



中国移动
China Mobile

面向算力网络的新型全光网技术及演进探讨

中国移动研究院 张德朝

2023年11月16日

www.10086.cn



1

算力网络驱动全光网发展

2

骨干网发展及新技术演进

3

接入网发展及新技术演进

中国移动提出“算力网络”全新理念，从三条主线系统性推进算力网络发展，加快构建基础设施、平台服务和**技术赋能三位一体的新型服务能力**

主线一

面向算网基础设施构建

完善算网资源布局，夯实算力网络底座，**增强设施供给能力**

主线二

面向业务融合创新

实现算网高效协同，支持CHBN业务融合发展，**创新平台服务能力**

主线三

面向创新技术引领

实现创新技术引领，打造原创技术策源地，**深化技术赋能能力**

算力基础设施



边缘算力



中心算力



大区算力

光网络基础设施



PON



SPN

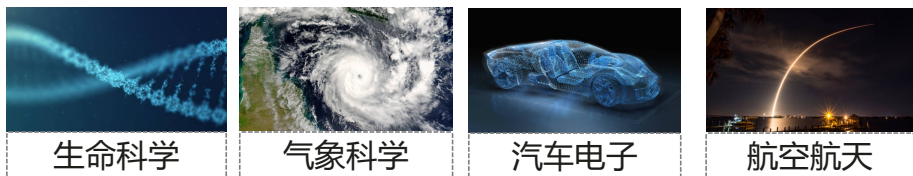


OTN

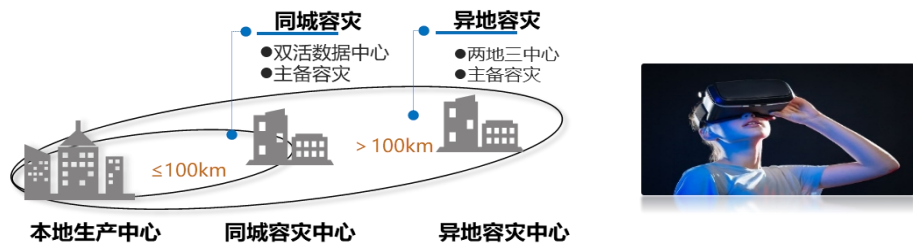
推动光网络核心技术创新，打造**算力网络坚实底座**，构建“连接+算力+能力”的新型信息服务体系

算力网络发展下的灵活调度需求

- 算力网络业务呈现多层面、多方位需求，在业务承载差异化、调度颗粒多元化、跨层协同智能化方面对传输提出更高要求
- 构建满足波长级、通道级和业务级三级灵活调度的新型全光网，为算力网络提供高效一体化感知和调度能力



