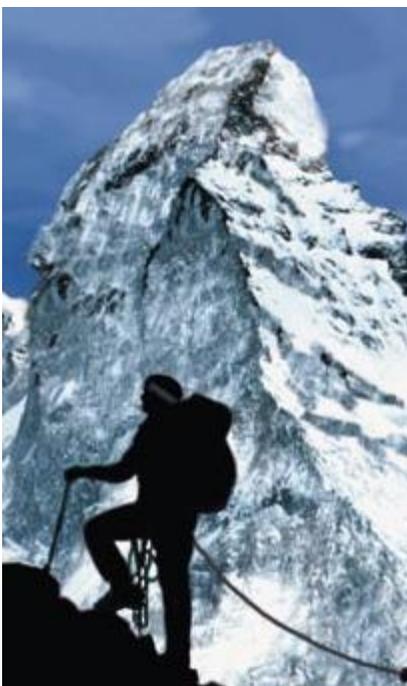


波分复用技术及设计案例

2007年9月



• 波分复用技术概述

• 波分系统的组成及原理

• 波分系统的传输媒质

• 波分系统的关键技术

• 波分系统的网络设计原则

• 波分系统的发展方向

波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*

第一部分 波分复用技术概述

介绍什么是波分复用技术，WDM如何发展而来，与其他复用系统的区别；

第二部分 波分系统组成及原理

介绍WDM的工作方式和组成形式以及WDM的特点；

第三部分 WDM传输媒质

介绍G. 652、G. 653、G. 654、G. 655光纤的基本知识，同时对于色散等概念有一个基本的了解；

第四部分 波分的关键技术

介绍WDM的关键技术以及实现方法，包括光源、光放大和波分复用器件等内容；

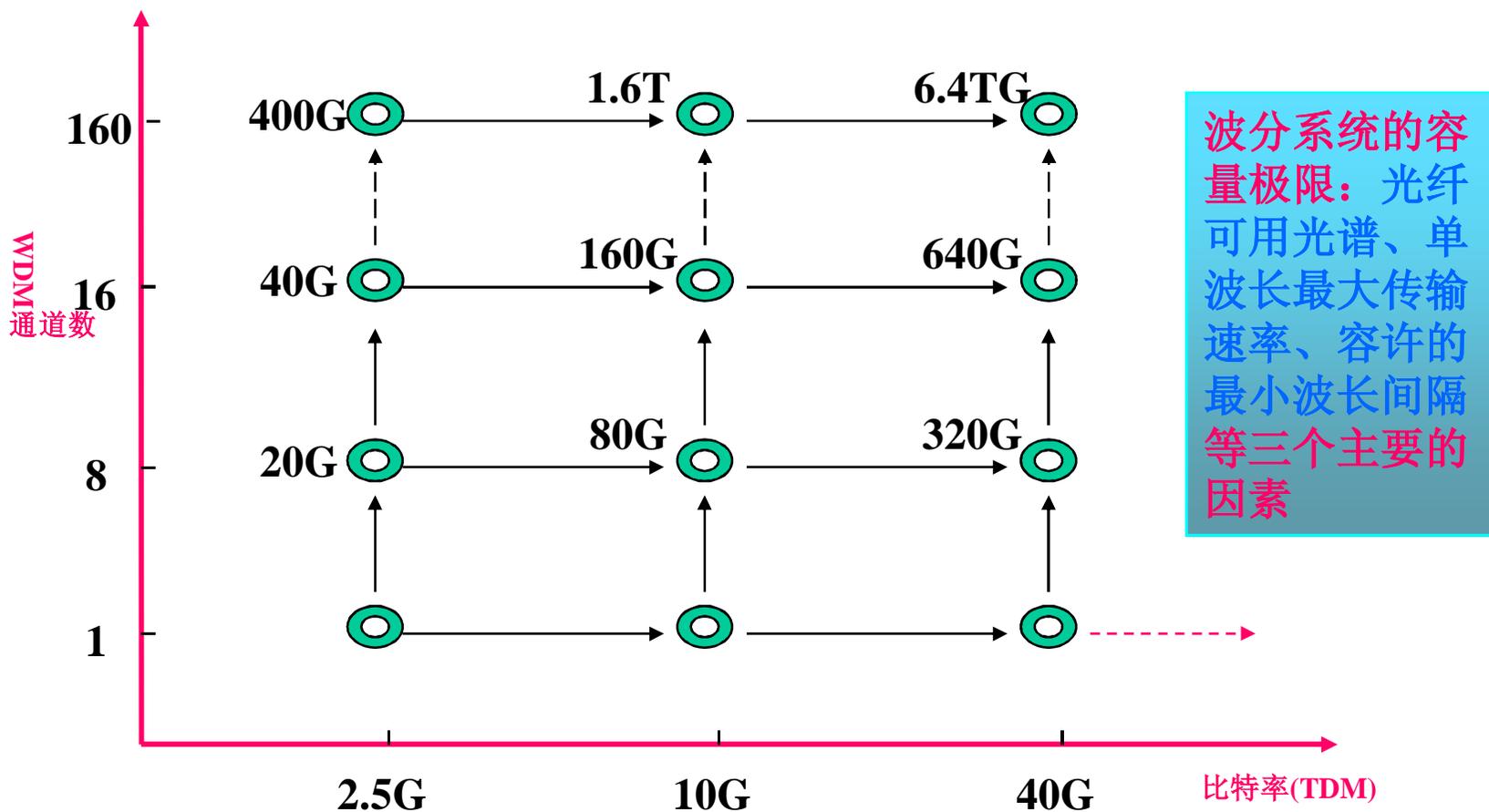
第五部分 波分系统的网络设计原则

介绍影响波分系统性能的因素、解决方法及通用的三种设计方法

第六部分 波分系统的发展方向

