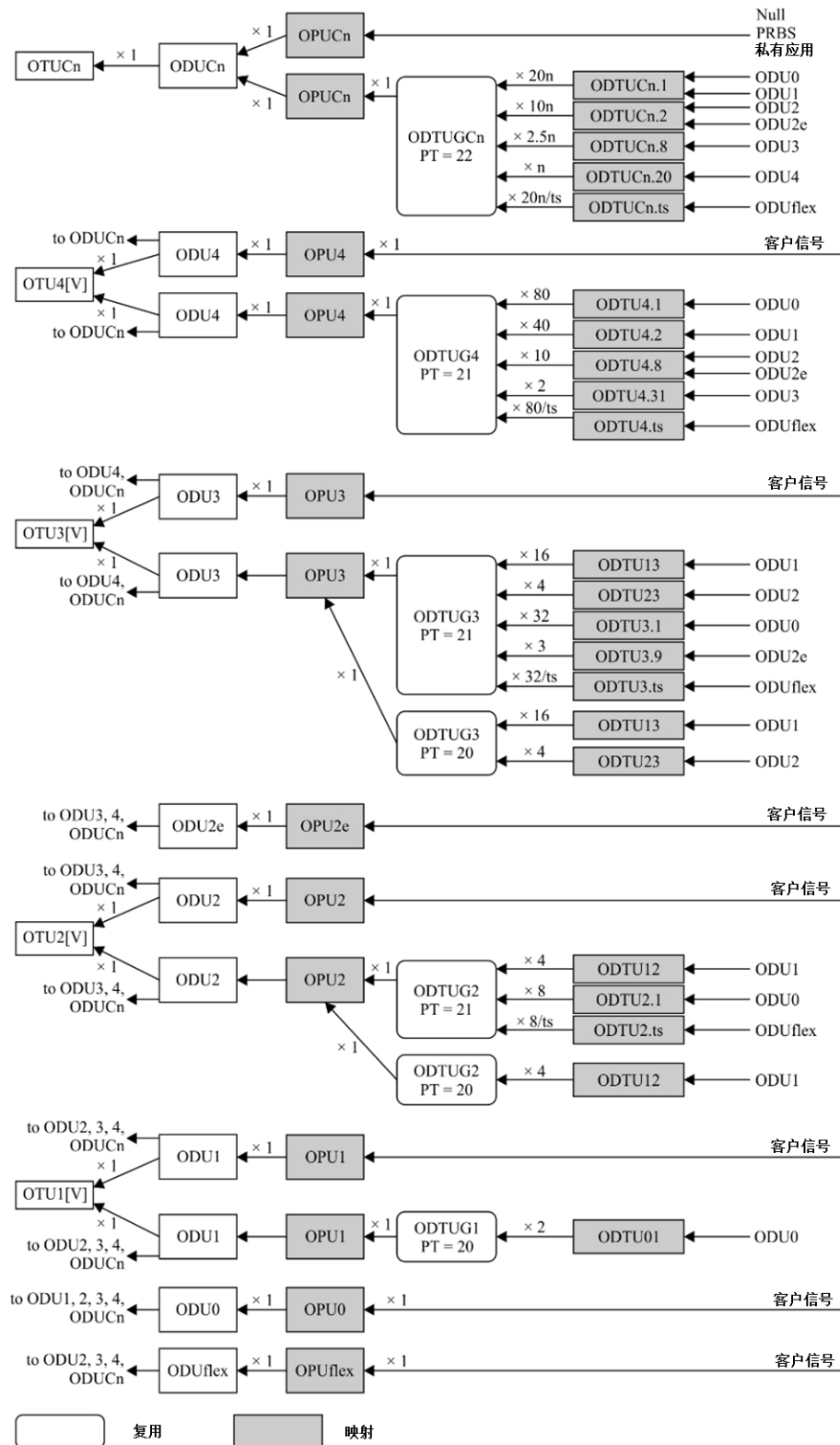


图 4 OTN 复用和映射结构

3.2 Flex ROADM

传统的 DWDM 网络包括 Mux、Demux、WSS，等，这都是依照固定栅格设计的，使用固定带宽的信道传输光信号，400G+将打破这些传统，以便自由选择调制格式和多子载波复用技术。在 400G+这样的场景下，一个信号的谱宽是变的，传统的固定栅格 DWDM 设备就不合适了，ITU-T 标准 G.694.1 提出一个新的 C 波段可利用带宽的划分方法，并介绍了一个可变的 DWDM 栅格定义：频隙的标准频率是 $192.1 + n \times 0.00625$ 标准频率（单位 THz），频隙带宽是 12.5nm，换句话说，ITU 频隙带宽将是多个 12.5GHz。

