中国移动
China Mobile

中国移动算力网络400G全光网技术试验阶段总结

中国移动研究院

2023年3月2日 浙江宁波

目录

1 光网络构筑算力网络基石

2 中国移动400G技术路线选择

3 400G QPSK现网技术试点

4 面向400G技术的倡议

算力网络 光网先行

中国移动锚定“世界一流信息服务科技创新公司”新定位，系统打造“5G+算力网络+智慧中台”新型信息基础设施，创新构建“连接+算力+能力”新型信息服务体系，力争实现“网络无所不达、算力无所不在、智能无所不及”，助力全社会提升运用新一代信息技术的效益和效率。

光底座是算力网络的重要组成

核心要求	关键技术
大带宽	400G 大管道
低时延	OXC 全光组网
三个无所	SDN+SRv6

光网络是算力网络的重要基础和坚实底座，是中国移动算力网络创新试验示范网CFITI的重要内容

400G核心技术

目前400G是指单波长能够承载400G类型业务的传输技术

客户侧需求：400GE → 线路侧容器：400G

$$\underbrace{412.5}_{400GE} \times \underbrace{\frac{239}{238}}_{ODUflex} \times \underbrace{1}_{通道数} \times (1 + \underbrace{27\%}_{FEC开销}) = \underbrace{526.076\ Gb/s}_{线路侧总速率}$$

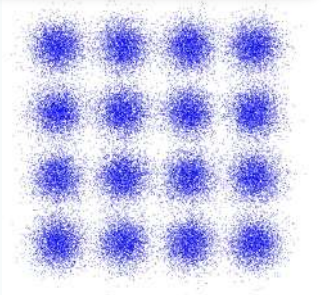
客户侧需求：100GE、100GE、100GE、100GE → 线路侧容器：400G

$$\underbrace{421.033}_{ODUC4} \times \underbrace{1}_{通道数} \times (1 + \underbrace{27\%}_{FEC开销}) = \underbrace{534.712\ Gb/s}_{线路侧总速率}$$

400G技术应满足中短距（城域和部分省干）与长距（骨干）两大传输距离需求

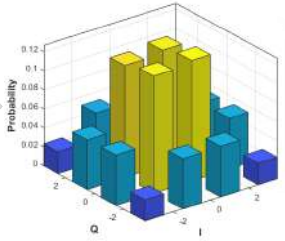
16QAM

$$\underbrace{67}_{波特率} \times \underbrace{4}_{调制阶数} \times \underbrace{2}_{偏振} = 536\ Gb/s$$

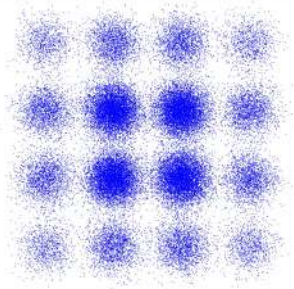


- 波特率：~67GBd
- 波道间隔：75GHz，总谱宽6THz
- **传输距离<600km，满足中短距（城域和部分省干）传输需求**

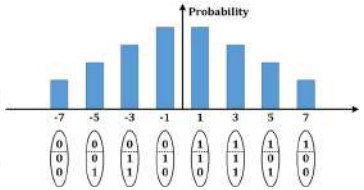
概率星座整形



16QAM-PCS

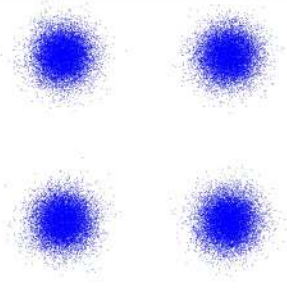


PCS映射机制



- 概率星座整形(PCS)算法→波特率↑~91GBd
- 波道间隔：100GHz，总谱宽8THz
- **纯PCS提升1.53dB，总体提升2.5~3dB，可达~1000km传输距离**

QPSK



$$\underbrace{134}_{波特率} \times \underbrace{2}_{调制阶数} \times \underbrace{2}_{偏振} = 536\ Gb/s$$