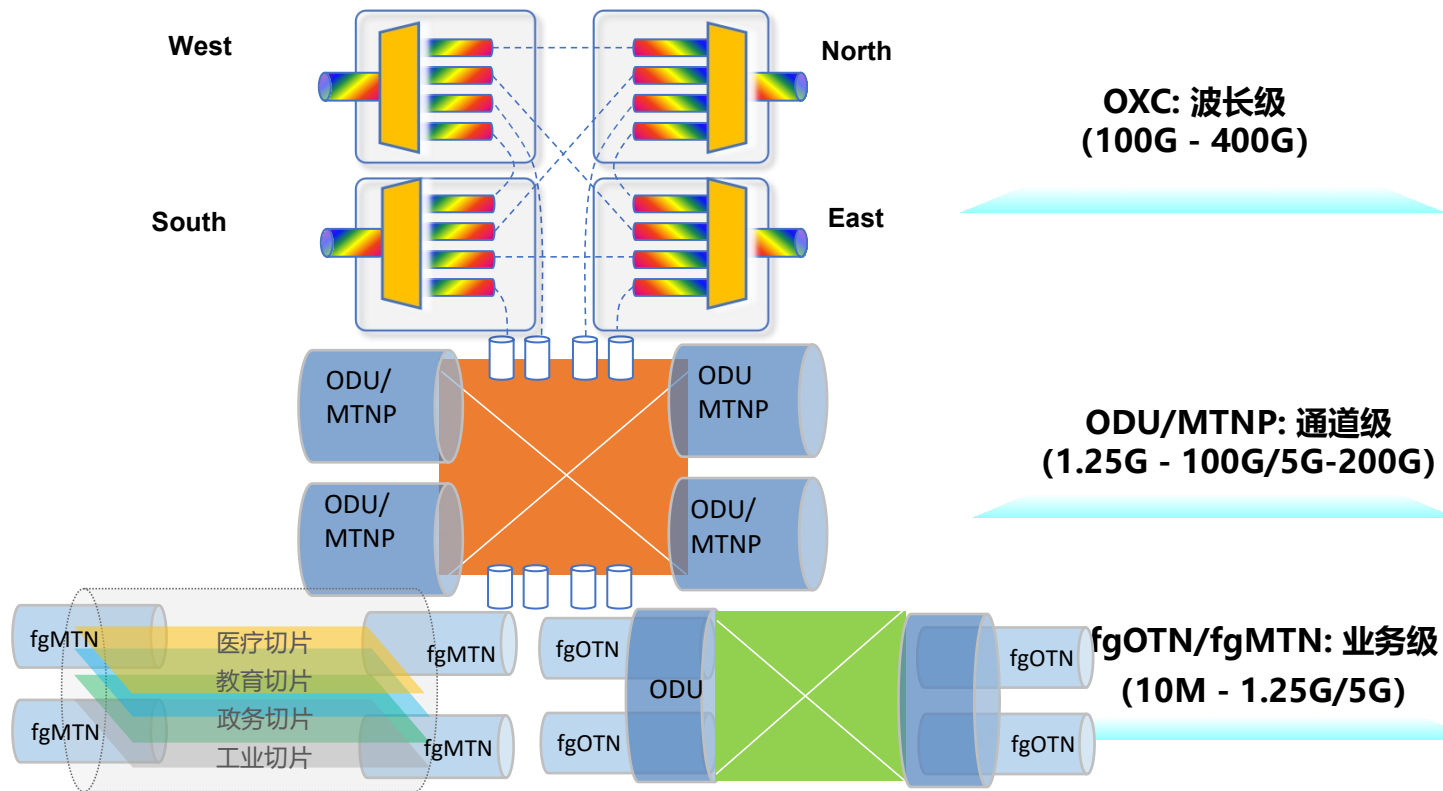
波长级：工业、科研HPC仿真等业务



通道级：存储灾备、超高清类视频直播等业务

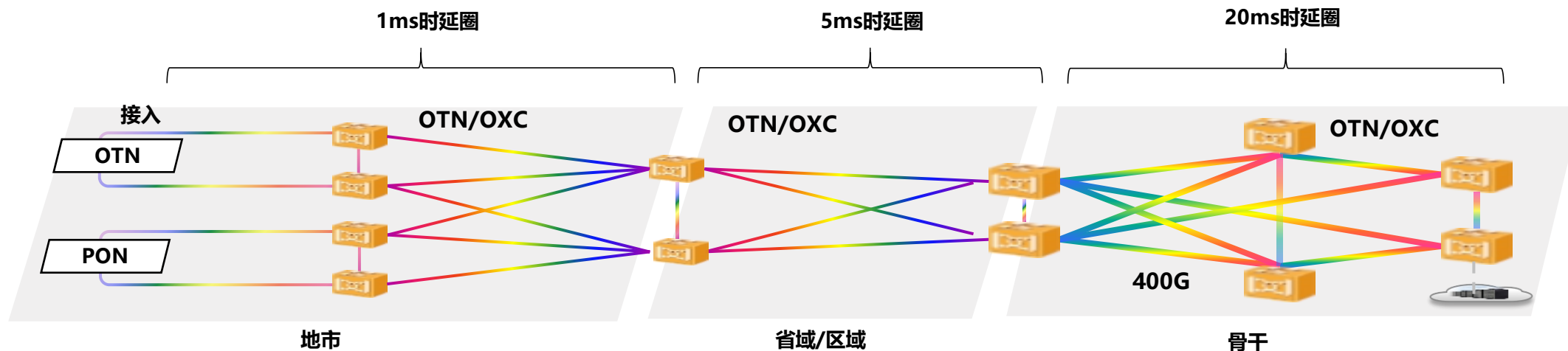


业务级：党政军、金融、大企业专线等业务



推动实现OXC+ODU/MTNP+fgOTN/fgMTN三级灵活调度机制，高效实现算力网络业务识别、跨层疏导、多层恢复和无损调整

面向算力网络对光网络的新需求，通过两大关键技术举措，推进超大带宽、泛在接入技术创新，构建基于400G高速互联的灵活高效的新型全光网技术架构



超大带宽

- 400G长距技术成熟商用，分场景研究中短距技术路线
- 推动超800G、空芯光纤等前沿技术演进

泛在接入

- 50G PON代际标准确立，攻关50G突发模式光电器件，满足高功率预算
- 推动FTTR技术、标准和产业发展



1

算力网络驱动全光网发展

2

骨干网发展及新技术演进

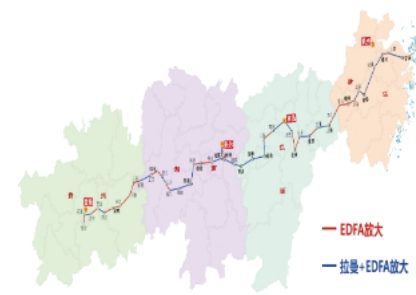
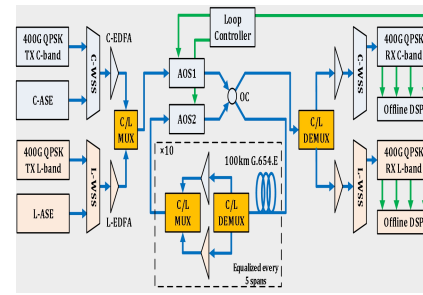
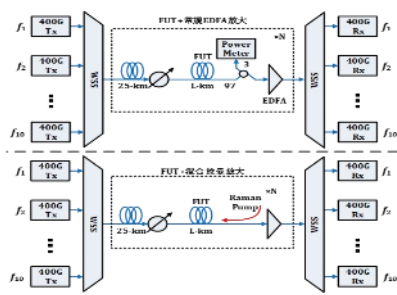
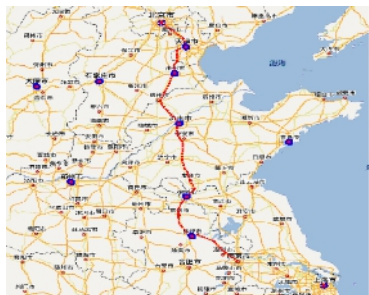
3

接入网发展及新技术演进

- 光网络已迎来以400G宽谱传输为标志的第五次重大技术变革
- 已启动全球最大规模集采和部署，开启400G商用元年

2018~2021.11: 基于16QAM重点推动PCS

2021.12至今: 推动QPSK走向成熟



京津济宁现网试点 (2018.8)

- ✓ 调制格式: **16QAM**
- ✓ 光纤: **G.654E**
- ✓ 放大: EDFA
- ✓ 波段: C6T
- ✓ **603km (5.3dB余量)**

实验室测试 (2021.8)

- ✓ 调制格式: **16QAM-PCS**
- ✓ 光纤: **G.652D/G.654E**
- ✓ 放大: EDFA/拉曼EDFA混合
- ✓ 波段: C4T/C6T
- ✓ **1120km@G.652D (6dB余量)**
- ✓ **1700km@G.654E (7dB余量)**

辽宁沈大现网试点 (2021.11)

- ✓ 调制格式: **16QAM-PCS**
- ✓ 光纤: **G.652D/G.654E**
- ✓ 放大: EDFA/拉曼EDFA混合
- ✓ 波段: C4T/C6T
- ✓ **1077km@G.652D (6dB余量)**
- ✓ **1333km@G.654E (8.2dB余量)**

实验室拟现网测试 (2022.8)

- ✓ 调制格式: **QPSK原型机**
- ✓ 光纤: **G.652D**
- ✓ 放大: EDFA/拉曼EDFA混合
- ✓ 波段: C6T
- ✓ **3038km(4.5dB余量)**

实验室测试 (2023.2)

- ✓ 调制格式: **QPSK原型机**
- ✓ 光纤: G.652D/G.654E
- ✓ 放大: EDFA
- ✓ 波段: C6T+L6T
- ✓ **7000km(2.46dB余量)**

浙赣湘黔现网试点 (2023.2)

- ✓ 调制格式: **QPSK模块**
- ✓ 光纤: **G.652D**
- ✓ 放大: EDFA/拉曼EDFA混合
- ✓ 波段: C6T/C6T+L6T
- ✓ **5616km(2.2dB余量)**

构建覆盖全国的新型400G全光网: 400G骨干网+400G城域网

400G系统面对超高速率、超宽频谱和新型信道损伤等全新挑战，通过光器件、有源模块和光系统架构三大技术变革实现骨干网由100G到400G的代际演进

3大技术挑战

1 新器件

符号率: $\sim 30\text{Gb/s} \rightarrow \sim 130\text{Gb/s}$, **提升四倍**

2 新波段

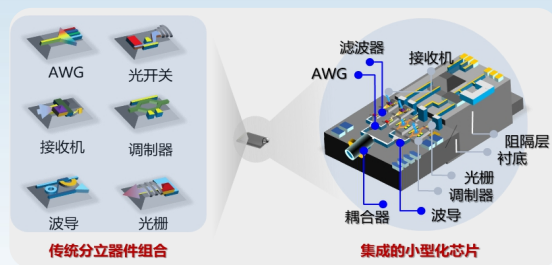
C波段 \rightarrow C+L波段, **扩展三倍**

3 新损伤

SRS转移: $100\text{G} < 1\text{dB} \rightarrow 400\text{G} \sim 7\text{dB}$, **增加6dB**

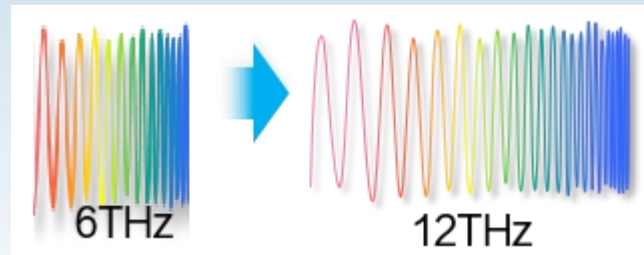
3大技术变革

1 超高速光器件



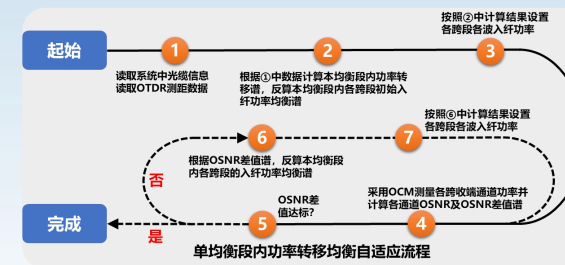
光电合封、高性能DSP、先进工艺共同推动
符号率从 $\sim 30\text{Gb/s}$ 提升到 $\sim 130\text{Gb/s}$

2 超宽谱有源模块



优化器件设计与材料工艺, 减小EDFA、WSS在
C/L波段性能差异, 向C+L一体化演进

3 超宽带光系统架构



自适应SRS均衡, 破解动态网络运维难题, 力
争功率平坦度 $< \pm 0.5\text{dB}$

发布世界最长距离400G光传输现网技术试验网络，召开3次技术发布会，推进实现400G长距传输3项试验纪录，为拉动400G加快成熟、构建算力网络的大带宽低时延全光底座打下坚实基础

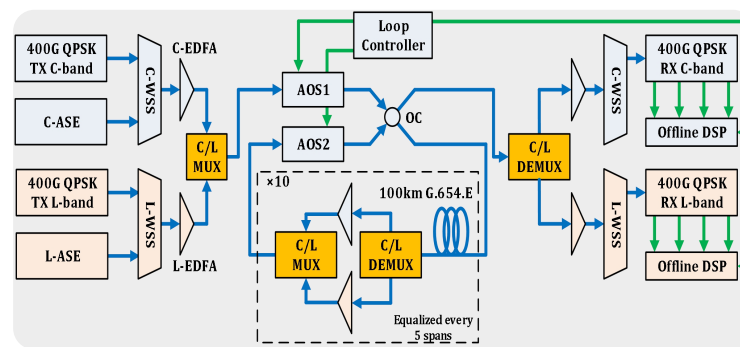
3项传输和试验纪录



5616km 浙江宁波↔贵州贵安试验网

基于G.652.D光纤实现400G QPSK 5616km 传输，创现网传输世界纪录

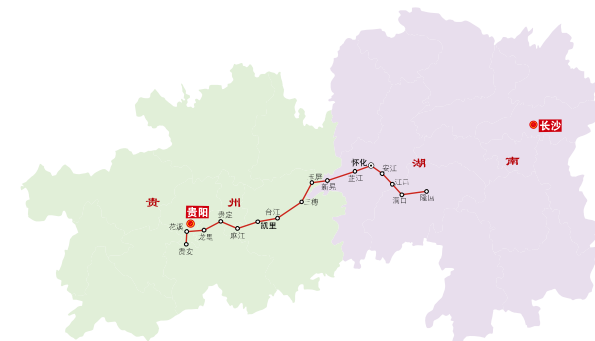
- EDFA/拉曼混合放大，光纤维护余量 0.06dB/km，过系统后OSNR余量2.2dB



