



中国移动
China Mobile

新型400G全光网技术及演进探讨

中国移动研究院 王东

2023年11月25日

www.10086.cn



1

400G高速光传输技术及进展

2

超400G光传输前沿技术探讨

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

光网络是算力网络的**重要基础**和**坚实基础**，面向算力网络对光网络在**超大带宽、超长距离、超低时延**方面提出的更高要求，需转型升级构建承载算力的**新型全光底座**

- 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



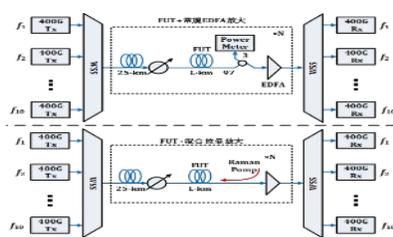
2018~2021.11: 基于16QAM重点推动PCS

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)**



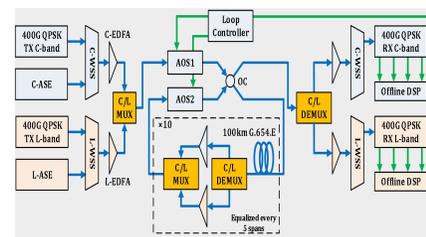
辽宁沈大现网试点
(2021.11)

- ✓ 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

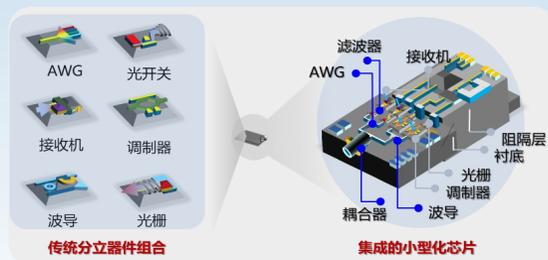
C波段 \rightarrow C+L波段, **扩展三倍**

3 新损伤

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

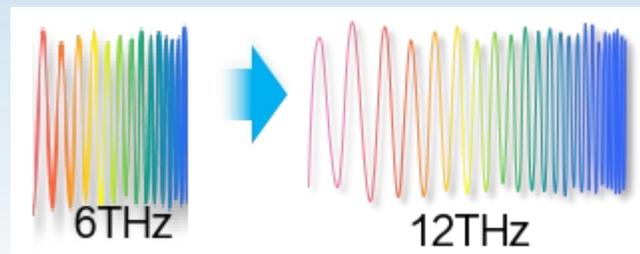
3大技术变革

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

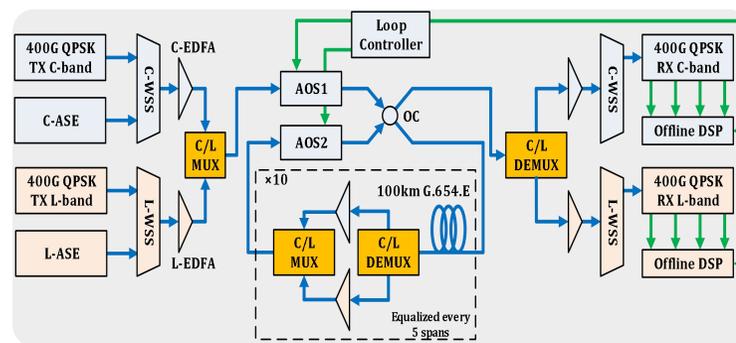
3项传输和试验纪录



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

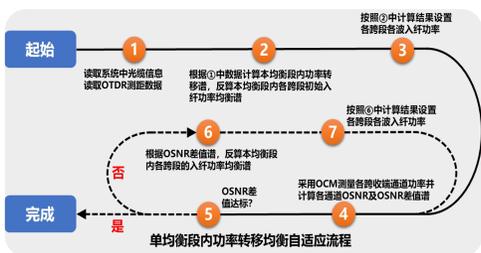
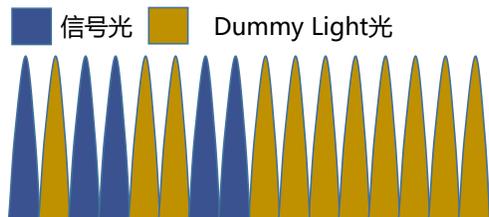
基于G.652.D光纤实现全球最长距离的经典商用场景80×400G QPSK 1673km现网试验