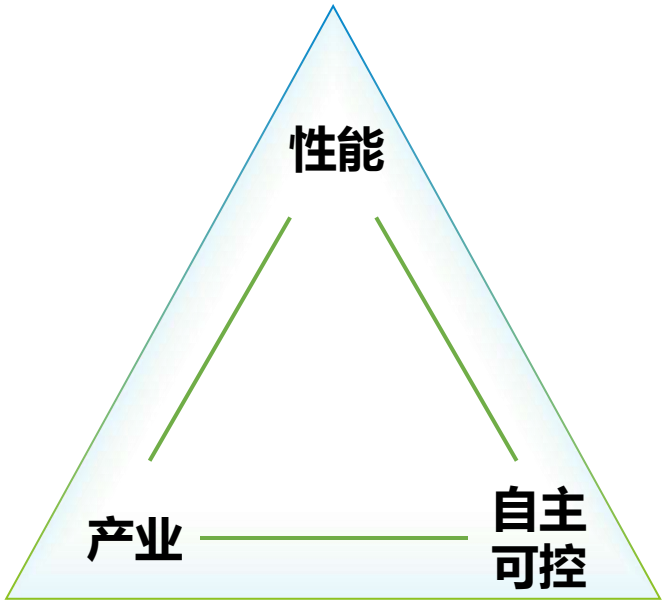
- 800G数据中心需求 → **130+GBd**光模块
- 400G有了新选择，采用QPSK，**OSNR要求降低6dB，算法复杂度最低，传输距离可达>1500km**
- 波道间隔：150GHz，总谱宽12THz

中短距应用重点考虑频谱效率，长距应用重点考虑传输性能，折中评估三大路线的应用场景

400G技术路线选择

中国移动 China Mobile

应综合考虑“性能、产业、自主可控”因素，进行技术路线选择



- 性能满足应用需求
- 产业支持度好、技术生命周期长
- 自主可控、降低风险

高波特率光模块	+	强oDSP	决定 →	制式
OSNR ~3dB 优势		性能优势		16QAM
算法复杂度低		FEC强		16QAM -PCS
器件带宽要求高		功耗高成本高		QPSK

比较焦点

只要高波特率光电器件能够实现自主可控，解决130GBd技术难点，QPSK将是更好的长距骨干方案

中国移动400G技术研发历程

中国移动 China Mobile

5年来，历经4次实验室验证和2次现网试点，中国移动已就400G进行持续性的系统研究和攻关

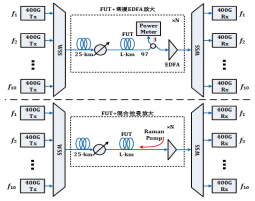
2018~2021.11：基于16QAM重点推动PCS

2018

京津济宁现网试点

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

2021.07-08



实验室测试

- ✓ 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)

2021.09-11

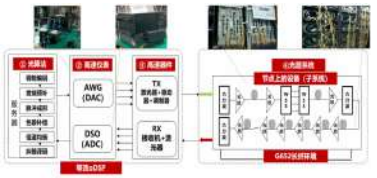
辽宁沈大现网试点

- ✓ 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)

- **由于距离仍然受限，推动引入拉曼放大与G.654E光纤，实现传输距离的增长**
- **100GHz间隔下，是否引入L波段仍有争议**

2021.12至今：推动QPSK走向成熟

2021.12



实验室测试

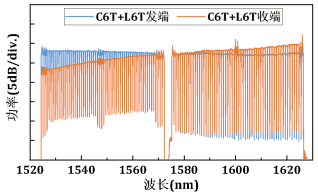
- ✓ 调制格式：**QPSK离线**
- ✓ 光纤：**G.652D**
- ✓ 放大：EDFA
- ✓ 波段：C6T
- ✓ **2000km(7.35dB余量)**

2022.07

实验室拟现网测试

- ✓ 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)**

2022.12



实验室测试

- ✓ 光纤：G.652D/G.654E
- ✓ 放大：EDFA
- ✓ 波段：**C6T+L6T/C4T+L4T**

- **传输距离优势显著，但仍需要经过现网真实场景的检验**
- **推动~130GBd光电器件的成熟**
- **推动C6T+L6T，尤其是L波段EDFA、WSS/OXC的成熟**