7000km 实验室测试系统架构

基于G.654.E光纤实现400G QPSK 7000km 传输，是目前实验室测试的最高水平

- 纯EDFA放大，C6T+L6T波段，无余量



1673km 湖南隆回↔贵州贵安试验网

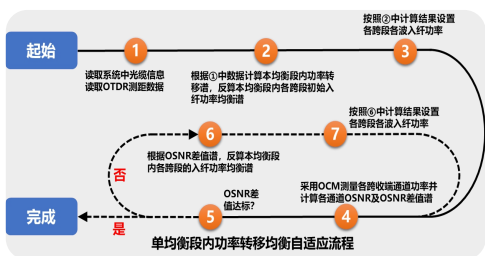
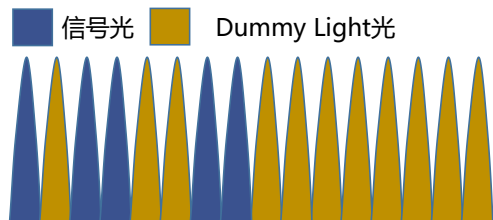
基于G.652.D光纤实现全球最长距离的经典商用场景80×400G QPSK 1673km现网试验

- 纯EDFA放大，C6T+L6T波段，光纤维护余量0.06dB/km，过系统后余量6.4dB



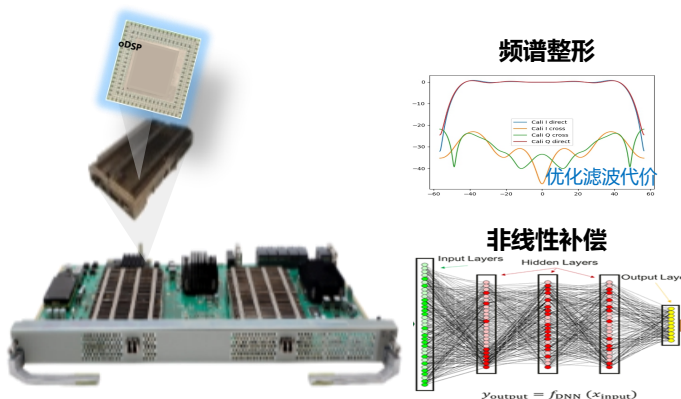
- 业界首次400G QPSK技术规模商用，推动全光网进入400G时代
- 将进一步推进超宽谱系统、C+L一体化、模块性能提升等技术演进

超宽谱系统



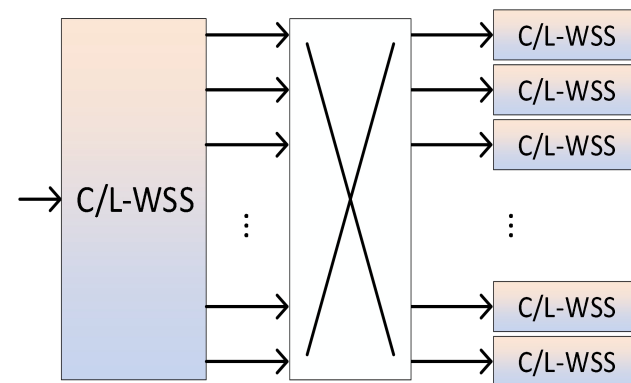
填充波+自适应均衡抑制SRS功率转移产生的性能劣化

高速率模块



模块B2B OSNR容限优化~1dB
L波段EDFA噪声系数提升

C+L一体化

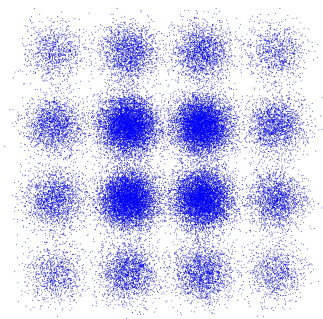


目标: C+L一体化的ITLA、EDFA、WSS等核心关键器件

现状: 已实现C+L一体化WSS

- L6T光放大器噪声系数仍需进一步优化, 力争达到与C6T差异~1dB
- 协同攻关EDFA、WSS、ITLA等模块和器件C+L一体化, 进一步简化光层系统复杂度

面向省域传输场景，存在400G 16QAM-PCS、QPSK两条潜在技术路线，应重点结合传输能力和部署成本综合考虑

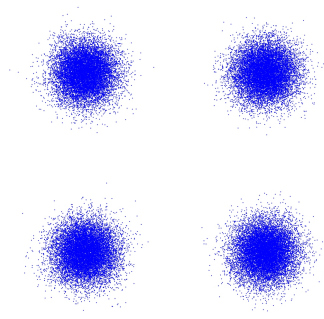


16QAM-PCS

波特率~91GBd

C4T+L4T波段~8THz

传输距离~1000km



QPSK

波特率~130GBd

C6T+L6T波段~12THz

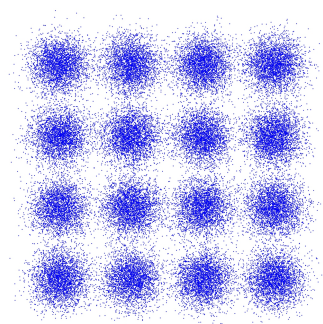
传输距离>1500km

省域网络部署OLP保护引入4.5~5dB插损，16QAM-PCS传输能力难以满足全国所有省份应用需求
QPSK相比16QAM-PCS整体性能提升2dB：B2B OSNR容限1dB、入纤功率 1dB，可以覆盖省域所有场景

省域网络400G技术路线选择

- **方案一：**将16QAM-PCS、QPSK收敛至一种调制格式，所有省域场景采用统一技术
- **方案二：**16QAM-PCS、QPSK两种技术方案并存，面向不同省域需求选择使用

面向城域传输场景，存在400G 16QAM、16QAM-PCS两条潜在技术路线，应重点结合频谱效率和低成本部署综合考虑

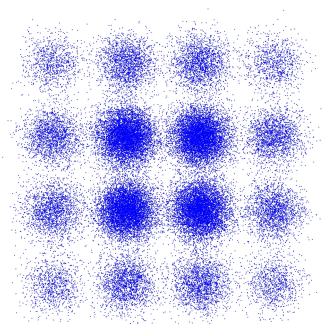


16QAM

波特率~67GBd

C6T波段~6THz

传输距离~240km
(逐点OXC模型)



16QAM-PCS

波特率~91GBd

C6T波段/C+L波段

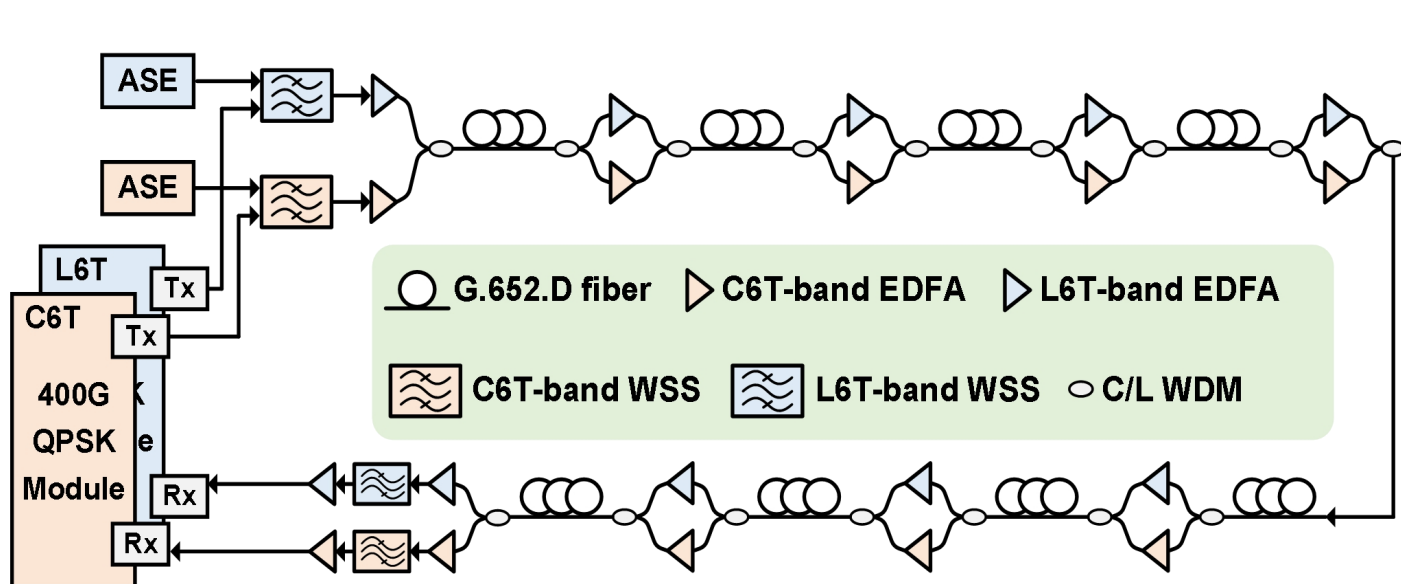
传输距离~720km
(逐点OXC模型)