- 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



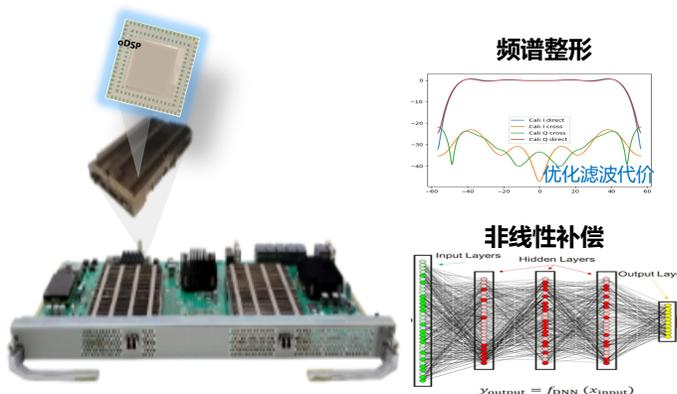
- 业界首次400G QPSK技术规模商用，推动全光网进入400G时代
- 将进一步推进超宽谱系统、C+L一体化、模块性能提升等技术演进

超宽谱系统



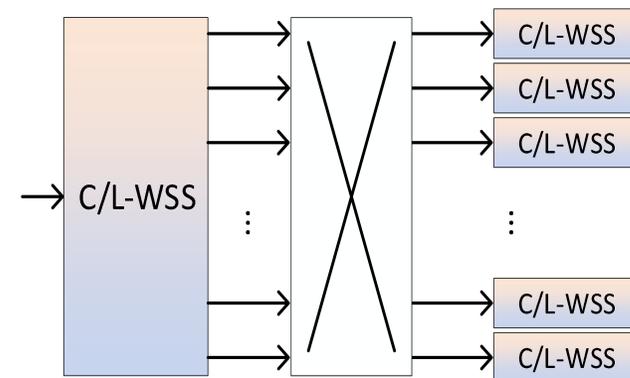
填充波 + 自适应均衡抑制SRS功率转移产生的性能劣化

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

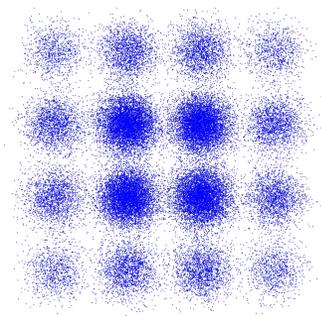