灵活栅格的 ROADM 满足以下特征，即栅格无关（gridless）、波长无关（colorless）、方向无关（directionless）和竞争无关（contentionless）（GCDC）。栅格无关对传输来说与传统的 50GHz 通道相比在频谱分配上使用更细的粒度，最小调整间隔达到 6.25GHz，更适用于传输 400G，800G 及 1T+信号。随着 400G，800G 和 1.2T 的出现，为满足 80 波传输，ROADM 的核心器件 WSS 也需要从 C++波段扩展到 C++&L 波段，以简化 ROADM 的配置以及占地面积。

4 400G+网络和设备

400G+光传输实际是一个在频谱效率、数据速率和传输距离间找出最优解的工作。虽然运营商优先考虑研究继续提高频谱效率和比特率、距离的方法。但在实际系统 OSNR 已经被应用到了极限，运营商将重心转向的传输距离和光谱效率最大化，这才是有效利用光纤资源的唯一方法。

4.1 400G+网络架构

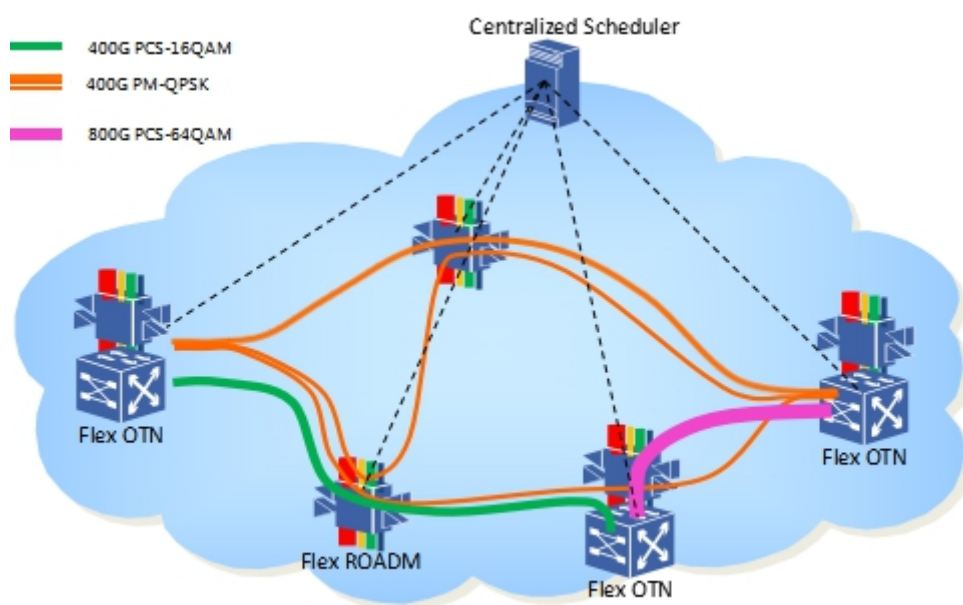


图 5 400G+网络架构

基于 400G+ OTN 的一系列创新性技术，运营商可以更加便捷的提供高带宽网络服务。使得“任意业务接入、任意粒度交换、任意带宽传输”成为可能。400G+OTN 网络设备及其控制管理技术，能够实现网络资源动态调整和优化，达到对设备与光纤网络资源最大化利用。图 5 所示 400G+网络，需要以下技术提供支撑：第一个新技术就是支持调制格式和速率可变的 SDO 光模块（Software Defined Optical），通过软件调整调制格式和比特率来实现传输距离和光谱效率性能最优。第二个新技术是具备多载波复用能力的多载波光模块，由于半导体技术和通信系统基本定律的限制，使用

单载波方式难以满足速率提升的要求，400 G+系统采用多载波技术来提高单通道速率，系统相应要支持灵活栅格。由于固定速率的 ODU/OTU 难以适应网络的动态变化，超 100G 要采用可变调制格式和多载波技术的应用，相应产生灵活 ODU/OTU 支持分离频谱与非共路传输，实现网络频谱资源利用最大化，所以第三个新技术是支持可变速率的 Flexible OTN 。