城域网络部署需考虑OXC组网和OLP保护引入代价，16QAM可以低成本满足数据中心互联及城域网部分需求
16QAM-PCS相比16QAM传输性能提升4dB，可覆盖城域传输主要场景

16QAM-PCS存在C6T 60波、C4T+L4T 80波、C6T+L6T 120波三种方案，城域网是否引入C+L仍待研究

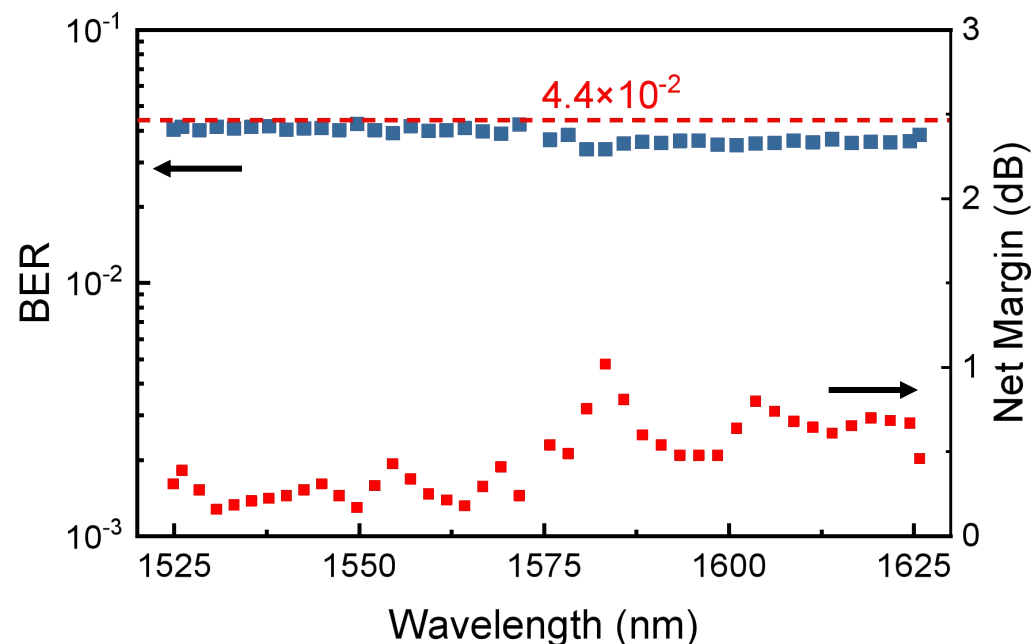
- 相比现有C波段系统，C+L引入SRS转移问题，需配置填充波长、SRS功率均衡，增加网络部署和运维管理复杂度
- C+L目前为分立式光层系统，考虑城域OXC组网对波长灵活调度需求，更需向一体化演进

- 基于16QAM码型可重用400G时代130Gb/s产业链实现单波800G传输，在采用G.652.D光纤+纯EDFA放大+满波配置的系统模型下，具备880km (11×22dB) 极限传输能力



实验架构

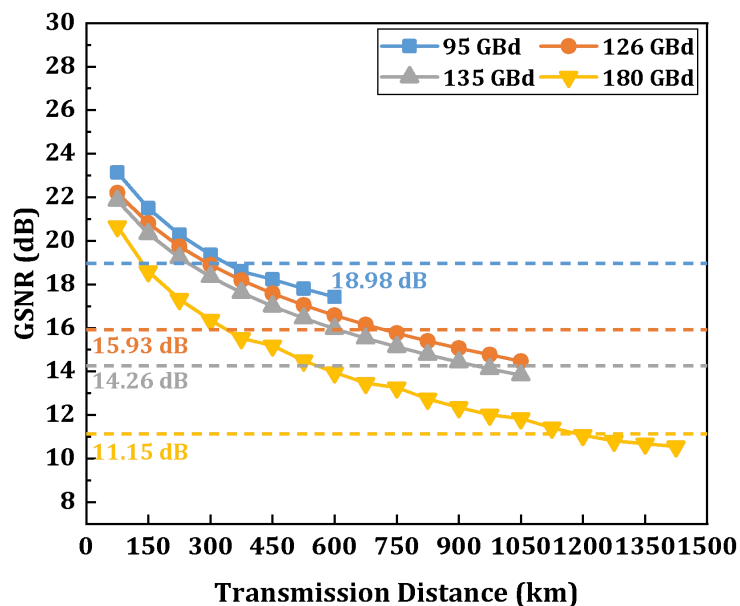
- C6T+L6T, 2个真波+78填充波
- G.652.D光纤+纯EDFA放大



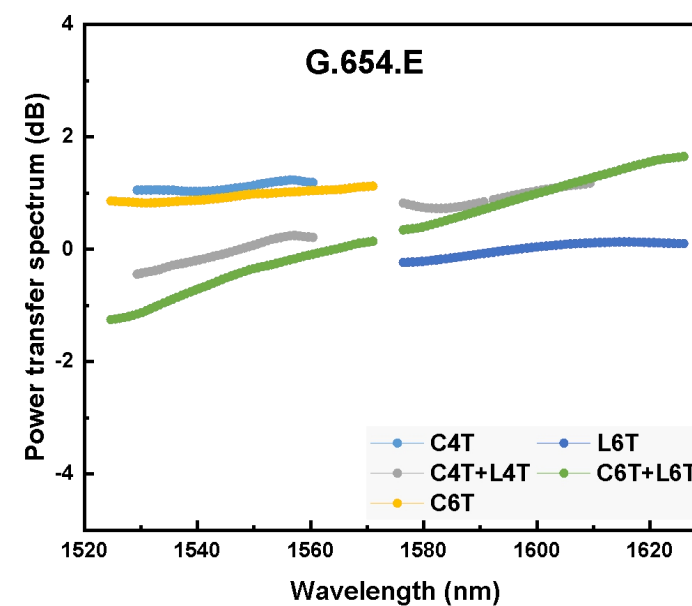
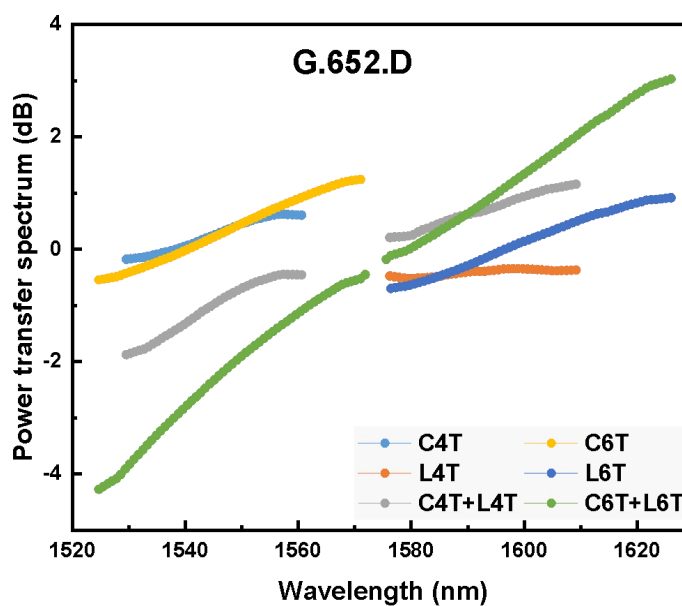
系统末端误码率与净余量vs通道

经11跨光纤传输后，C6T+L6T全波段通道性能逼近FEC纠错门限 4.4×10^{-2} ，且系统末端最小净余量（扣除通道代价）已低至0.16 dB，基本不具备进一步延长传输距离的空间

重用400G时代130GBd产业链难以满足800G骨干长距传输需求，需进一步提升800G信号波特率以提高系统性能



- 800G信号符号率从130GBd提升至180GBd，传输距离可提升30% (~900km→~1200km)