从现有波分系统存在的问题及目前技术发展情况，描述波分后期发展的方向。

光系统容量的演进



从1980年的45M到目前10G，速率在20年内增加200倍；40G系统商用指日可待，但采用电的时分复用来提高速率的做法不仅接近硅和镓砷技术的极限，更重要的是光路上的色散和非线性限制，同时须考虑系统的性价比

u 光通信系统可以按照不同的方式进行分类

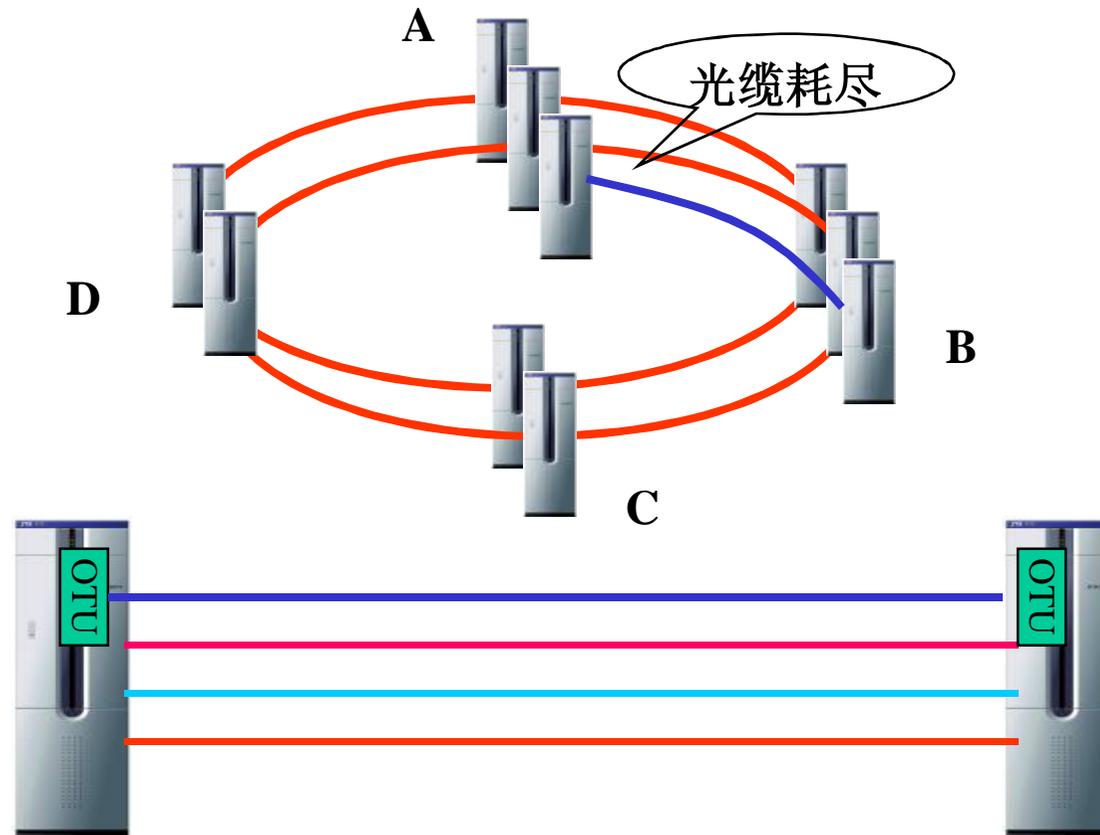
如果按照信号的复用方式来进行分类，可分为**频分复用系统**（FDM-Frequency Division Multiplexing）、**时分复用系统**（TDM-Time Division Multiplexing）、**波分复用系统**（WDM-Wavelength Division Multiplexing）和**空分复用系统**（SDM-Space Division Multiplexing）。所谓频分、时分、波分和空分复用，是指按频率、时间、波长和空间来进行分割的光通信系统。应当说，频率和波长是紧密相关的，频分也即波分，但在光通信系统中，由于波分复用系统分离波长是采用光学分光元件，它不同于一般电通信中采用的滤波器，所以仍将两者分成两个不同的系统。