目标: C+L一体化的ITLA、EDFA、WSS等核心关键器件

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

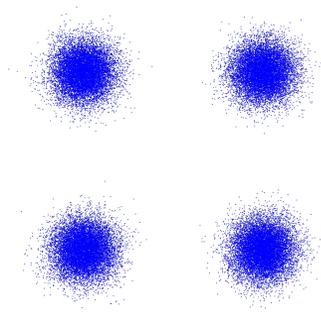


16QAM-PCS

波特率~91GBd

C4T+L4T波段~8THz

传输距离~1000km



QPSK

波特率~130GBd

C6T+L6T波段~12THz

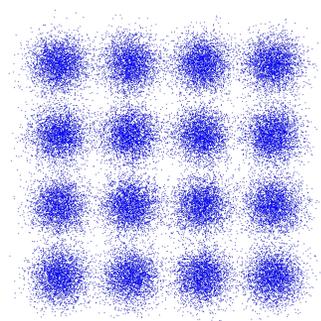
传输距离>1500km

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

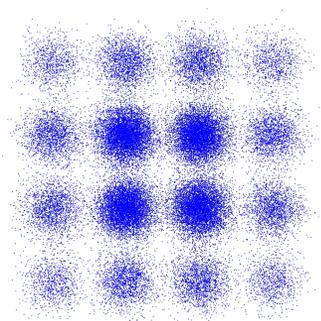