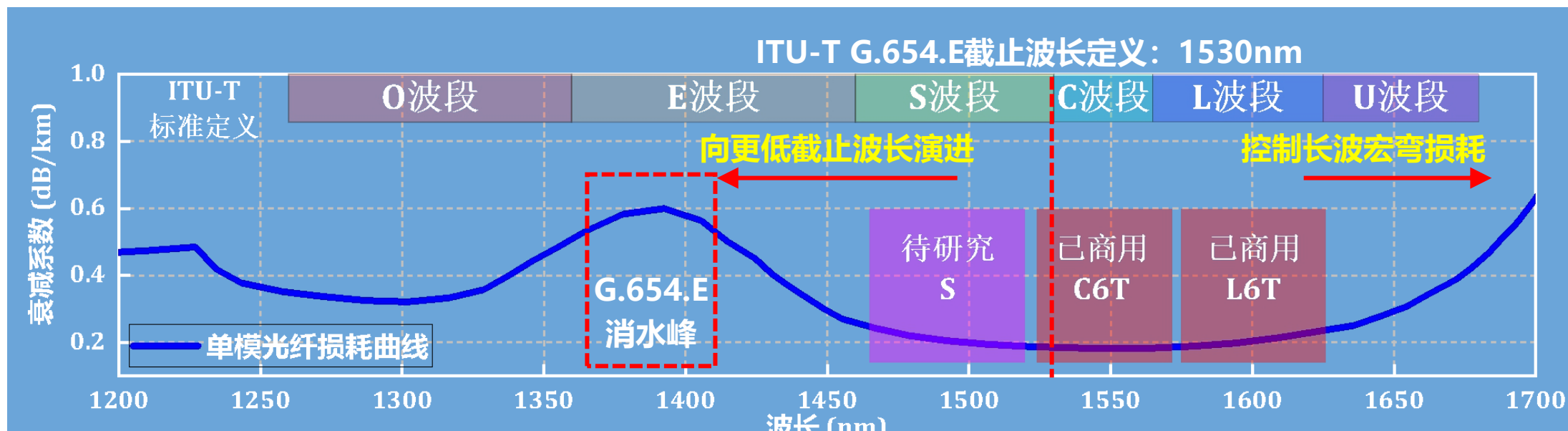


- 800G时代G.654.E光纤相比G.652.D预计将带来较大的性能提升
 - 克尔非线性效应+更低的SRS功率转移
 - 80km传输SRS功率转移: G.654.E~3dB, G.652.D~7dB

预计180GBd及以上波特率将是超长距800G的主流符号率，需进一步推动光电器件向更高波特率突破

G.654.E作为800G时代更佳选择仍需深度匹配宽谱系统需求

- 800G时代G.652.D无法满足长距骨干需求，G.654.E成为更佳选择。
- 但面对潜在的S+C+L超宽谱应用，需解决现有G.654.E光纤指标与宽谱系统间的失配问题，实现截止波长、宏弯损耗等参数性能的改善



截止波长应向 $\leq 1470\text{nm}$ 演进

ITU定义： $< 1530\text{nm}$ (不满足C6T需求)
 企标定义： $< 1522\text{nm}$

实现对S/L波段光纤参数定义

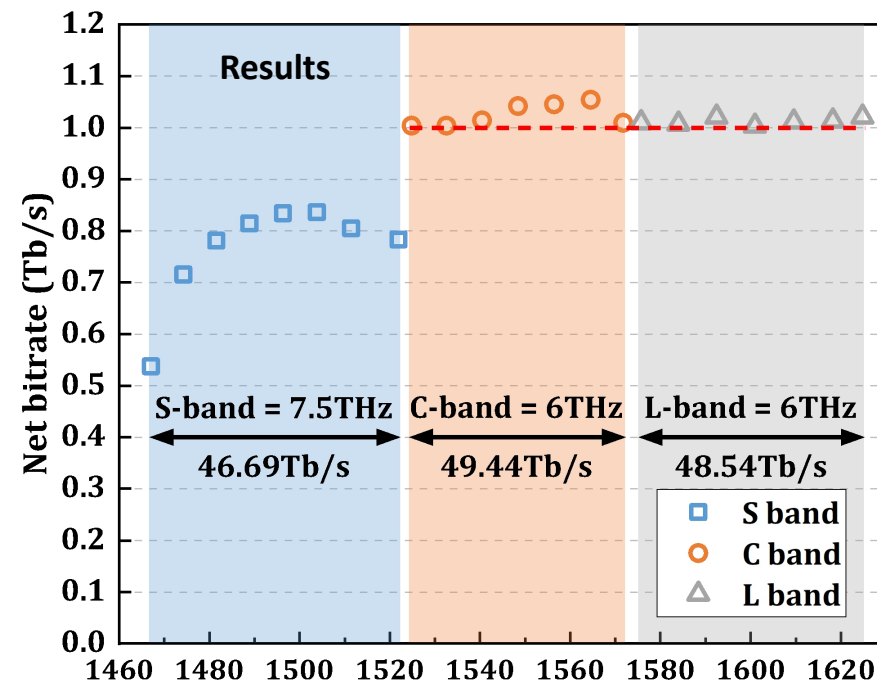
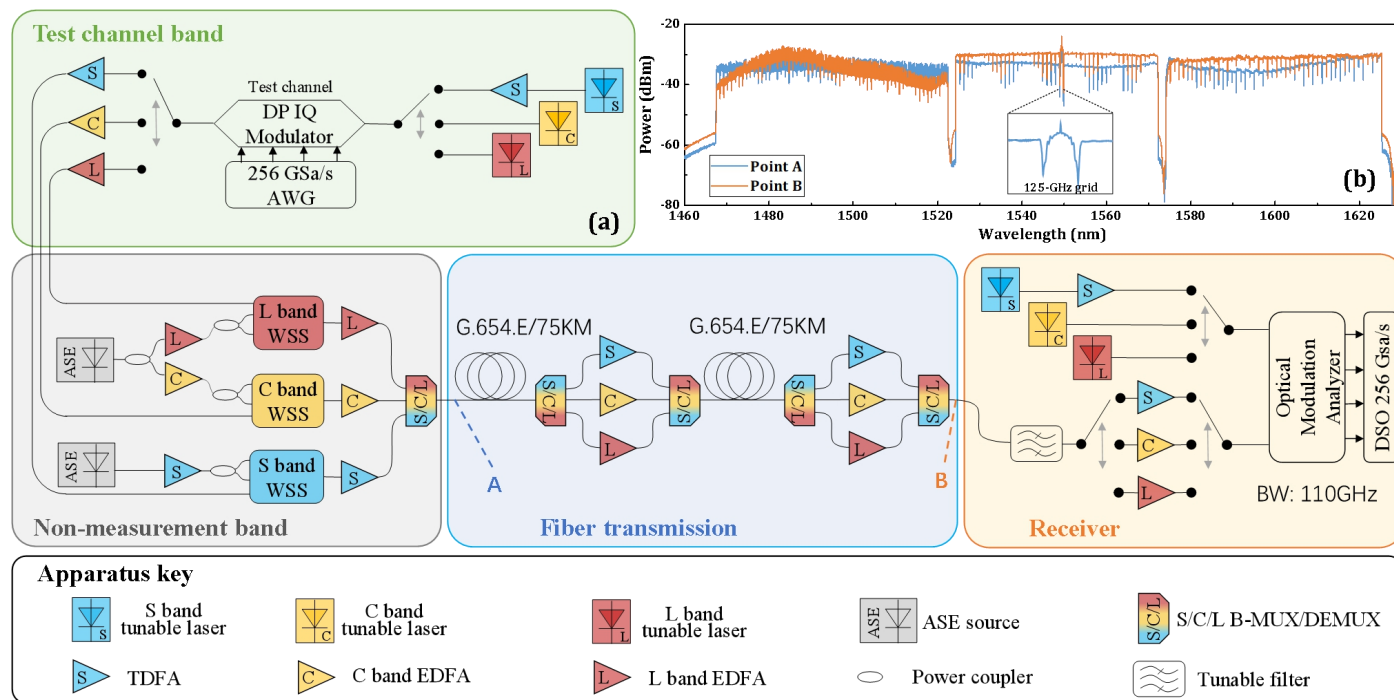
G.654.E目前仅针对C波段定义了传输损耗、宏弯损耗等关键指标

消除水峰扩展G.654.E应用范围

此前缺乏宽谱应用需求，工艺上未对G.654.E水峰进行处理

单波净速率超1Tb/s的S+C+L多波段满波配置超宽带实验

- 为探索超Tb/s单波及S+C+L波段满波配置下单模实芯光纤的信道极限，联合业界开展了单波净速率超Tb/s的S+C+L多波段满波配置超宽带实验
- 在2×75km G.654.E光纤上采用纯掺杂光纤放大的形式，实现了总容量**144.67Tb/s**的单波超Tb/s级满波验证



- 符号率115GBd，通路间隔125GHz，总谱宽19.5THz（156波）：S7.5T(1460-1522nm)+C6T(1524-1572nm)+L6T(1575-1626nm)
- S波段采用32QAM-PCS+16QAM-PCS，C与L波段采用64QAM-PCS，平均单波速率分别为0.778Tb/s、**1.03Tb/s**与**1.01Tb/s**