u 空分复用SDM (Space Division Multiplexer)

空分复用是靠增加光纤数量的方式线性增加传输的容量，传输设备也线性增加。

在光缆制造技术已经非常成熟的今天，几十芯的带状光缆已经比较普遍，而且先进的光纤接续技术也使光缆施工变得简单，但光纤数量的增加无疑仍然给施工以及将来线路的维护带来了诸多不便，并且对于已有的光缆线路，如果没有足够的光纤数量，通过重新敷设光缆来扩容，工程费用将会成倍增长。而且，这种方式并没有充分利用光纤的传输带宽，造成光纤带宽资源的浪费。作为通信网络的建设，不可能总是采用敷设新光纤的方式来扩容，事实上，在工程之初也很难预测日益增长的业务需要和规划应该敷设的光纤数。因此，空分复用的扩容方式是十分受限。

波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*

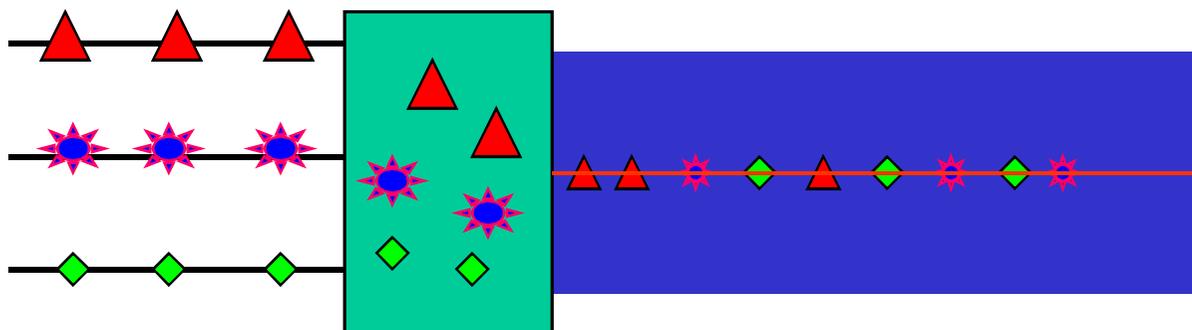


u 时分复用系统 (TDM-Time Division Multiplexing)

