

# 构筑极致性能的智能超高速光网络

——华为新一代高速相干传输系统



HUAWEI

**版权所有 © 华为技术有限公司 2018。保留一切权利。**

非经本公司书面许可，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本文档内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。

## 商标声明



和其他华为商标均为华为技术有限公司的商标。

本文档提及的其他所有商标或注册商标，由各自的所有人拥有。

## 注意

您购买的产品、服务或特性等应受华为公司商业合同和条款的约束，本文档中描述的全部或部分产品、服务或特性可能不在您的购买或使用范围之内。除非合同另有约定，华为公司对本文档内容不做任何明示或默示的声明或保证。

由于产品版本升级或其他原因，本文档内容会不定期进行更新。除非另有约定，本文档仅作为使用指导，本文档中的所有陈述、信息和建议不构成任何明示或暗示的担保。

## 华为技术有限公司

地址：                深圳市龙岗区坂田华为总部办公楼                邮编：518129

网址：                <http://www.huawei.com>

客户服务邮箱：      [support@huawei.com](mailto:support@huawei.com)

客户服务电话：      4008302118

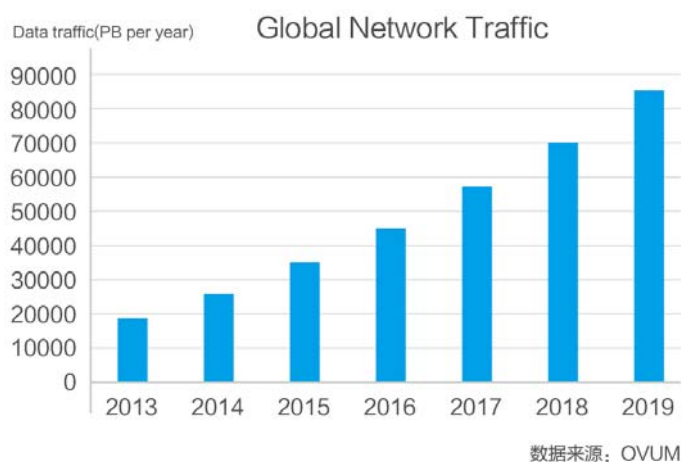
# 目 录

<b>1 新时代光网络的挑战 .....</b>	<b>1</b>
1.1 光纤上的摩尔定律 .....	1
1.2 超 100G 时代，传输容量与距离必需并重 .....	2
1.3 oDSP 算法是高性能高速传输的关键 .....	2
<b>2 华为新一代相干 oDSP 算法关键技术 .....</b>	<b>3</b>
2.1 核心技术 1：信道匹配整形（CMS） .....	3
2.1.1 为什么需要 CMS? .....	3
2.1.2 什么是 CMS? .....	4
2.1.3 CMS 能够给网络具体带来哪些好处? .....	6
2.2 核心技术 2：光层 AI 神经元 .....	6
2.2.1 为什么要在 oDSP 中集成光层 AI 神经元? .....	6
2.2.2 什么是光层 AI 神经元? .....	7
2.2.3 光层 AI 神经元能够给网络具体带来哪些好处? .....	8
<b>3 华为面向超 100G 时代的高速相干传输方案 .....</b>	<b>9</b>
3.1 高性能系列 .....	9
3.2 低功耗系列 .....	9
3.3 网络应用案例分析 .....	10
3.3.1 案例 1：高性能帮助降低建网成本 .....	10
3.3.2 案例 2：低功耗帮助降低运营成本 .....	10
3.3.3 案例 3：自适应算法帮助提升系统可靠性 .....	11
<b>4 展望：我们是否真的到达极限了吗? .....</b>	<b>13</b>

# 1 新时代光网络的挑战

## 1.1 光纤上的摩尔定律

分析机构 OVUM 的报告显示，从 2013 年开始，全球网络流量呈现高速增长态势，大约每三年增长一倍<sup>1</sup>。在 5G、4K 视频、企业专线业务的驱动下，未来网络流量将保持超过 25% 增速，而在部分地区，如中国，网络流量增速甚至将高达 40%<sup>2</sup>。