400G QPSK现网试点设计

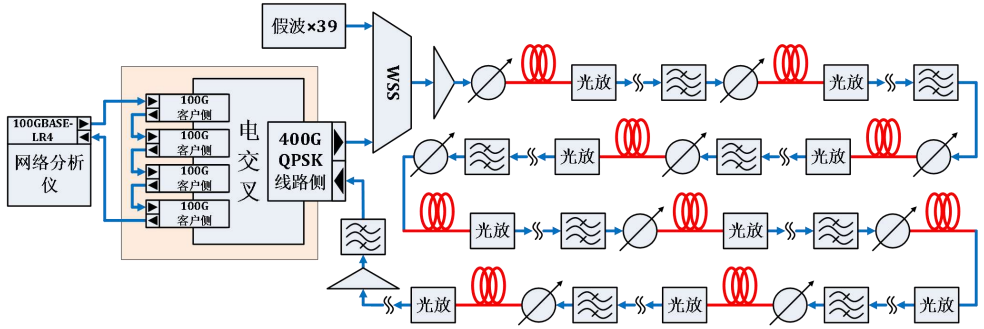
中国移动 China Mobile

在集团技术部、计划部的牵头指导下，具体承担了宁波←→贵安400G QPSK现网试点

路由配置

- ✓ **节点选择**：2个集团级节点——浙江宁波、贵州贵安
- ✓ **链路**：**全G.652D**，单向长度2808km，**跨段数45**，途经**浙江、江西、湖南、贵州**四省，**试点时间2022年11月至今**

宁波←→贵安现网试点路由

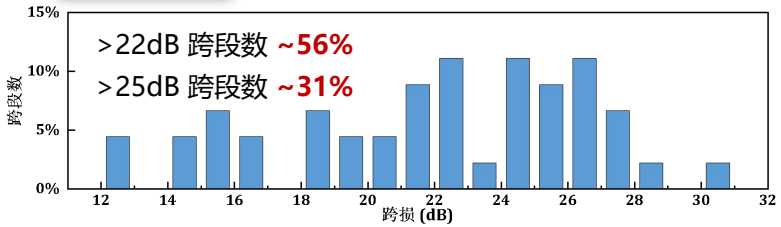


现网试点试验系统框图

考量1 保留光纤维护余量

贴近真实现网，根据设计院指导，全部往返90个光放段均预留了光纤光缆维护余量(0.06dB/km)与接头余量(0.5dB/个)。

考量2 非等跨大衰耗真实跨段



以EDFA为主，部分大跨段采用拉曼+EDFA

考量3 多波调谐配置

1个可调谐真波+39个填充波，遍历C6T波段验证各通道性能

考量4 算力网络业务

链路打通后，加载算力网络业务，进行基于400G全光组网的算力网络业务承载验证

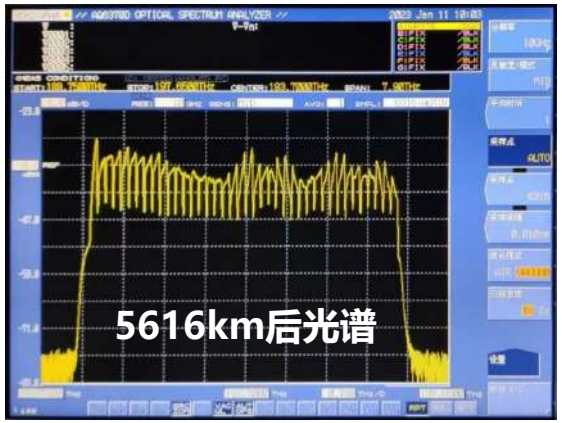
挑战 11/12月疫情影响

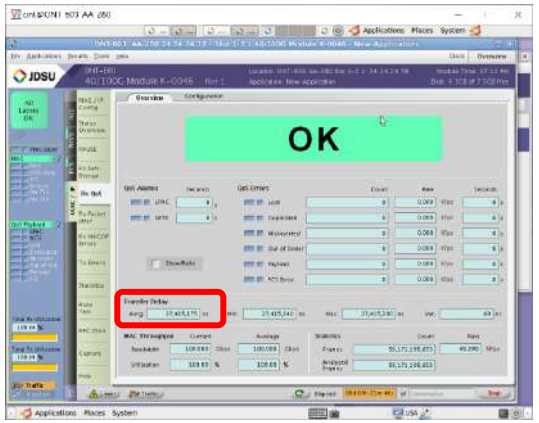
感谢浙江、贵州、江西、湖南公司、集团网络部、研究院、设计院克服年末全国疫情影响，全力支持设备入场、安装、上电、测试。