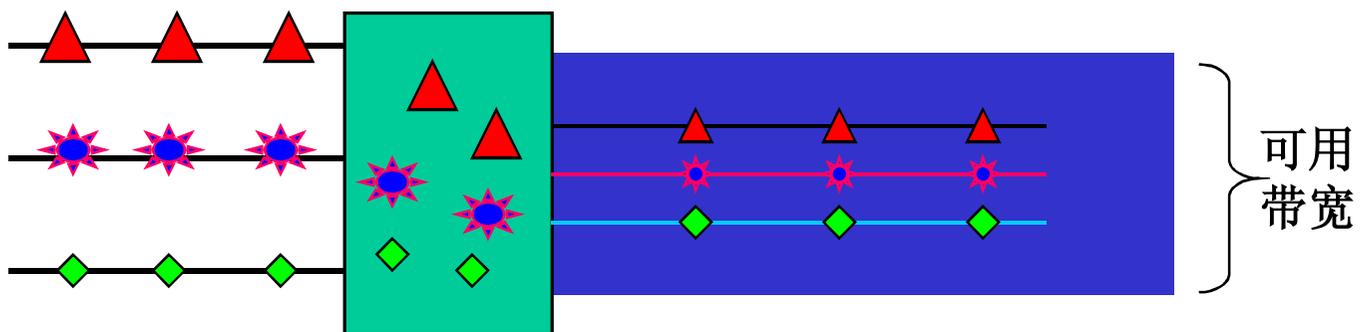
是一项比较常用的扩容方式，从传统PDH的一次群至四次群的复用，到如今SDH的STM-1、STM-4、STM-16乃至STM-64的复用。通过时分复用技术可以成倍地提高光传输信息的容量，极大地降低了每条电路在设备和线路方面投入的成本，并且采用这种复用方式可以很容易在数据流中抽取某些特定的数字信号，尤其适合在需要采取自愈环保护策略的网络中使用。

现在，时分复用技术是一种被普遍采用的扩容方式，它可以通过不断地进行系统速率升级实现扩容的目的，但当达到一定的速率等级时，目前成本还较高，并且40Gbit/s的TDM设备已经达到电子器件的速率极限，即使是10Gbit/s的速率，在不同类型光纤中的非线性效应也会对传输产生各种限制。