<sup>1</sup> Network Traffic Forecast, OVUM

<sup>2</sup> OFC 2018 Plenary, China Telecom

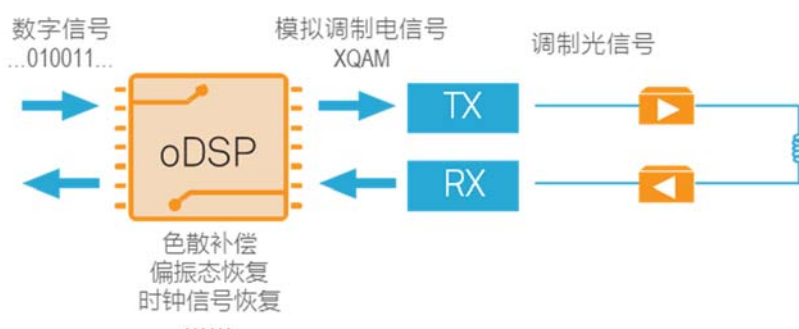
为了满足流量高速增长的需求，光网络传输技术也在快速发展，从单波速率 10G 发展到 100G，而如今单波 200G 也已逐渐成熟并大量部署，单波 400G 技术也在逐渐开始少量商用，600G 甚至更高速率的商用也将很快出现。从单纤容量的角度看，光网络也存在这类类似摩尔定律的经验性规律：单纤容量呈现每三年翻一倍的高速增长趋势。

## 1.2 超 100G 时代，传输容量与距离必需并重

提升单波速率是应对光纤上的摩尔定律最有效的思路，但同时我们也正在逐步逼近理论上的香农极限：单波速率越高，传输距离越短。事实上，在大多数超 100G 的高速传输场景，传输距离是限制其推广应用的主要因素。对于大部分网络来说，单纤容量翻倍固然是好事，但如果需要以传输距离作为代价，并且不得不在网络中添置更多的电中继站点，则会大幅增加网络的建设成本。因此，在超 100G 时代，光网络朝着更高速率演进的同时，还必须关注传输距离是否能够满足组网需求。

## 1.3 oDSP 算法是高性能高速传输的关键

一个典型传输系统中的相干接收机主要包括 3 部分：oDSP（Optical Digital Signal Processor）、发射机和接收机。其中 oDSP 是整个系统中最为核心的部件，其不仅用于数字信号/模拟信号的编解码，还需要对传输链路中的诸多代价进行补偿。比如一个典型的 100G 相干传输链路可以传输几千公里，而不需要任何色散补偿模块，这正是因为 oDSP 内部算法能够补偿链路色散代价，进而简化链路，并且大幅提升传输性能。因此 oDSP 芯片的能力将直接决定系统传输能力，包括传输容量、传输距离、单位 bit 功耗等等。另外，从产业链角度看，除了 oDSP 之外，其他部件如发射机、接收机一般都有多个成熟器件商可供选择，这使得 oDSP 成为区分不同厂家技术实力的最重要元素。



# 2 华为新一代相干 oDSP 算法关键技术

华为新一代相干 oDSP 算法采用了两个独有的关键技术，用于提升传输性能：

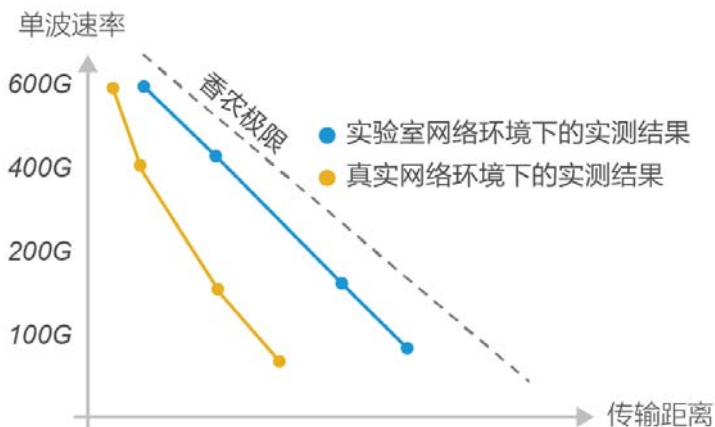
- 信道匹配整形（Channel-Matched Shaping，简称 CMS）：基于真实传输链路情况，进行系统层次的传输性能优化，实现真实传输效果的容量、距离最大化。
- 光层 AI（Artificial Intelligence，人工智能）神经元：采取分布式架构，在全网范围对所有光层关键参数进行实时监测，并结合 AI 算法实现网络智能化。