若要实现前面所述的光模块的调制格式可选、ODU/OTU 容器可变、栅格频谱宽度的可调谐。那么第四个新技术，具备路由和频谱分配能力控制平面技术必不可少。

4.2 400G+交叉连接

中兴提出 FlexOTN 具备电光两层协同交换能力。FlexOTN 电交叉连接支持可变速率灵活 ODU /OTU 封装、软件可控光模块的速率调谐、及任意分组和 TDM 粒度下的业务调度等。以 Flex ROADM 为核心的光交叉连接设备具有 GCDC（Gridless、Colorless、Directionless 和 Contentionless）的特征。

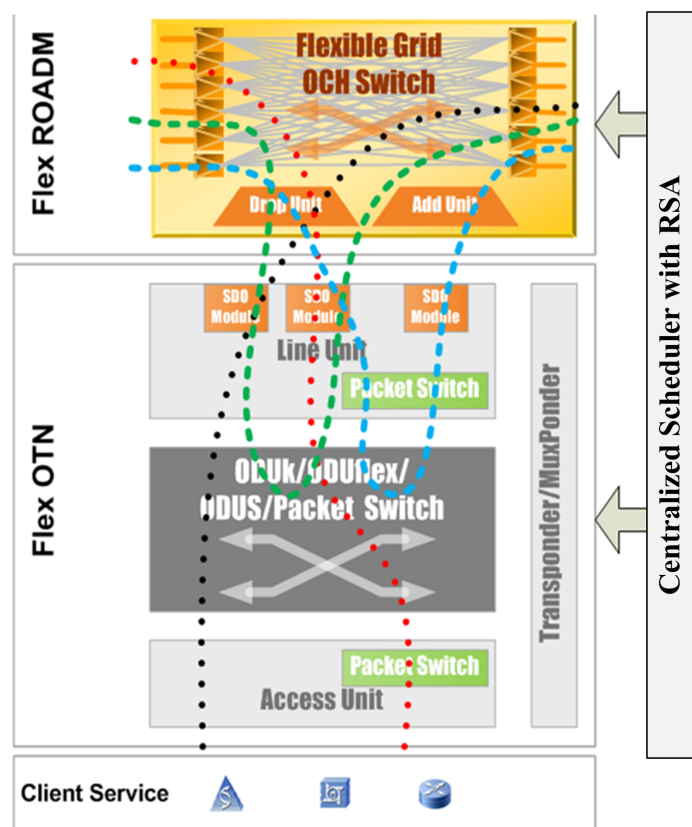


图 6 400G+交叉连接

4.3 400G+控制管理

400G+的 FlexOTN 网络的控制和管理面临着因为调制格式、光谱整形、灵活栅格等带来的挑战。在整个 400G+网络控制平面技术是核心，它借助灵活栅格技术实现路由和频谱分配来管理这个复杂且高容量的网络。

4.3.1 路由和频谱管理

传统 DWDM 网络采用固定栅格，光通道频谱带宽固定，不存在频谱管理问题。而在灵活栅格网络中，光通道的频谱带宽取决于速率、调制格式、载波数、多载波复用技术、滤波器级连数等多种因素，在通道发起建立之前，高速信号和频谱带宽没有固定的对应关系。因此，需要将信号和频

谱作为两个实体进行分别管理和维护。频谱管理主要包含频谱规划、频谱分配和频谱调整。一方面，通过有效的频谱规划和频谱分配，可以提升频谱利用率和建路效率。另一方面，通过频谱调整，可以减少频谱碎片对网络性能的影响。灵活栅格网络中，路由选择受到频谱一致性和频谱连续性的双重约束，其是决定网络承载能力和建路效率的关键因素之一。

4.3.2 控制平面技术

由于信号层和频谱层的分离，路由协议、信令协议和链路资源管理协议需要进行扩展以支持灵活栅格功能。另一方面，不同于传统 DWDM 网络，灵活栅格技术多方面的灵活性需要更强的控制功能以提供支持，而传输网络也从传统的固定管道转变为智能的弹性管道；因此，结合 SDN 的技术思想，通过各种灵活栅格技术使光网络智能化，可能是未来 400G+ 系统控制平面的演进趋势。