现网试点测试结果

- 实测QPSK 背靠背OSNR容限15.8dB，相比16QAM-PCS提升1dB，2000km传输后整体提升超2dB
- 完成5616km 400G QPSK实时现网极限传输，仍有2.2dB OSNR余量
- 完成2808km C6T各通道性能遍历，平均余量4.67dB，C6T满波可用
- 本次试点创造了**在现网G.652D光纤预留充分维护余量情况下，400G传输距离世界纪录**

5616km极限传输



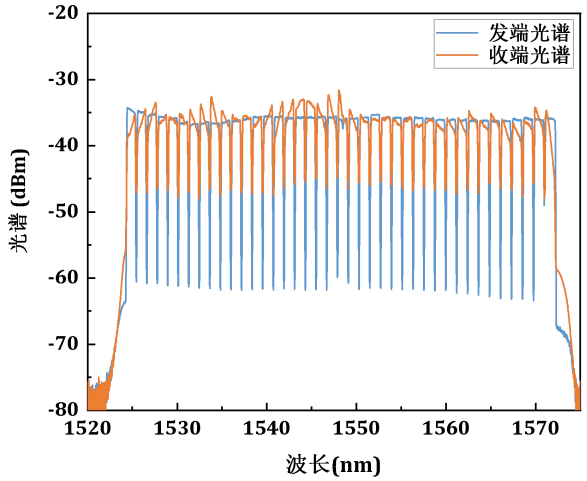


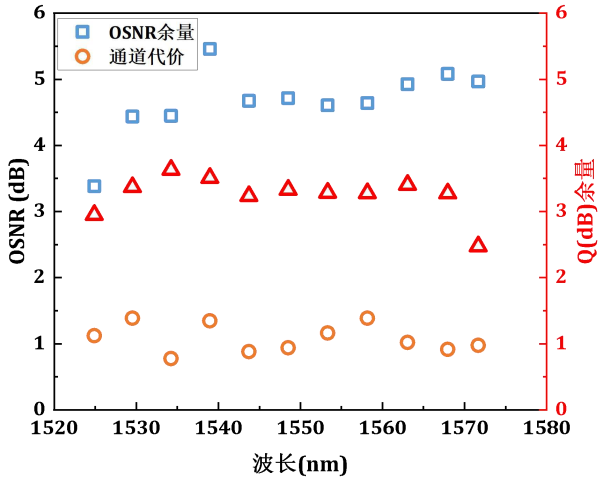
① OSNR余量 = 2.2dB

② 纠前BER= 2.78×10^{-2} < FEC纠错门限

③ 测试期间稳定无误码，时延27.415ms

2808km 遍历通道





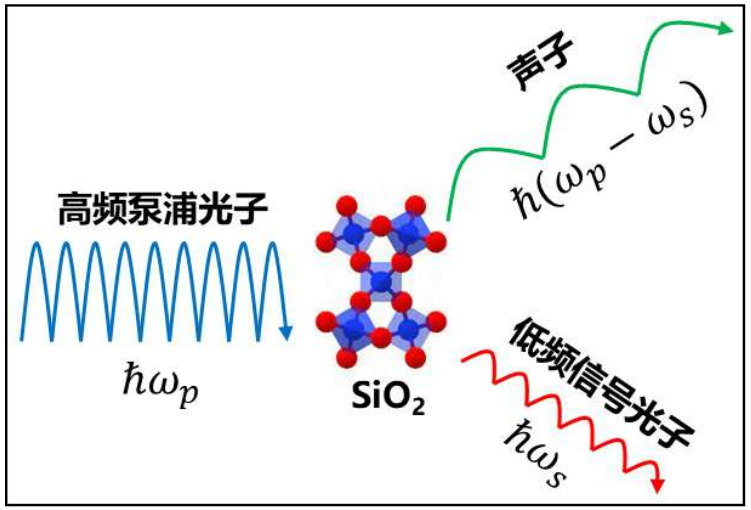
① 平均OSNR余量 = 4.67dB

② 平均通道代价 = 1.08dB

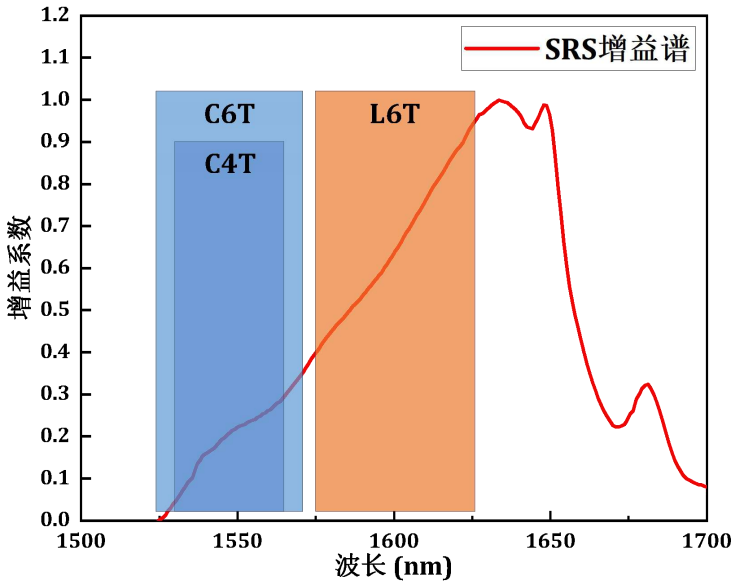
③ 平均Q(dB)余量 = 3.25dB

400G QPSK特有的挑战

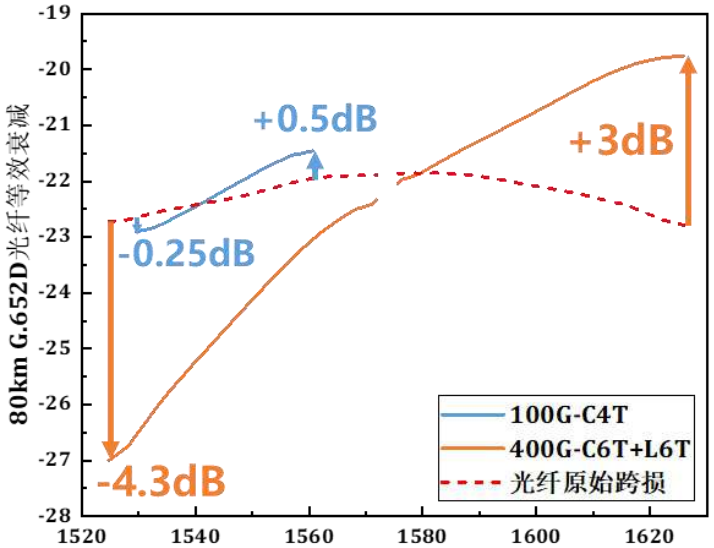
随着频谱扩展至12 THz C6T+L6T后，受激拉曼散射效应（SRS）带来的功率转移问题凸显，给运维带来了挑战，应对各波长入纤功率和逐跨放大分别严格控制，构建完整的系统级规划方案