WDM与TDM的区别



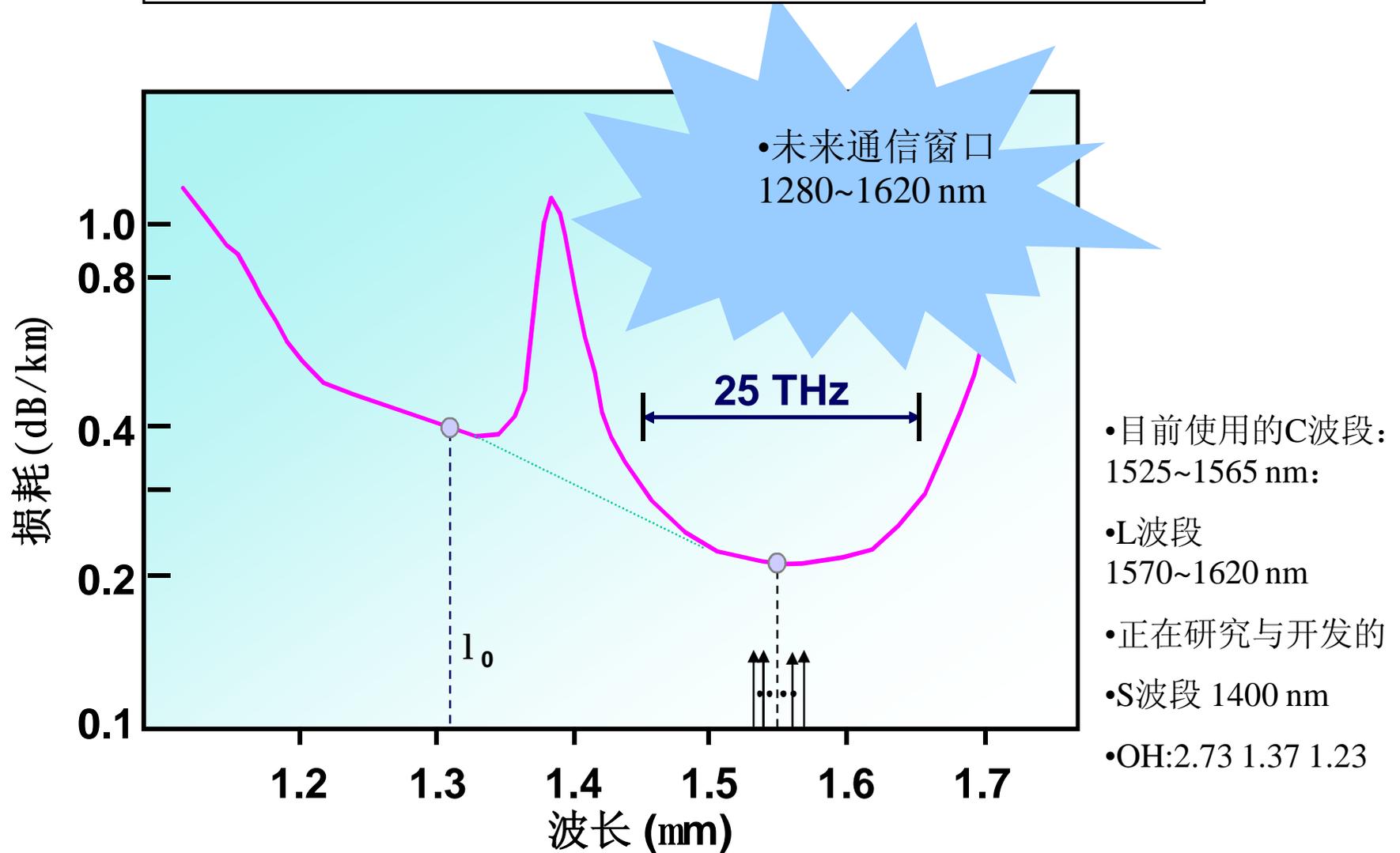
TDM示意图



WDM示意图

波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*

光纤损耗图谱



u 传统的传输网络扩容方法局限性

不管是采用空分复用还是时分复用的扩容方式，基本的传输网络均采用传统的PDH或SDH技术，即采用单一波长的光信号传输，这种传输方式是对光纤容量的一种极大浪费，因为光纤的带宽相对于目前我们利用的单波长信道来讲几乎是无限的。我们一方面在为网络的拥挤不堪而忧心忡忡，另一方面却让大量的网络资源白白浪费。

u TDM和WDM技术合用

利用TDM和WDM两种技术的优点进行网络扩容是应用的方向。可以根据不同的光纤类型选择TDM的最高传输速率，在这个基础上再根据传输容量的大小选择WDM复用的光信道数，在可能情况下使用最多的光载波。毫无疑问，多信道永远比单信道的传输容量大，更经济。

波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*

u 波分复用的基本概念

波分复用是光纤通信中的一种传输技术，它利用了一根光纤可以同时传输多个不同波长的光载波的特点，把光纤可能应用的波长范围划分成若干个波段，每个波段作一个独立的通道传输一种预定波长的光信号。光波分复用的实质是在光纤上进行光频分复用（OFDM），只是因为光波通常采用波长而不用频率来描述、监测与控制。随着电-光技术的向前发展，在同一光纤中波长的密度会变得很高。因而，使用术语密集波分复用（DWDM-Dense Wavelength Division Multiplexing），与此对照，还有波长密度较低的WDM系统，较低密度的就称为稀疏波分复用（CWDM-Coarse Wave Division Multiplexing）。

将一根光纤看作是一个“多车道”的公用道路，传统的TDM系统只不过利用了这条道路的一条车道，提高比特率相当于在该车道上加快行驶速度来增加单位时间内的运输量。而使用DWDM技术，类似利用公用道路上尚未使用的车道，以获取光纤中未开发的巨大传输能力。

u WDM系统特点

不仅大幅度地增加了网络的容量，而且还充分利用了光纤的宽带资源，减少了网络资源的浪费。

ü 超大容量

ü 对数据“透明”