5 400G+标准进展

涉及 400G+标准制定的主要组织包括 ITU-T、IEEE、OIF 和 CCSA。

5.1 ITU-T 标准进展

ITU-T SG15 的 Q6 和 Q11 分别负责光物理层和光传送网 (OTN) 逻辑层的标准化工作, Q6 正在规范 200G 和 400G 的 80km 和 200~450km 两种应用场景的代码参数;而 Q11 完成了 B100G (OTUCn) 的帧结构、时隙颗粒度、互联互通接口 (FlexO) 格式和速率、业务映射和复用等方面的标准化, 并完成 80km 和 200~450km 的互联互通接口的 FEC 规范, 正在启动 400G+的讨论。

5.2 IEEE 标准进展

IEEE 的 802.3 工作组主要进行 400GE 以太网接口物理层的标准化工作, 完成了 400GBASE-SR8、400GBASE-SR4.2、400GBASE-DR4、400GBASE-FR8、400GBASE-LR8、400GBASE-ER8 等多种距离 (100m/150m/500m/2km/10km/40km) 的规范。同时, 对于不超过 120km 的数据中心互联场景, 400GBASE-ZR 已经形成初稿。确定了 400G-ZR 的物理层参数, 采用 DP-16QAM 及相干接收支持多波长应用, 实现至少 80km 传输。

5.3 OIF 标准进展

光互联网论坛 (OIF) 主要负责物理链层 (PLL) 的光电模块及高速接口等标准化工作, 目前完成了 400ZR 光模块实施建议, 确定了相干 120km 相干 400ZR 的接口和光指标。同时确定 120km 及以下多波, 带放大点到点噪声受限链路以及不带放大, 单波点到点损耗受限链路两种应用场景。路由器采用 400ZR 模块, 与 WDM 合分波放大配合使用, 可以实现多波传输。这种应用场景只适

于传输距离 120km 以内,且点到点组网,应用场景非常受限。目前正在进行 75GHz 波道间隔的 400G 应用规范讨论,并启动了 800G 的项目。

5.4 CCSA 标准进展

中国通信标准协会 (CCSA) TC6 的 WG4 关于超 100G 的标准化研究工作与国际基本同步。TC6 WG4 完成骨干 400G DWDM 和城域 400G DWDM 行标。其中,用于骨干网络的标准《Nx400Gb/s 光波分复用 (WDM) 系统技术要求》于 2020 年 12 月发布。该标准规范了骨干网络使用的 2x200G PM-16QAM、2x200G PM-QPSK 超级通道 400G 两种调制码型及主光通道接口参数。由于 400G PM-16QAM 传输距离不满足干线要求,标准中没有加入。随着 400G PCS-16QAM 以及 400G PM-QPSK 的陆续出现,单载波 400G 传输性能有了较大提升,尤其 400G PM-QPSK,适用于骨干网络。城域网络的标准《城域 Nx400Gb/s 光波分复用 (WDM) 系统技术要求》适用于传输距离 720km 及以下的城域网。该标准规范适于城域的 2x200G PM-16QAM 超级通道和 400G PM-16QAM 两种调制码型及主光通道接口参数。同时,在 Nx80km 传输规格的基础上增加了 Nx60km 传输规格。

6 中兴通讯 400G+概况

中兴通讯多年来一直致力于 400G、600G、800G 及 1T+ 等超 100G 技术的研究以及产品方案的研发与应用。中兴通讯立足于超 100G 高速信号传输技术的尖端技术研究和开发,多年来攻克了该领域若干关键技术,相关研究已在 OFC 和 ECOC 以及国际标准化组织发布。

中兴通讯全球首次在实验中实现了单信道为 11.2Tbit/s 的光信号,并成功让该信号在标准单模光纤中传输 640 公里,刷新了此前单信道传输最高速率为 1Tbit/s 光信号的世界记录。该实验结果

在 2011 年的 OFC 上作为截稿后论文发布。

中兴通讯实现了 24Tb/s (24x1.3Tb/s) 波分复用信号传输, 是业界首次实现 24Tbit/s 的波分复用技术。测试结果在 OECC 2011 上发布。

在 2012 年 2 月, 中兴通讯携手德国电信 (DT) 在德国成功完成 100G/400G/1T 信号的 2450km 长距混合传输, 详细的实验情况已在 OFC 2012 作为截稿后论文发布, 该混合传输的距离和传输速率都是业界最高的, 具有里程碑的意义。

在 2012 年 9 月中兴通讯创立了另一项世界纪录, 利用专利技术成功实现 40 波的 DWDM 信道, 每个信道加载 400 GB/s 的 PM-QPSK 信号, 在标准单模光纤中成功传输 2800km。这一结果在 ECOC 2012 上发布。