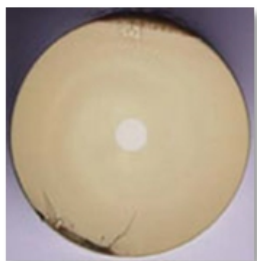
反谐振空芯光纤能够在波导内实现空气/真空导光，突破现有实芯单模光纤的固有时延极限和非线性香农极限，为智算网络和分布式大模型提供全新的高性能底座，有望改变半个世纪以来基于实芯光纤的光通信行业

实芯光纤

自光纤发明以来，光纤都是实芯光纤，光的传播与拘束可采用射线光学的全内反理解释。



$$\text{全反射临界角: } \theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$



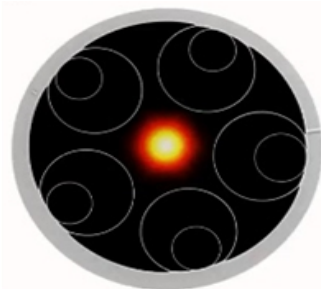
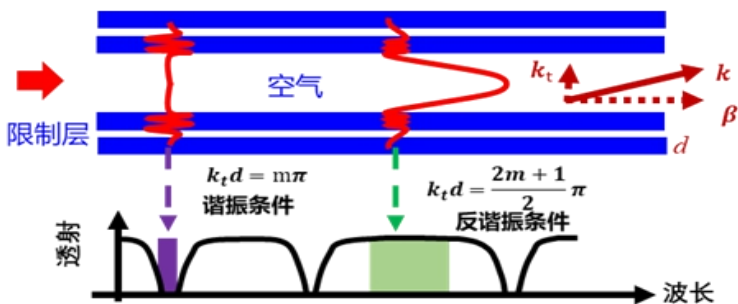
极限1
时延

实芯石英介质折射率约为1.46
介质光速 \approx 真空光速/1.46

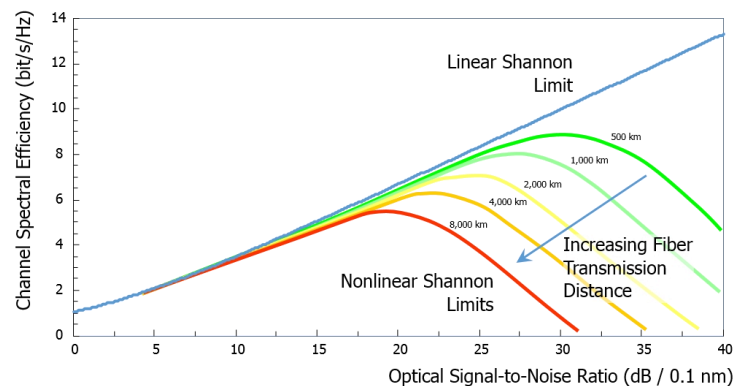
介质光速 \approx 空气光速/真空光速
传输时延降低1/3，突破固有时延极限

反谐振空芯光纤

空气/真空是最佳导光介质，反谐振空芯光纤基于反谐振反射机理对光进行束缚和传播。



极限2
容量



空气导光使得非线性系数降低3-4个数量级，直接突破限制容量的非线性香农极限



1

算力网络驱动全光网发展

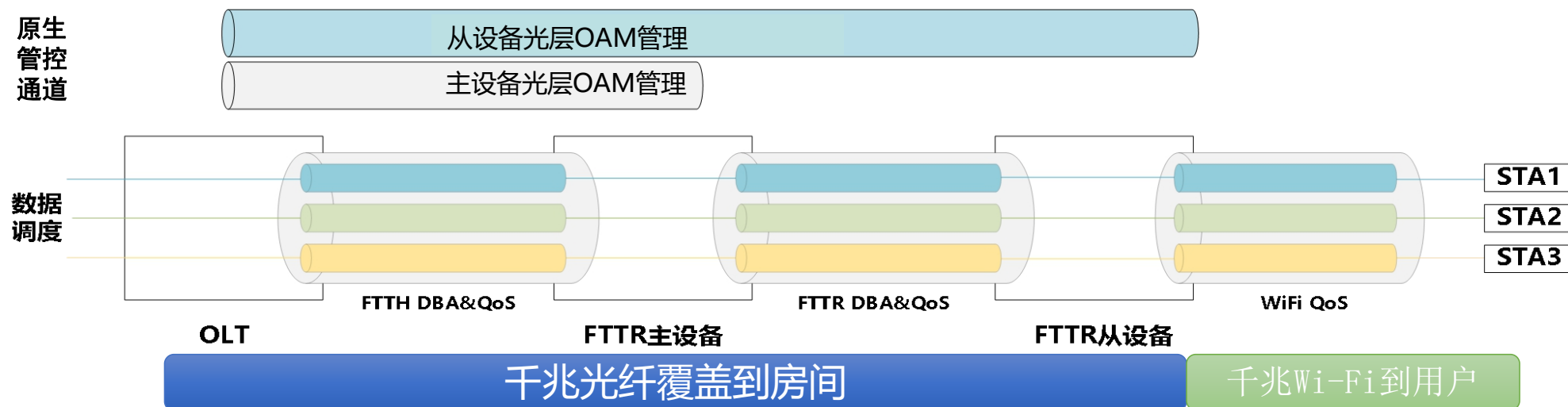
2

骨干网发展及新技术演进

3

接入网发展及新技术演进

提出PON+FTTR智能协同的新一代光接入网架构，进一步延伸光底座到房间打造千兆入算光锚点



PON · 构建万兆光接入

FTTR · 增强千兆光覆盖

- **进展**：联合业界实现中国产业对50G PON代际技术和标准的引领，50G PON技术架构和标准体系已基本确立
- **推进**：需攻关50G突发模式光电器件，满足高功率预算需求

- **进展**：联合业界引领FTTR技术、标准和产业发展，提出基于光层OAM的FTTR系统架构
- **推进**：FTTR技术产业发展，收敛分歧加速标准化，尽快规模商用

- 50G PON国际标准体系已基本建立，当前正处于样机研发阶段
- 50G PON系统相比10G GPON，需采取多项全新技术方案，以满足系统性能需求



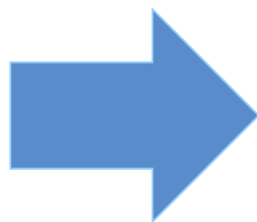
10G GPON

ONU侧为宽带激光器，无需制冷

直调直检，无需oDSP芯片

发射光功率较低，无需光放大器

采用RS FEC码型，纠错容限为1E-3



50G PON

TEC: 为实现三模波分共存，上行波长为窄带选项，ONU发射机需添加TEC

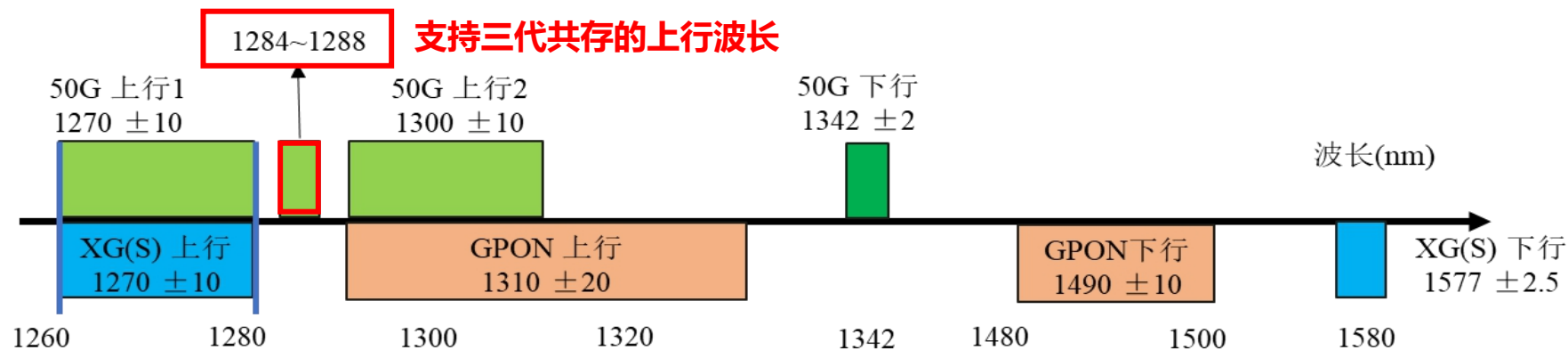
oDSP: 50G速率信号对传输损伤更敏感，需采用数字信号处理技术

SOA: EML/DML存在饱和输出瓶颈，需添加SOA外置光放大器

LDPC: 为进一步提升接收灵敏度，选用纠错能力为1E-2的LDPC FEC码型

中国移动已部署全球最大GPON网络和网关，GPON短时期内不会退网，50G PON部署需考虑三代PON同ODN共存，因此，未来部署50G PON重点考虑采用上行波长 $1286 \pm 2\text{nm}$ 选项