16QAM

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



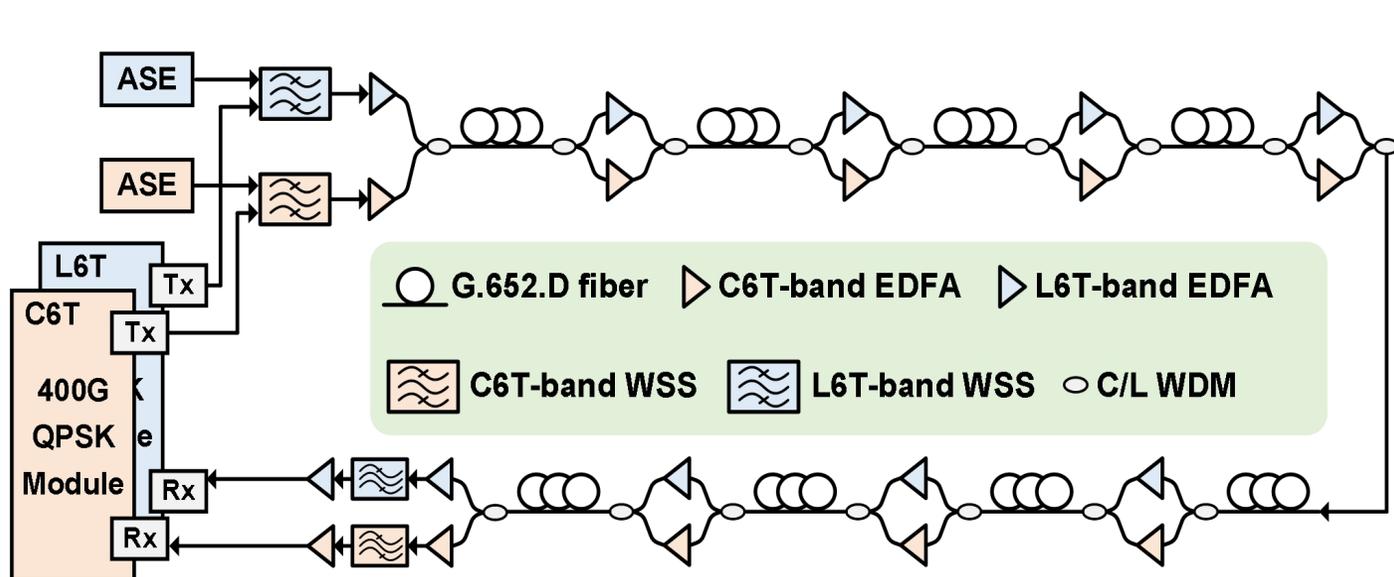
1

400G高速光传输技术及进展

2

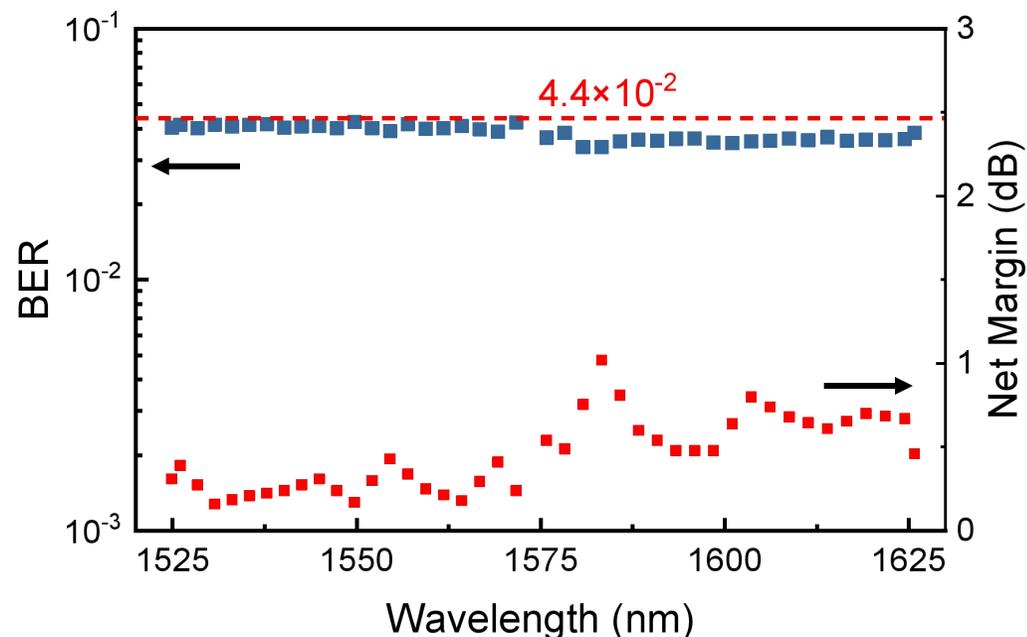
超400G光传输前沿技术探讨

- 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

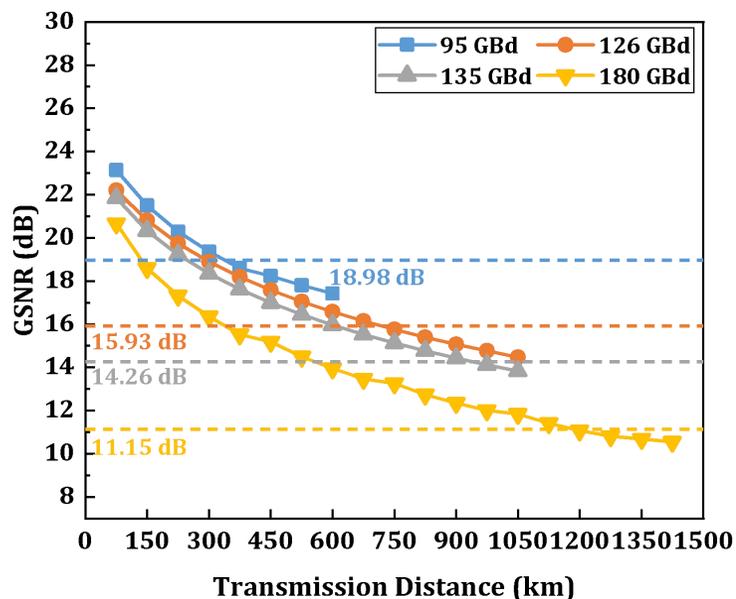
- C6T+L6T, 2个真波+78填充波
- G.652.D光纤+纯EDFA放大