此外，结合业界领先的 TSMC 16nm FinFET 制造工艺以及极简芯片架构，能够大幅降低系统功耗。

## 2.1 核心技术 1：信道匹配整形（CMS）

### 2.1.1 为什么需要 CMS？

当前 400G\600G 传输的最大限制在于距离，如果单从系统能力上看，我们已经十分接近香农极限了。但是，很多时候我们依然会有疑问：为什么我在实验室测试的时候可以传输 2000km，结果到实际网络中变成了 500km 呢？是什么导致我的传输性能缩水呢？**这正是华为 CMS 希望解决的问题：如何提高真实网络系统的传输性能，而非实验室中的英雄实验。**

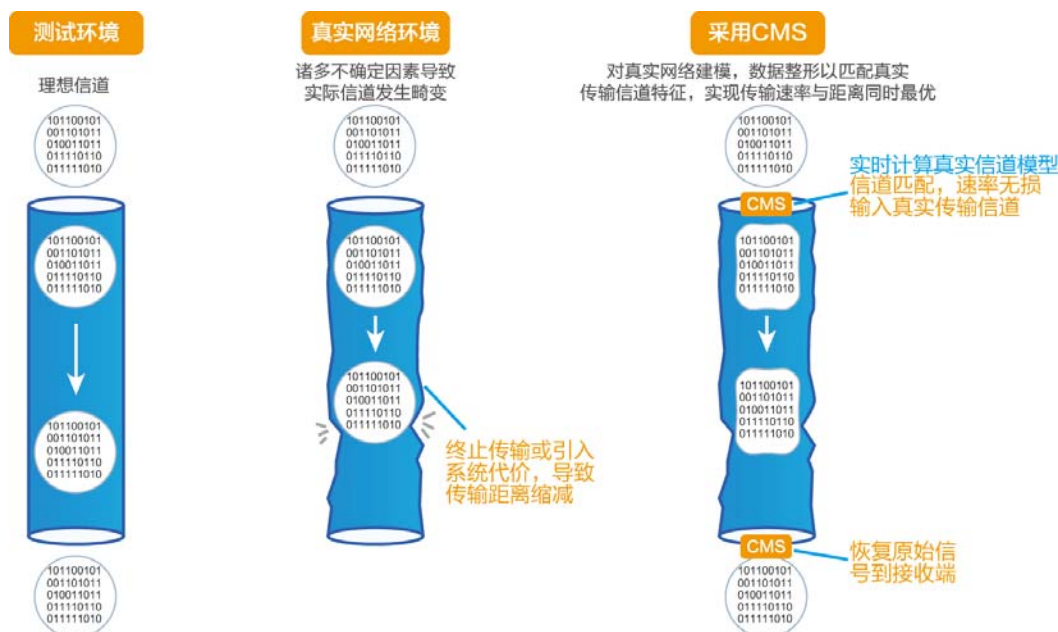


**我们发现，造成性能差异的主要原因是现实世界的不完美。**我们在实验室环境下可以采用性能最好、最可靠的器件，在最稳定的环境下进行测试，以得到非常接近于理论极限的结果。但在真实网络中，情况则与实验室环境完全不同：光纤质量不同，光纤内功率分布不同，放大器的噪声不同，滤波器的曲线也不同，光纤链路的环境温度不同，天气情况不同等等，每一类的不完美因素都会给实际光网络系统引入一点代价，最终诸多来源不同的代价叠加导致整体系统性能劣化，缩减传输距离或者导致链路彻底失效。因此对于实际网络系统而言，**如何消除这些现实网络中种类繁多的不完美因素，补偿其所带来的系统代价，对于实际的网络使用者来说，是一个更加实际也是更加急迫的问题。**这正是华为在设计相干算法时引入 CMS 的出发点。