中兴的单载波 400 Gbit/s 信号传输使用了一个简单的发送和接收装置, 这使它成为在增加信道速率和系统容量方面是个有吸引力的方案。与需要昂贵的特殊滤波器和拉曼放大器的单载波的 400G 其它技术的 1200km 传输距离是记录相比, 中兴的专利技术传输距离延长一倍多。单载波的 PM-QPSK 拥有成熟的高灵敏度接收机解决方案。适用于标准的单模光纤和普通的掺饵光纤放大器 (EDFA) 为主的光纤基础设施中长距传输。该实验成功传输了 35 个跨段, 每段长 80km, 展示了超 100G 网络在现有的光纤系统中实现长距传输的可能性。

在 2012 年中兴通讯根据不同的网络应用场景发布了 7 款 400G/1T DWDM 原型样机, 既包括覆盖超长距离应用的多子载波 OFDM 400G/1T 解决方案; 也包括面向城域及本地应用、具备最高带宽利用效率的 16QAM 解决方案; 还包括兼顾长距离传输, 同时也具有较高带宽效率的 Nyquist WDM 解决方案。中兴在 400G+ 方面拥有众多专利, 涉及到光调制、成帧、系统和其他方面的实现技术。

在 2014 年，中兴通讯更是实现了单载波 400G 信号传送，信道频谱间隔为 100GHz，符号速率达到了创纪录的 110G。这一结果在 2014 年 OFC 上发布。

在 2015 年，中兴通讯超 100G 产品开始规模商用。

在 2016 年，中兴通讯超 100G 产品已经遍布中国移动、泰国 True、新加坡 Singtel、香港 HKT 等多家海内外运营商。

在 2017 年，中兴通讯采用 PM-256QAM 高阶调制实现单载波 400G，收录于 OFC highly scored。

在 2018 年，中兴通讯在业内率先推出了单载波 600G 产品。

在 2019 年，中兴通讯单载波 400G 产品在省干和城域商用。

在 2020 年，中兴通讯 200G PM-QPSK 产品在中国移动国干商用。

多年来，中兴通讯一直致力于推动 400G 成熟技术在城域/长距领域传输的应用，并不断研究其它新型调制技术的可实现性及其极限应用。未来，人们对带宽的需求永无止境，中兴通讯也将一直保持对超 100G 新技术的关注和持续投入，不断引领和推进超 100G 技术的商用部署。

7 总结

随着 400G 技术日益成熟并在传输市场的广泛应用，800G 和 1T+将是下一步发展方向，以期解决日益增长的数据业务需求。中兴通讯率先投入 800G / 1T+研发，并在过渡时期推出 600G 传输链路的系列解决方案。

为了充分利用 400G+网络的潜能，中兴通讯提出 FlexOTN 这样一个灵活的 OTN 架构，为了简化 400G+管理还需要进一步研发控制平面。中兴提出的 FlexOTN 能更好的发挥 400G+技术的优势。

中兴通讯与全球运营商紧密合作，积极参与所有相关标准组织工作，日益加大研发资源的投入。推进 400G+网络的演进以最终在不远的将来实现提供任意服务、任意带宽、任意地点、任意媒体服务的终极目标。

8 参考文献

- YD/T 3783-2020 《Nx400Gb/s 光波分复用（WDM）系统技术要求》
- 《城域 Nx400Gb/s 光波分复用（WDM）系统技术要求》
- OIF-400ZR-01.0 《Implementation Agreement 400ZR》
- IEEE P802.3cw™ /D1.0 Draft Standard for Ethernet Amendment: Physical Layers and Management Parameters for 400 Gb/s Operation over DWDM systems

9 缩略语

英文缩写	英文全称
CCSA	China Communications Standards Association
DP-16QAM	Dual Polarization 16-state Quadrature Amplitude Modulation
PM-16QAM	Polarization Multiplexing-16-state Quadrature Amplitude Modulation
PCS-16QAM	Probabilistic Constellation Shaping-16-state Quadrature Amplitude Modulation
PCS-64QAM	Probabilistic Constellation Shaping-64-state Quadrature Amplitude Modulation
PM-QPSK	Polarization Multiplexing- Quadrature Phase Shift Keying
GCDC	Gridless、Colorless、Directionless and Contentionless