ü 系统升级时能最大限度地保护已有投资

ü 可兼容全光交换

u WDM的市场驱动力

※ 市场驱动力之一 —— 通信业务的增长

INTERNET的爆炸性发展

常规通信的革命

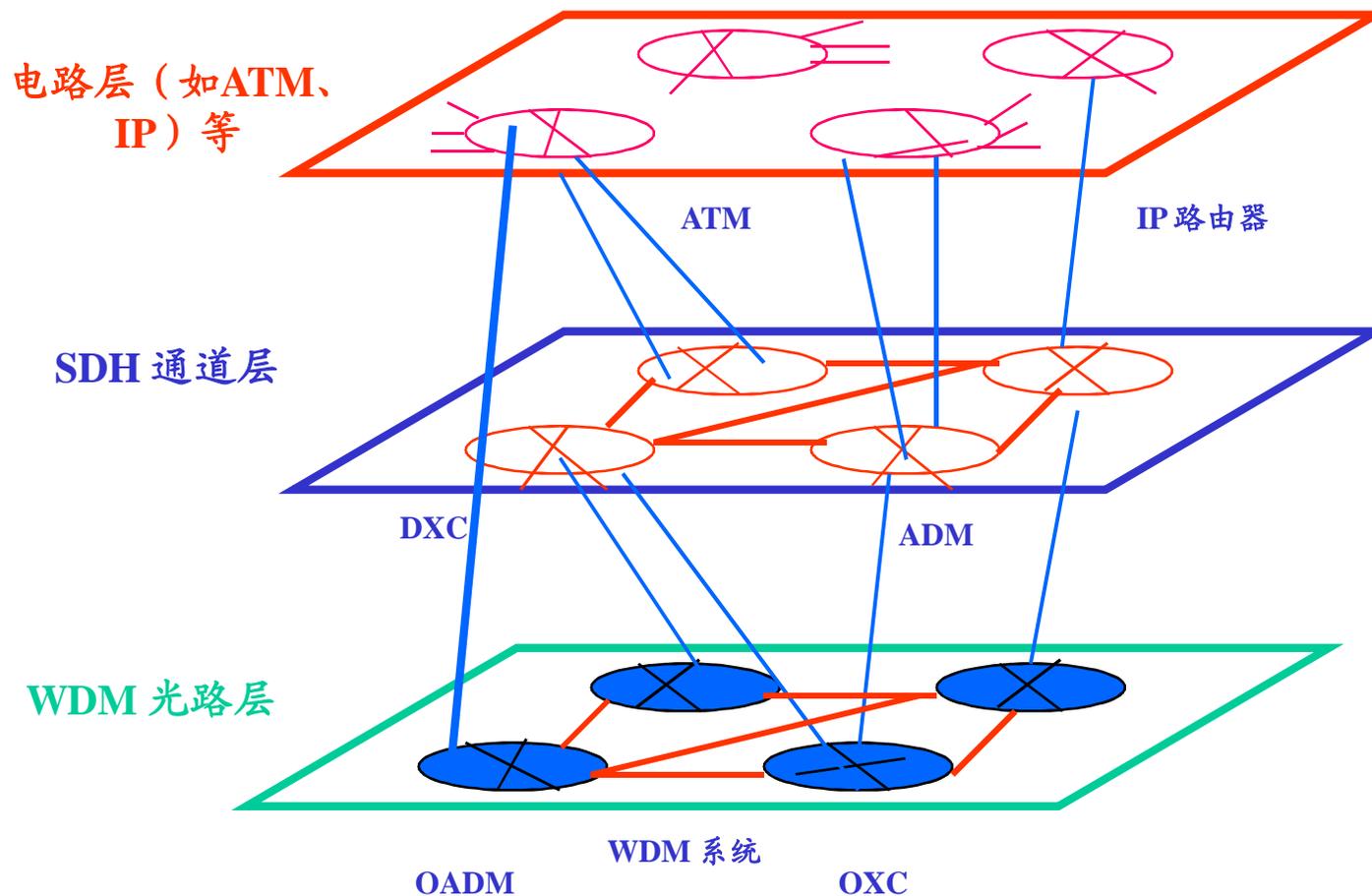
多媒体通信业务

※ 市场驱动力之二 —— 光纤耗尽 传统的SDH和TDM遇到“电子瓶颈” 已铺设的光纤基本应用

※ 市场驱动力之三 —— 器件发展 光放大技术的成熟(EDFA)