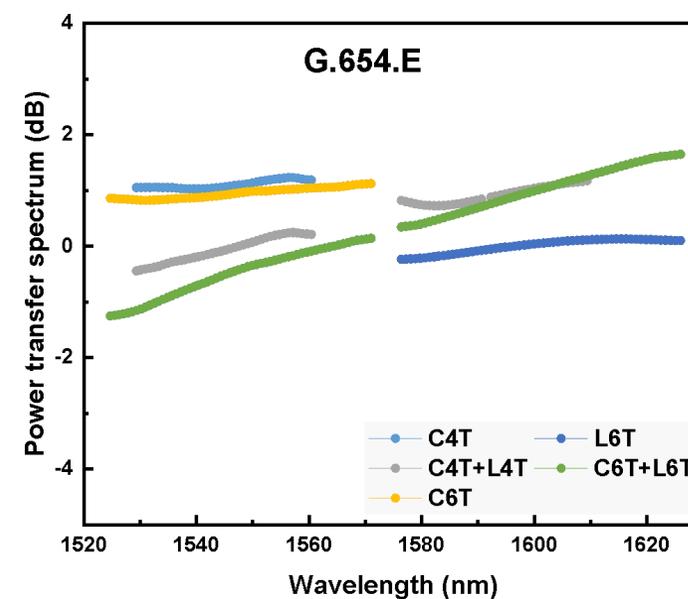
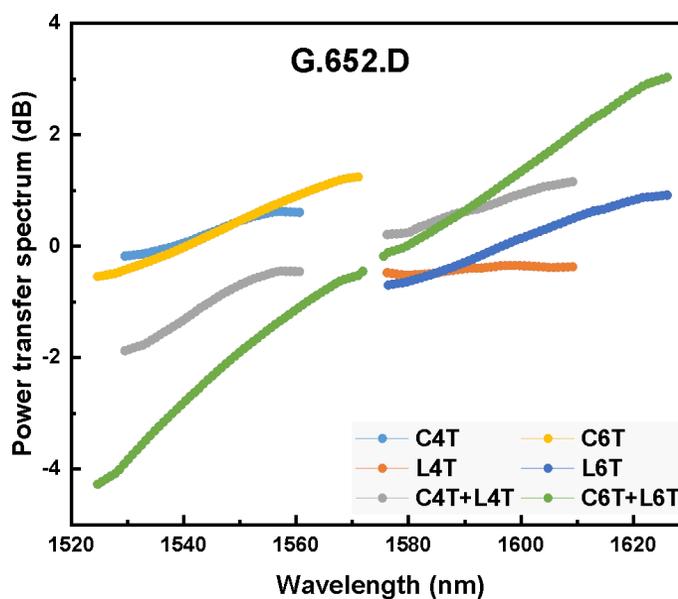
系统末端误码率与净余量vs通道

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)

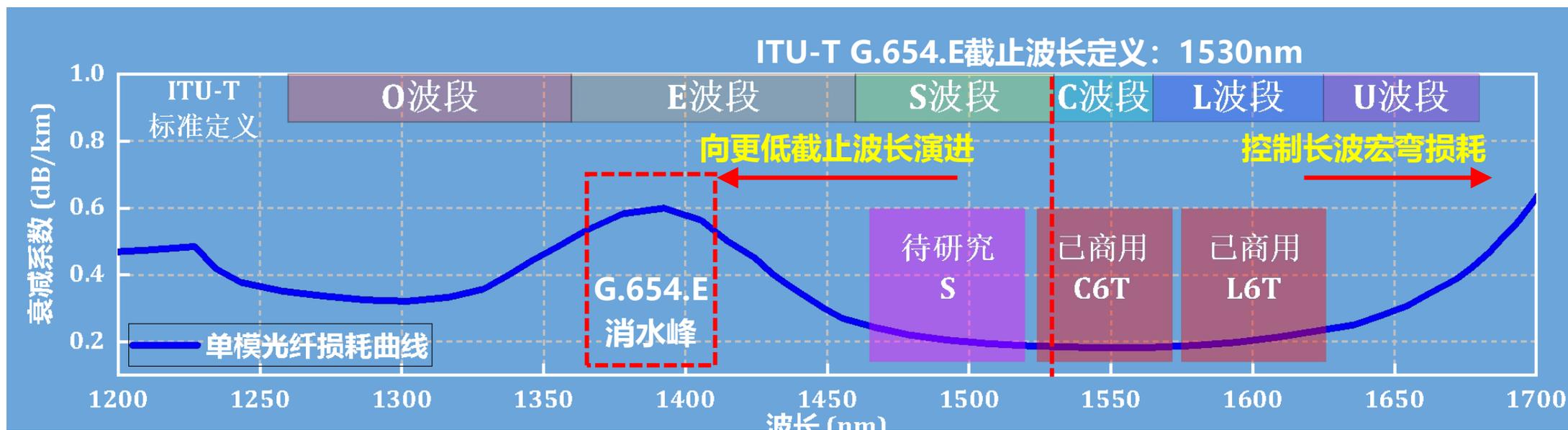


- 800G时代G.654.E光纤相比G.652.D预计将带来**较大的性能提升**
 - 克尔非线性效应+更低的SRS功率转移
 - 80km传输SRS功率转移：**G.654.E~3dB, G.652.D~7dB**