三代共存 波长规划



新器件：DML+TEC

挑战

- 传统ONU侧使用的DML激光器均为20nm 宽带波长

方案

- 在ONU发射机中加入TEC温控，控制激光器输出波长范围在4nm以内

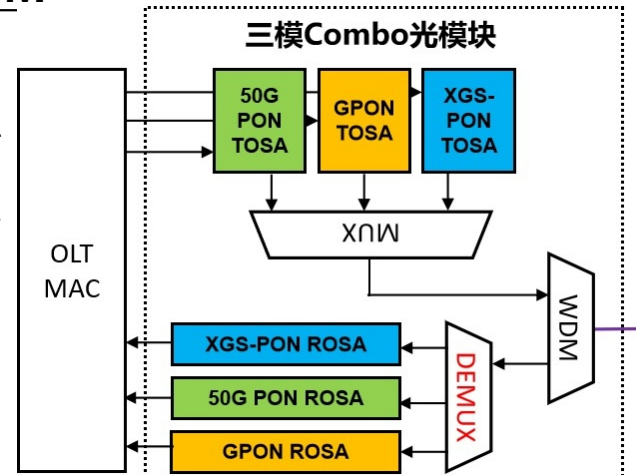
新线路：六波长WDM

挑战

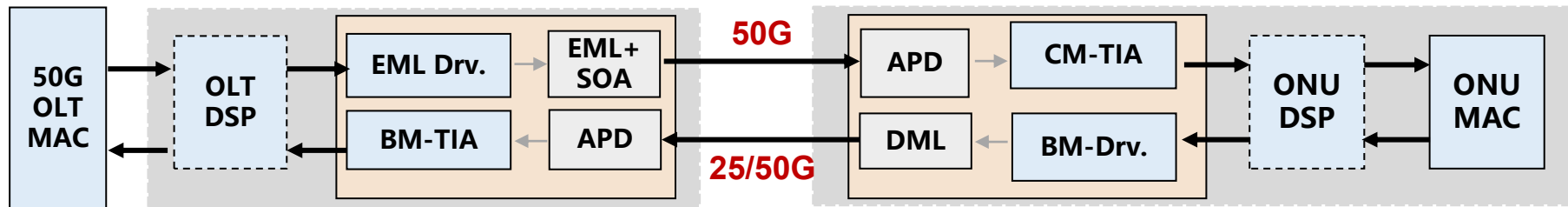
- 支持6波长复用解复用，MPM封装对器件体积要求高
- 上行相邻波段间隔仅为2nm，对滤波器斜率要求很高

进展

- 已有6波长合分波器样品，但隔离度不足

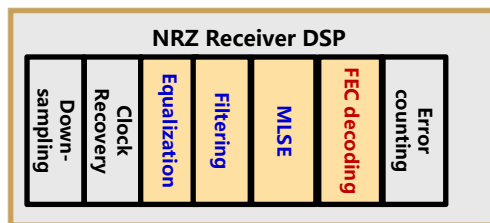


- 50G PON主要技术瓶颈为功率预算，当前已取得长足进展，下行及25G上行达到N1等级29dB；
- 需进一步开展关键技术攻关，实现C+等级32dB功率预算，以及上行多速率兼容等能力



oDSP技术

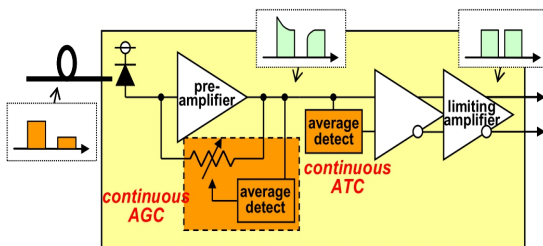
当前进展：采用oDSP均衡技术补偿光纤色散对50Gb/s信号造成的损伤，并结合软判LDPC FEC，提升误码容限至 $2E-2$



25/50G BM-TIA

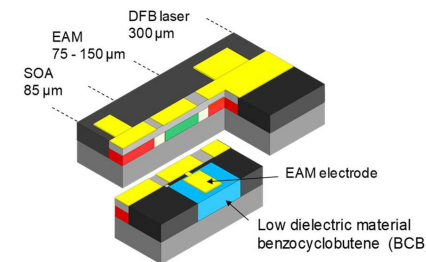
当前进展：已有25G和50G突发TIA样品，可满足15dB动态范围，突发信号建立时长约150ns

需进一步压缩突发信号收敛时长至100ns以内



EML+SOA

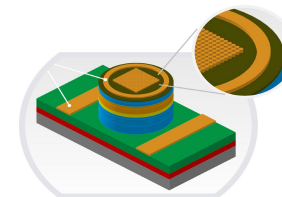
当前进展：通过优化SOA增益以及耦合效率，入纤光功率提升至 $>10\text{dBm}$ ，已满足下行C+等级要求