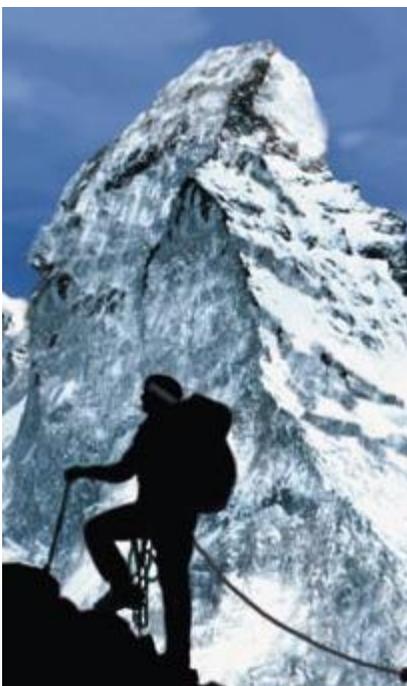


WDM系统在传送网中的位置



WDM系统发展历程

- u 第一条WDM省际干线西安-武汉工程是1997年引进的（ $8 \times 2.5 \text{Gbit/s}$ 系统，Lucent设备），1999年开始，省际干线不再引进单波长的SDH系统，全面转向承载多个SDH的开放式WDM系统。
- u 从网络拓扑上看，当前建设的WDM全是点到点的线性系统，2004年采用OADM方式上下业务。世界上大规模建设的WDM系统基本上都是这种系统，环型或其他结构的WDM网络在技术成熟后才会应用。
- u 从2004年开始使用 $80 \times 10\text{G}$ 系统。
- u 从2005年开始采用ULH技术。



• 波分复用技术概述

• 波分系统的组成及原理

• 波分系统的传输媒质

• 波分系统的关键技术

• 波分系统的网络设计原则

• 波分系统的发展方向

- 1、WDM系统的定义
- 2、WDM系统中网元组成及原理
- 3、WDM系统的网络结构

u WDM系统的定义

所谓WDM系统就是在同一根光纤上同时传输多波长光信号，基本原理是在发送端将不同波长的光信号组合起来（复用），并耦合到同一根光纤中进行传输（彩色光），在接收端又将组合波长的光信号分开（解复用），并作波长转换处理，恢复原信号后送入不同终端，因此将此项技术称为光波长分割复用，即光波分复用技术。