## 2.1.2 什么是 CMS?

在华为的新一代相干 oDSP 算法中，我们开发并采用了独有的 CMS 技术（Channel-Matched Shaping，信道匹配整形），目的填补现实网络与实验室测试之间的鸿沟。该技术是一系列整形、压缩、补偿、纠错技术的组合，分别用于应对实际光网络系统中不同类型的传输代价。

图2-1 采用 CMS 技术，优化真实网络环境下的传输性能



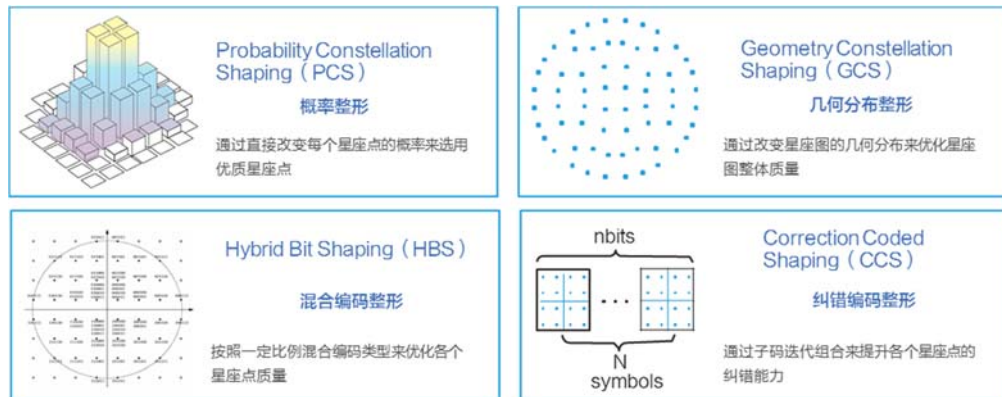
CMS 技术首先通过检测真实信道的传输效果，获取信道损伤模型信息，然后一方面在发送端对光信号进行压缩、整形以匹配传输信道模型，另一方面在收端对接收的光信号采取补偿、纠错进行数据恢复。其中所采用的整形、压缩、补偿、纠错算法均依据真实信道损伤模型，由内置算法实现自动优化设置，达到传输链路实时动态自我优化的效果。同时，CMS 通过快速迭代信道模型参数，能够提升信道模型的精确程度，实现更好的信道匹配效果。整个优化过程完全由 oDSP 芯片自动完成，无需人工干预。

具体来说，CMS 包含以下几项关键技术，用于应对来自三个维度的系统代价：



- 编码整形：应对系统噪声代价。

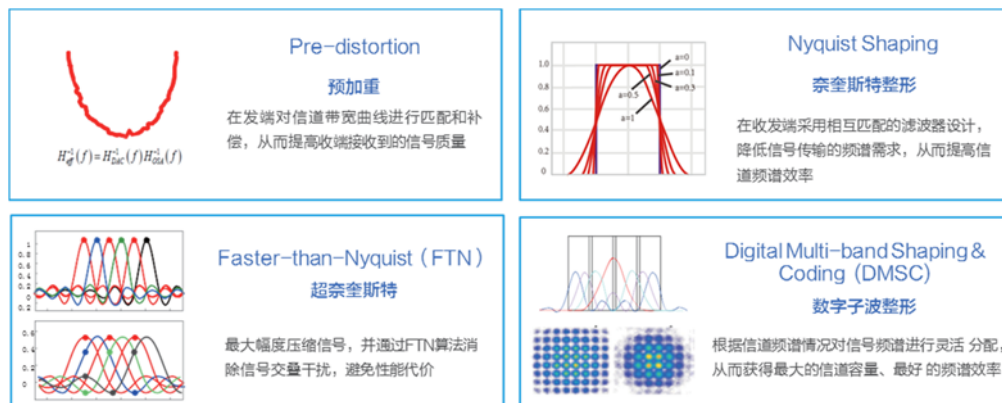
在真实传输链路中，发射机、光放大器、驱动芯片等部件会不可避免地引入噪声，给传输系统带来额外代价，同时这些噪声往往很难精确测量或是会随着网络运行状态发生变化（如器件老化、光功率变化等等）。应对这类系统代价的技术本质是在星座图上选取匹配真实信道特征模型的、更加优质的星座点来传输有效信息，尽量避免使用噪声影响大的星座点，以削弱噪声带来的影响。具体关键技术主要包括以下 4 种：