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

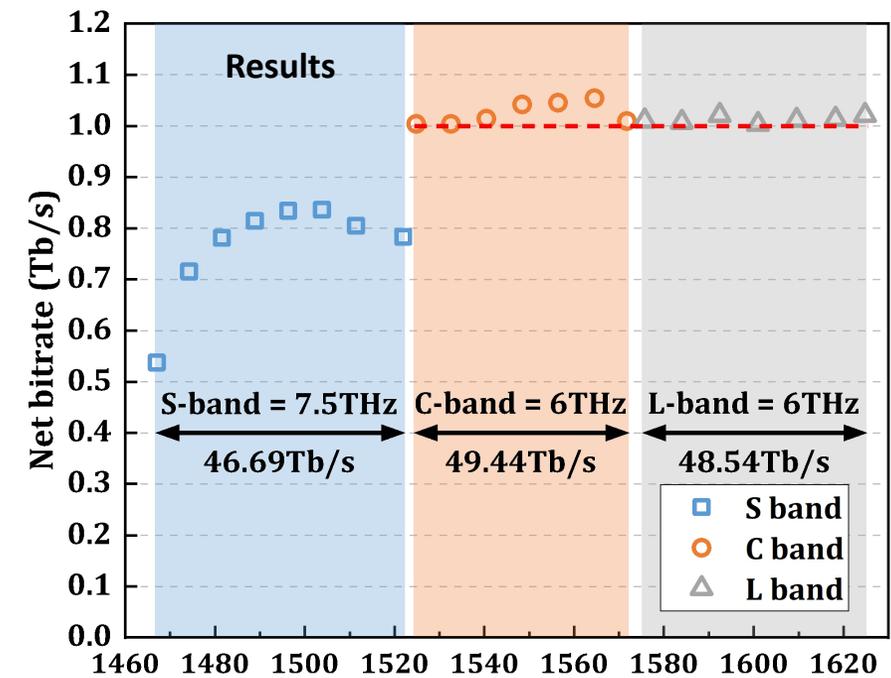
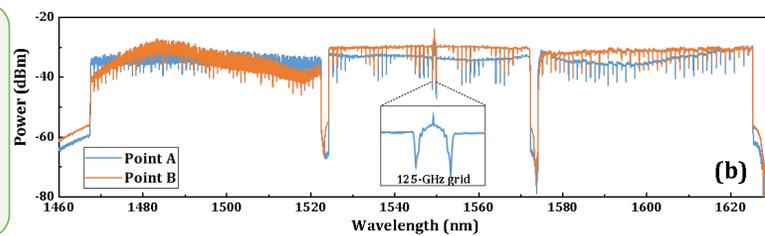
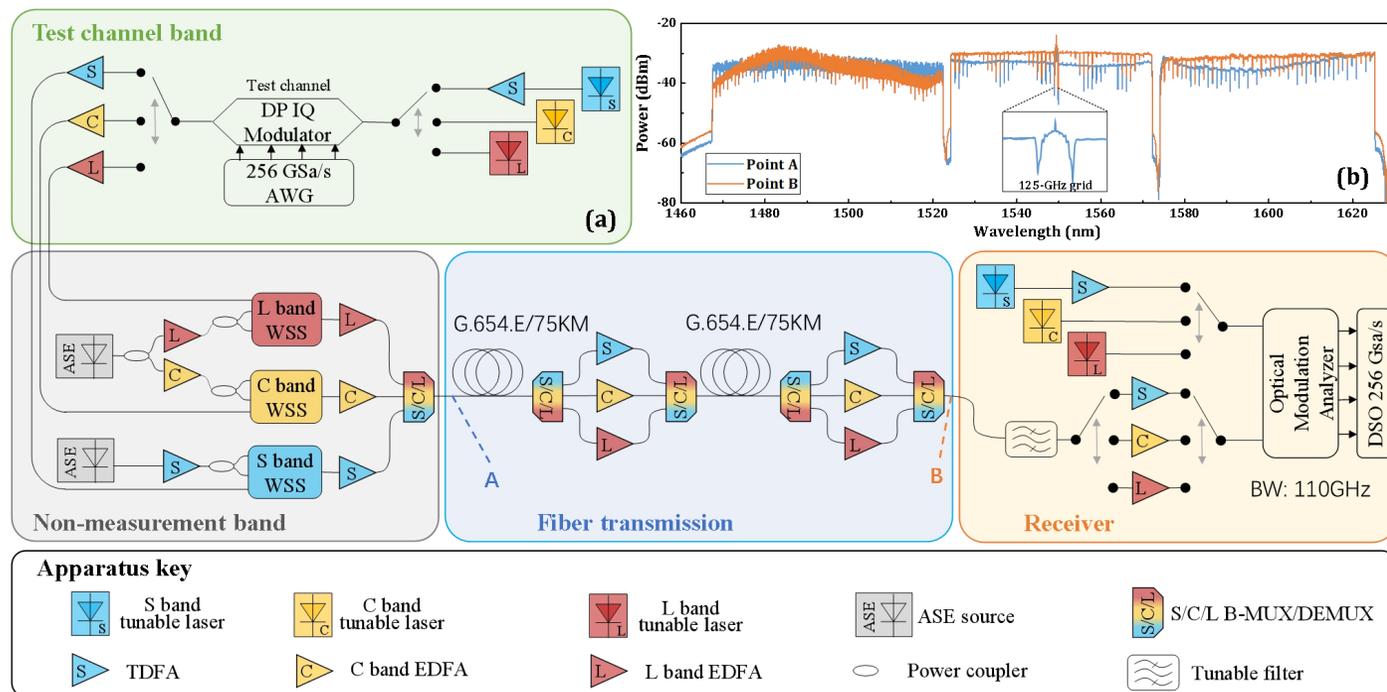
G.654.E目前仅针对C波段定义了传输损耗、宏弯损耗等关键指标