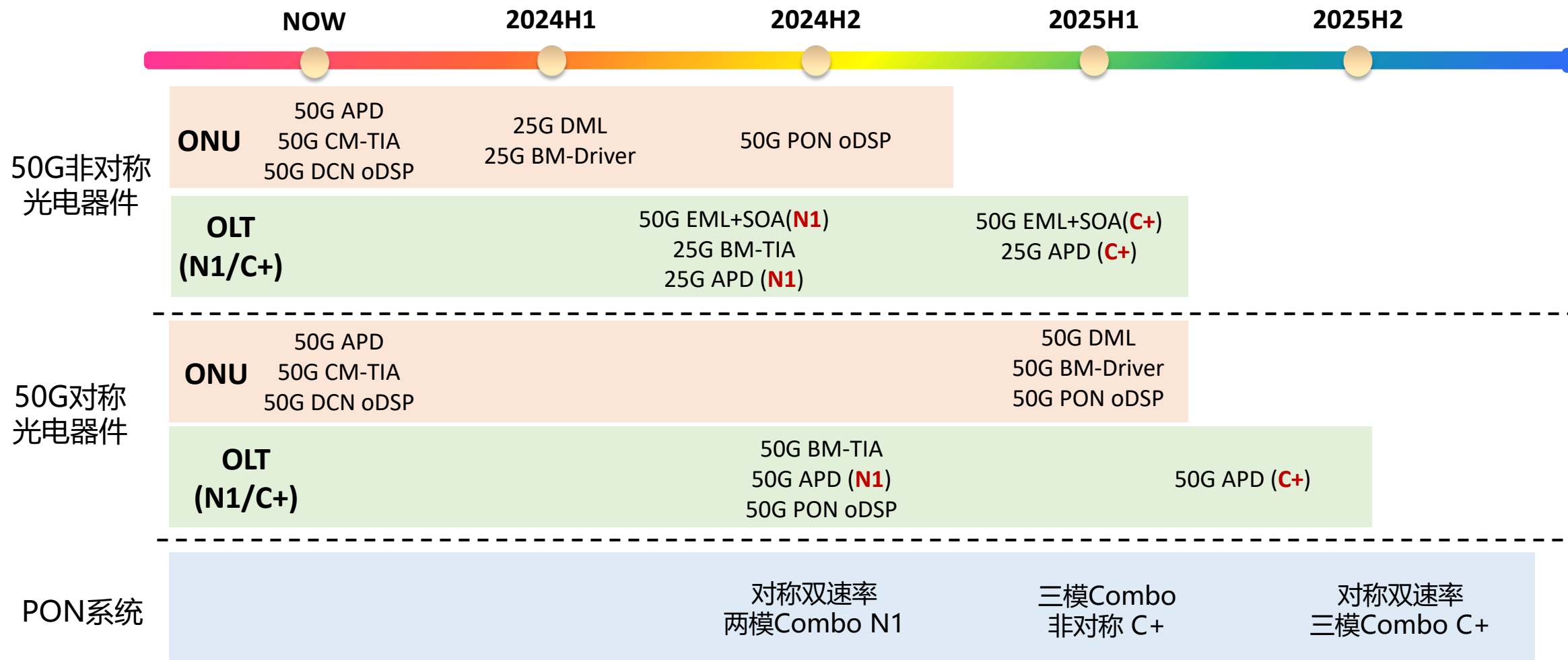
50G APD

当前进展：通过优化APD光子吸收率，当前上下行50Gb/s信号灵敏度可满足N1等级标准要求

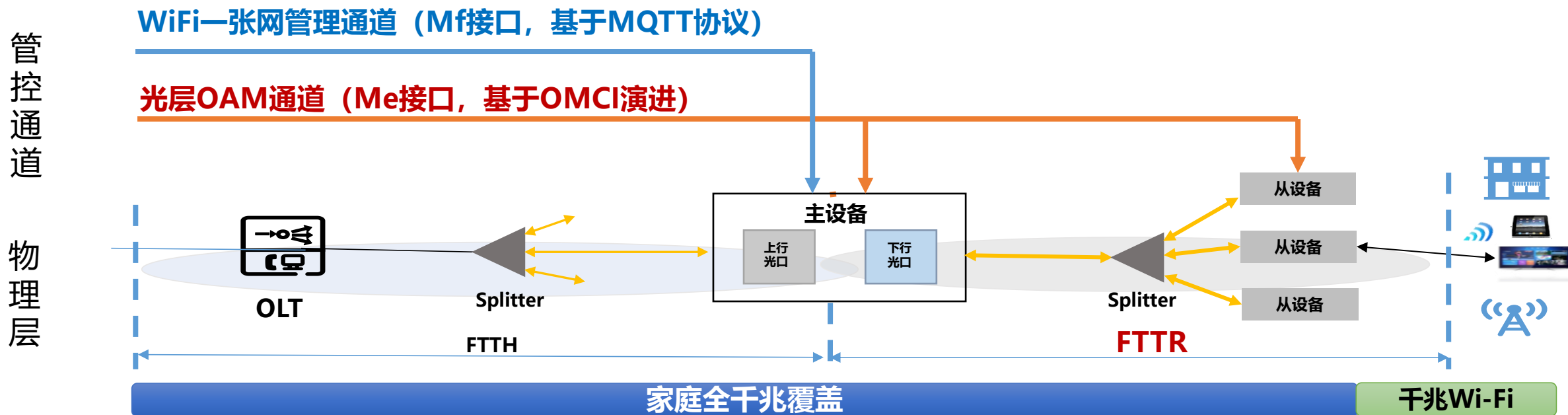
需进一步提升APD灵敏度，达到C+要求



- 根据当前产业链成熟度估计，非对称型50G PON关键器件预计比对称型提前半年成熟
- 满足商用要求的对称型C+等级功率预算、支持上行双速率及三模MPM Combo设备预计2025年底前后发布



- 随着家庭业务的快速发展，光纤进一步延伸到房间，基于P2MP架构，打造家庭全光底座，实现千兆无缝覆盖
- FTTR作为光接入网的延伸，PON的光层OAM机制需向FTTR延伸以构建集中管控型高等级网络



基于光层OAM的管控架构及管控机制

FTTx的延伸对管控架构和能力提出新需求，两段P2MP网络需满足集中统一管控

- Me: 实现OLT对SFU的光链路层管控功能，延伸PON层OAM管控能力
- Mf: 实现FTTR网络主从设备WiFi一张网管控能力及家庭网络高速数据采集

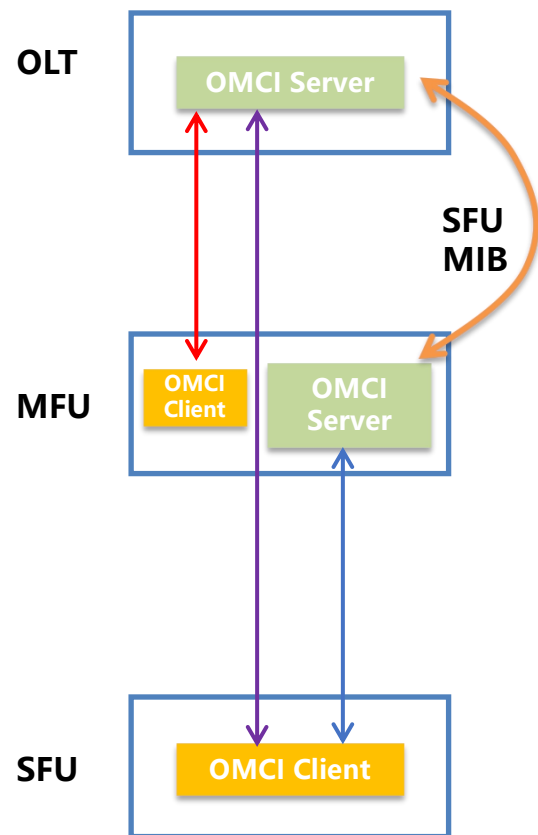
协同组网提升体验

- PON+FTTR智能协同，实现具备网络切片能力的端到端智能化千兆光接入网
- 光+WLAN协同，实现WiFi组网可调度，增强千兆Wi-Fi体验

[1] Dechao Zhang, Jinglong Zhu, et al., Fiber-to-the-Room (FTTR): A Key Technology for F5G and Beyond, vol.15 issue.9, JOCN 2023

[2] Jinglong Zhu, Junwei Li, et al., First Field Trial of FTTR Based on Native Management and Control Architecture for 5G Small Cell Backhaul, OFC 2023, Paper W2A.13

- FTTR光层OAM技术方案已在23年完成现网试点验证，相关技术要求已在22年底完成CCSA标准立项，ITU-T SG15 Q2和Q3也在热烈讨论当中，需业界共同协同，推进技术、标准和产业发展



技术

- 光层OAM架构及接口协议设计已基本完成，并制定企业标准
- 已启动光层OAM二阶段技术研究，进一步丰富接口功能

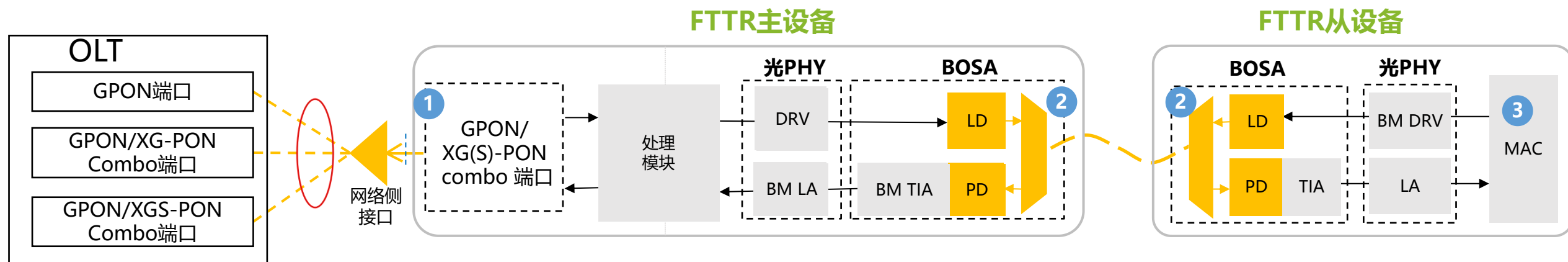
产业

- 23年联合烽火等4家主流合作伙伴开发光层OAM系统，完成实验室及现网试点测试
- OLT与FTTR基本实现光层OAM接口互通解耦

标准

- 22年完成光层OAM行标立项
- 联合业界加速光层OAM标准化工作

- 基于千兆宽带网业端协同发展理念，中国移动提出Combo FTTR技术方案，1代FTTR系统可支持按需随选接入2代PON局端，满足用户无感持续升级带宽
- FTTR物理层及协议层技术方案已达成重要共识，需加速推动器件及芯片等产业链成熟



1 新增Combo FTTR接口

- GPON、10G PON协同发展千兆宽带，满足家宽、企宽等FTTR组网需求
- OLT通过Me接口远程管控上联接口工作模式

2 收敛物理层技术方案

- Ra等级：0~18dB，Rb等级：13~28dB
- 2.5G和10G Ra FTTR可采用DML+PIN的收发技术方案
- 2.5G Rb FTTR可复用GPON技术和产业
- 10G Rb FTTR技术指标要求还需进一步探讨

3 数据链路层方案

- 参考GPON/XG(S)-PON帧结构设计
- 灵活支持对称/非对称2.5G及共存
- 支持OMCI协议及OLT直管从设备的光层OAM消息
- 低时延WiFi管控通道

- **400G超长距已启动规模商用，明确QPSK为400G 骨干长距传输方案，国内主流厂家就激光器、EDFA、WSS等核心器件全面支持12THz C6T+L6T波段，光通信迈入宽谱时代。**
400G中短距存在不同应用场景，近期将明确技术路线
- **面向下一代光通信，长距800G需从C+L进一步向C+L+S多波段探索，G.654.E光纤、180G以上高波特率器件等核心技术需产业协同开展前沿研究**
- **50G PON+FTTR智能协同是下一代光接入网的技术架构，需进一步攻关50G PON高功率器件满足Class C+需求，尽快收敛FTTR技术路线推进技术和标准成熟**



中国移动
China Mobile

谢谢!



中国移动内部资料，
未经允许不得复制、转发、传播。