- 频谱整形：应对信道带宽代价。

信道中调制器、滤波器、模数/模数转换器、接收机等真实器件的物理带宽与传输信号失配，导致信号衰减严重，带来传输代价。其应对思路是借助多种频谱整形技术对信道带来的此类损伤进行匹配补偿，把信道损伤降到最低。

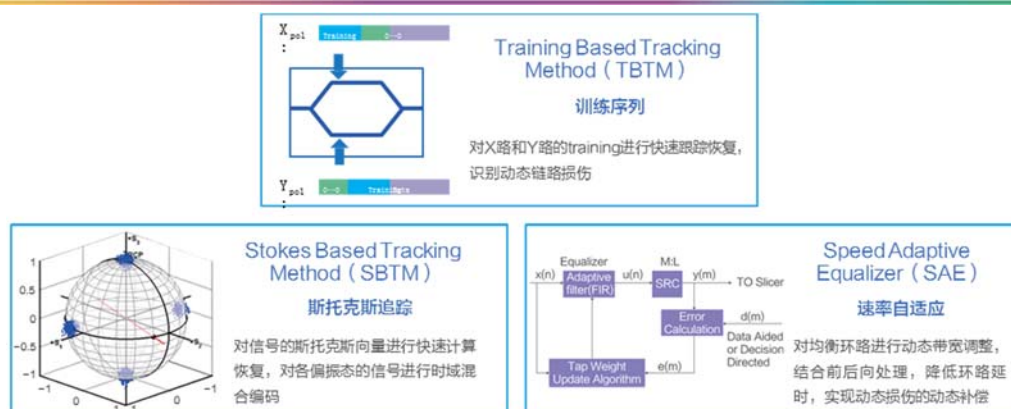
具体关键技术主要包括以下 4 种：



- 动态损伤整形：追踪并应对真实信道的动态干扰代价。

真实网络中存在大量不确定因素，如：光纤的晃动和碾压、器件的故障和老化、突发的恶劣天气等，这些意外会导致的传输信道发生无法预知的剧烈畸变（比如信号相位、偏振等特性），因此需要对真实传输信道进行实时匹配，对信道变化进行快速跟踪补偿，把性能代价做到最低，提升整体系统的可靠性。实现技术上主要以动态损伤整形（Dynamic Distortion Shaping）为基础，具体关键包含以下 3 种：





CMS 综合利用上述一系列关键技术，针对光网络中实际信道状况进行动态实时优化，不仅能够给实际网络带来真正的性能提升，对于信道的状态变化，CMS 也能够迅速做出反应，快速自动匹配并调整优化设置，保障链路通畅。

## 2.1.3 CMS 能够给网络具体带来哪些好处？

- 更好的现网传输性能，同时保障传输容量和传输距离

CMS 充分综合利用多种技术组合，调节机制非常灵活，自动建立真实网络模型并进行优化，能够迅速寻找到与真实信道匹配的最佳设置，同时保障传输容量与传输距离的组网要求。