SRS原理图



SRS增益谱与波段设置



实测SRS对C4T和C6T+L6T的影响

- **来源**：100G时代光谱宽度仅有**4 THz**，**影响可以忽略**；400G时代光谱总宽度达**12.5 THz**，非常接近**13.4 THz的SRS增益峰值**。
- **理论仿真和实验测量**：仿真可知，经过80km G.652D传输，应产生约 8dB的功率差；实验重点验证了SRS问题，**实测最长波+3dB，最短波-4.3dB，与仿真基本一致**，此为400G带来的全新问题，需调整入纤功率以控制SRS，对运维将造成很大挑战。
- **解决方案**：**依靠仿真与智能控制相结合，实现光网络数字孪生，一键下发无需逐段手工调节，运维无感知**

400G技术和产业推进倡议

1. 加速推动400G QPSK技术成熟，并在骨干长距传输商用

2. 加速推动~130GBd光电器件规模商用进程，并收敛具体波特率数值

3. 持续提升oDSP自主可控能力，并进一步向绿色、低功耗演进

4. 加速推动光层器件从C波段向L波段拓展，全面支持12THz光谱宽度，包括ITLA、CDM、ICR、EDFA及WSS等

5. 提升智能规划及自动化均衡能力，克服SRS带来的功率转移影响

6. 推进G.654E超低损耗光纤支持更低截止波长，并加快部署

7. 加速拉曼等新型线路放大技术成熟和应用，克服大跨段和超长距覆盖难题

中国移动愿携手各方推进400G技术和产业成熟

开放　创新　合作　共赢