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。



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



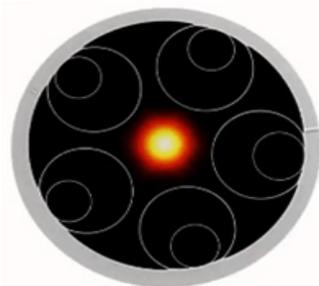
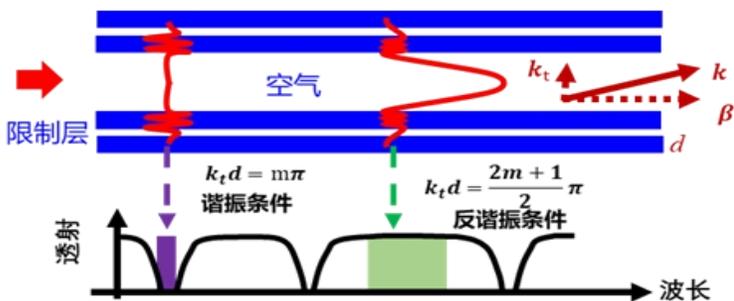
极限1
时延

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

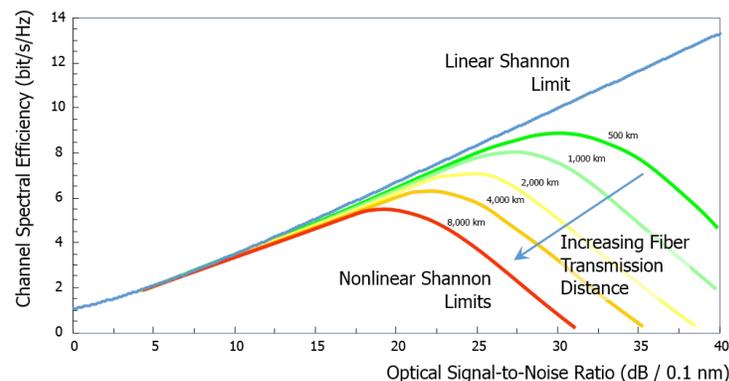
介质光速 \approx 空气光速/真空光速
传输时延降低1/3，突破固有时延极限

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

- **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**



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。