- 提升系统可靠性

CMS 能够感知实际信道的状态变化（如器件劣化、光纤应力变化、非线性效应等），在一定范围内实现算法优化策略的动态自主调整，保障性能最优。

- 简化部署、运维

CMS 能够自动匹配实际信道，通过快速迭代模型参数，迅速收敛至最优配置，降低人工部署、运维配置的复杂度。

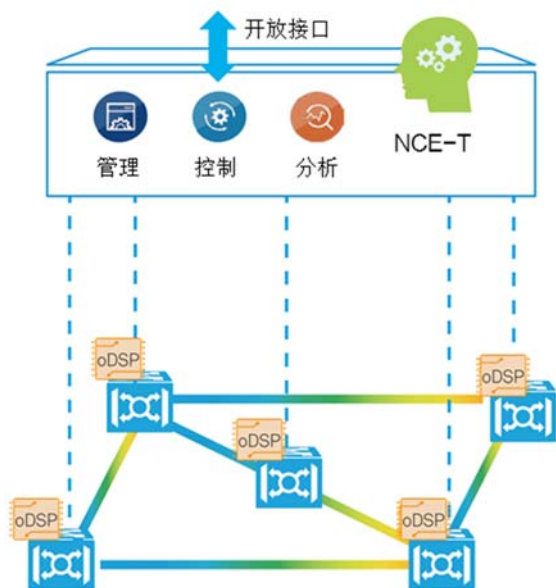
- 兼容新老网络

CMS 具备灵活栅格（Flexgrid）特性，支持 50GHz 信道间隔的老旧网络平滑升级。

## 2.2 核心技术 2：光层 AI 神经元

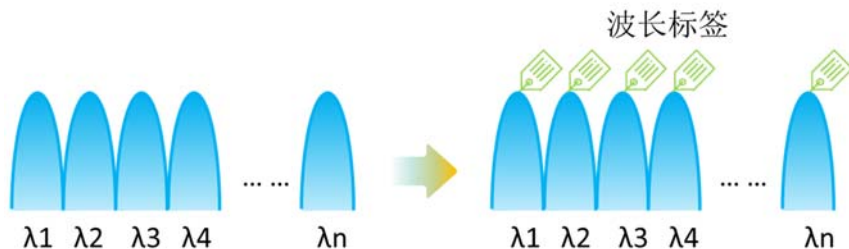
### 2.2.1 为什么要在 oDSP 中集成光层 AI 神经元？

人工智能是网络智能化的关键使能技术，而海量、精确的光层网络状态参数是人工智能实现真正商用的基础。oDSP 广泛分布在网络各个节点中，并且具备一定的分析能力，通过在 oDSP 中集成光层 AI 神经元功能模块，能够在光层网络实现分布式全覆盖，并且在不改变网络设备形态的前提下（功能模块内嵌，无需额外设备），实时精确感知所有光层网络状态参数，用于支撑控制层的 AI 分析、运算功能，辅助运营商进行网络区域性或者全局的故障提前预警、业务调度、配置和优化。



## 2.2.2 什么是光层 AI 神经元？

光层 AI 神经元是一个功能模块，被集成在华为最新一代 oDSP 中（此外，所有光放节点也具备该功能），用于感知网络中所有波长信道在 L0 光层上的运行状态参数。不同于其他市面上的解决方案，光层 AI 神经元完全集成于网络设备及模块中，不需要额外设备。其原理是在发送端通过 oDSP 将光层标签加载到所有波长信道上，当该波长经过网络中任意具备检测功能的节点时，该波长信道的标签被提取，同时将其一系列光层状态数字化，实现光层网络可视化管控。



光层 AI 神经元仅限于感知光信号在 L0 层传输状态参数，作为整体光网络优化的基础，具体包括以下状态信息：

- 光信噪比（OSNR）
- 色散（Dispersion）
- 偏振态（Polarization state）
- 偏振态变化（Polarization change）
- 非线性效应（Nonlinear effect）
- 链路余量（Link margin）

- 滤波特性 (Filtering)

### 2.2.3 光层 AI 神经元能够给网络具体带来哪些好处？

- 光层波长可视化管控

通过 oDSP 对所有波长添加“标签”，全网波长可追踪，实现光层透明化、可视化管控。

- 内嵌功能模块，方便部署

光层 AI 神经元集成于网络设备，无需额外部件，可轻松实现全网分布式部署，精确定位并感知到每个节点的光层运行状态。

- 支撑 AI 应用，向意图驱动的智能网络 (Intent-Driven Network, 简称 IDN) 演进

基于光层 AI 神经元感知光层网络的所有状态参数，配合控制层面的 AI 优化算法，实现网络智能化管控，支持未来向意图驱动的智能网络 (IDN) 平滑演进。一个典型应用是网络风险的提前预警：基于 oDSP 反馈的海量光层网络状态参数，AI 系统对光网络建立数字模型，并通过自主学习功能确立该特定网络的运行模式。一旦某个参数出现异常变化，即使业务没有中断，AI 系统将进行判断可能的潜在风向，确认异常参数类型，并精确定位异常设备位置，实现提前预警。运维人员能够以此为基础，决定是否提前进行维护，或者安排后续网络维护计划。除此之外，其他可能的应用还包括网络性能动态优化、光层资源动态调配等等。

# 3 华为面向超 100G 时代的高速相干传输方案

为了更好地支持超 100G 时代下的各种不同应用，华为延续其在 oDSP 算法上面的一贯技术路线，在最新一代 oDSP 系列中推出两款设计，分别对应高性能场景和低功耗场景。

## 3.1 高性能系列

- 支持 100G-600G 速率灵活可调，支持信道间隔 50GHz~75GHz 灵活可调；
- 采用全新 CMS 算法，传输性能相比此前芯片提升 30%~60%
- 内置光层 AI 神经元
- TSMC 16nm FinFET 制造工艺
- 模块形态：4x5 小型化 MSA
- 适用场景：
  - 100G/200G 超长距干线（支持 3000+km 传输，如骨干网络、海缆应用）；
  - 400G~600G 超大容量互联场景（支持 80km~500km 传输，如数据中心互联，城域网）；
  - 比较复杂的 mesh 化网络拓扑环境；
  - 流量去向难以预测，需要经常重建光层拓扑的网络（如 WSON）；
- 5) 部署环境较差，需要较大余量的网络。

## 3.2 低功耗系列

- 支持 100G/200G 速率可调
- 精简芯片设计，超低功耗（0.1W/Gbit）
- 采用全新 CMS 算法，并且针对 50GHz 间隔传输进行特殊优化，200G 支持 1600km+ 传输，便于现网 50GHz 间隔平滑升级扩容
- 内置光层 AI 神经元
- TSMC 16nm FinFET 制造工艺
- 模块形态：CFP-DCO

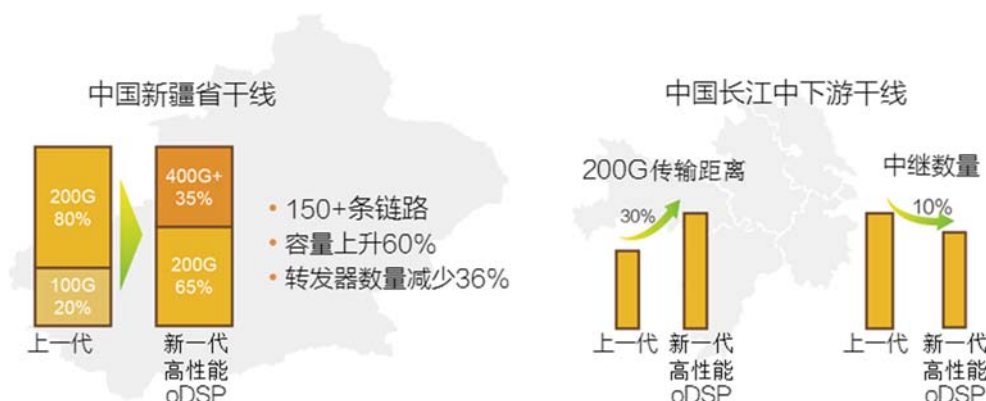
- 适用场景：
  - 低功耗、高集成度的城域场景；
  - 现有网络基于 50GHz 固定间隔，同时需要升级扩容的场景；
  - 其他需要低功耗、可插拔光模块的场景

## 3.3 网络应用案例分析

### 3.3.1 案例 1：高性能帮助降低建网成本

高性能 oDSP 可以从两个维度来帮助客户获得更大的传输容量及更低的单 bit 成本，一方面，华为高性能 oDSP 支持从 100G 到 600G 的弹性速率，客户可以根据实际信道的情况选择最合适的线路速率，从而获得更大的传输容量/更低的单比特成本；另一方面，得益于最新的 CMS 算法，最新一代高性能 oDSP 相比于上一代，200G 以上的线路性能均有 50%~100% 的提升，这使得对于区域干线网络来说，可以有更多的链路升级到 200G 以上的速率，也减少了中继的使用数量与建网成本；

一个例子是中国的新疆省干线，总共 150+ 条链路，与上一代的 8013（或者说是与上一代 100G/200G 系统）相比，采用了最新一代高性能 oDSP 进行组网后，200G 以上的链路覆盖率从 78.8% 上升到了 100%，35.2% 的链路可以升到 400G，容量上升 60%，转发器数目减少 36.5%



即使是对于性能要求较高，难以使用超过 200G 的高阶调制的长途干线网络，华为最新一代高性能 oDSP 中的 CMS 算法仍然能帮助客户尽量减少中继数量。一个例子是中国长江中下游干线网络，得益于新的 CMS 算法，200G 的传输距离相比于此前的产品提升了 30% 以上，使得客户的中继数量减少了 10%，从而降低了建网成本；

### 3.3.2 案例 2：低功耗帮助降低运营成本

随着网络流量的持续增长，功耗正在成为运营商面前的另一个挑战。华为新一代低功耗系列 oDSP 针对可插拔模块场景做了深度优化，不仅支持高性能 100G/200G 传输，并且能够匹配 50GHz 信道间隔，完美兼容传统网络。



华为的高性能 200G CFP 模块采用新一代低功耗系列 oDSP 以及最先进的硅光技术，不仅提升 200G 传输性能，还大幅降低了功耗，缓解单板散热，使得单板能力从 2\*200G 提升到了 5\*200G，单板容量提升了 2.5 倍，每比特功耗降低了 60%。

机柜数减少 2/3，功耗减低 50%



以一个 3 机柜（9800 U32）的典型站点为例，按照单槽位 400G 的能力计算，每个机柜的容量按照 10T 配置，整个站点的容量为 30T。如果全部采用基于新一代低功耗系列 oDSP 的 CFP 模块，能够实现单机柜 30T 的配置，机柜数量减少 2/3，整体功耗降低 50%，每年可以给该站点节省用电 10 万度。此外，机房空间得以缩减，散热压力减小，降低维护成本。

### 3.3.3 案例 3：自适应算法帮助提升系统可靠性

相干光传输系统中采用的是相位调制，接收端需要对信号相位进行持续跟踪，才能保证解调出来的相位信息准确无误。但现网信道经常会出现一些极端环境，导致信号受到极大冲击，此时是否依然能够保证对信号相位的有效跟踪，是衡量 oDSP 能力以及传输系统性能的关键指标。

华为在全球部署了超过 300 张 100G 相干网络，其中就遇到过这样的极端场景。譬如在亚洲北部荒原，某运营商的光纤采取了沿铁路沿线架空的铺设方式，每当铁路上有火车经过时，巨大的振动使得光纤中的信号相位急剧变化，往往超出正常情况数百倍；另一个类似的例子是在某热带国家，当地频发雷雨天气，经常导致链路出现误码，原因是闪电的电离效应使得光纤中信号的偏振状态（State Of Polarization, 简称 SOP）极速变化，导致了接收段信号失锁。



为了应对各种极端条件，华为建立了专门的可靠性实验室，可在实验室中模拟雷击等极端条件，以确保新的设计可以满足各种恶劣条件下的应用。在新一代 oDSP 的 CMS



算法中针对信道中可能出现的异常冲击，加强了相关算法的补偿和跟踪能力，以 200G 16QAM 信号的偏振状态跟踪能力为例，华为新一代 oDSP 相比上一代设计提升了一倍，能够应对更加恶劣的网络环境，应对几乎所有真实环境中可能出现的震动、恶劣天气的影响。

# 4 展望：我们是否真的到达极限了吗？

如果我们回顾一下光网络的历史：

- 单波 100G 到单波 600G 超高速传输，我们仅仅用了大约 7 年时间。
- 单波 200G 传输性能在 2 年之内提升了大约 50%。
- 单波 100G 传输的功耗在 2 年之间降低了至少 50%。

在华为看来，**我们还远没有达到光纤的传输极限**，尤其是在现实网络中，无论是容量、距离还是功耗，都还有很大潜力。oDSP 算法作为其中最重要的组成部分，也还有很大空间。未来借助更先进的芯片制造工艺，并持续优化 CMS 算法，我们还可以进一步提升现实网络的传输能力，降低传输功耗。此外，还有很多基于 oDSP 算法的先进技术尚未被完全开发，比如无损速率调整、动态带宽设置、芯片级 AI 功能等等，未来 oDSP 将成为意图驱动网络或者智能化光网络的重要组成部分。我们相信未来 oDSP 将在光网络系统中发挥越来越重要的作用，并且成为光网络厂商最为关键的核心能力之一。