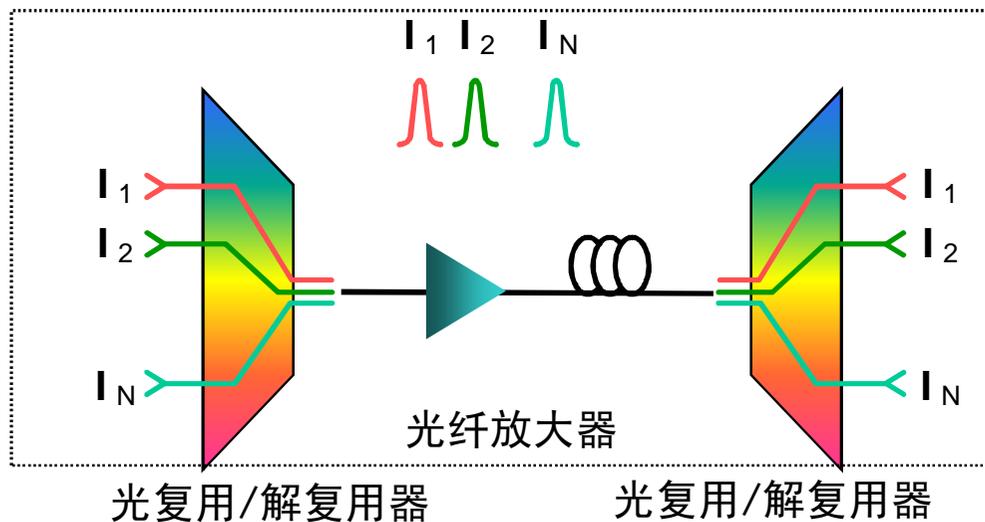
按照通道间隔的差异，WDM可以细分为：

üW—WDM（Wide—WDM，通道间隔等于或者大于25nm）

üM—WDM（Mid—WDM，通道间隔小于25nm，而大于3.2nm）

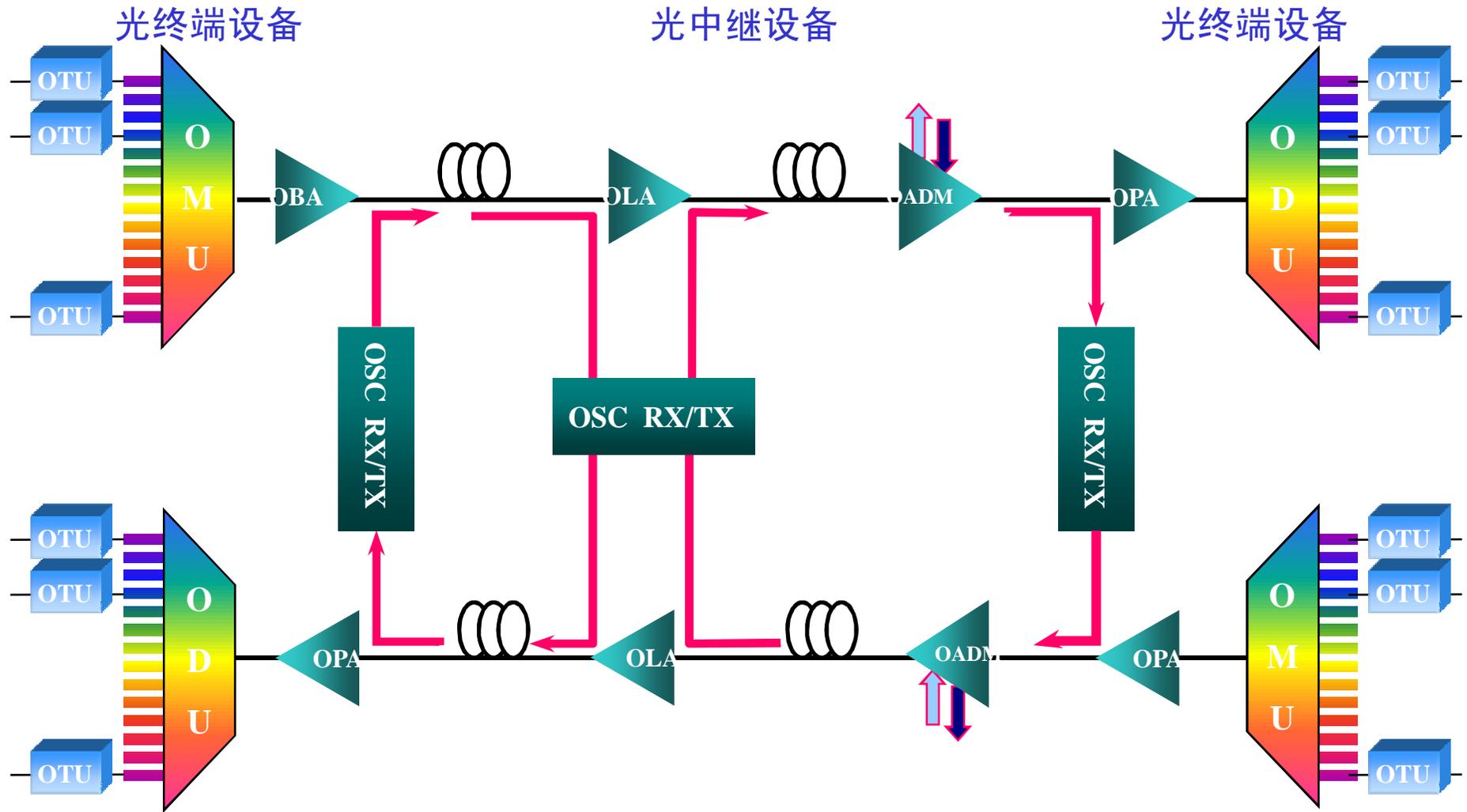
üD—WDM（Dense—WDM，通道间隔小于或者等于3.2nm）

波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*



- Ø 早期WDM系统使用1510/1310两波长系统复合到一根光纤中进行传输
- Ø DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)
- Ø 在1550nm窗口, 采用更多波长进行波分复用(8, 16...)

WDM系统网络结构

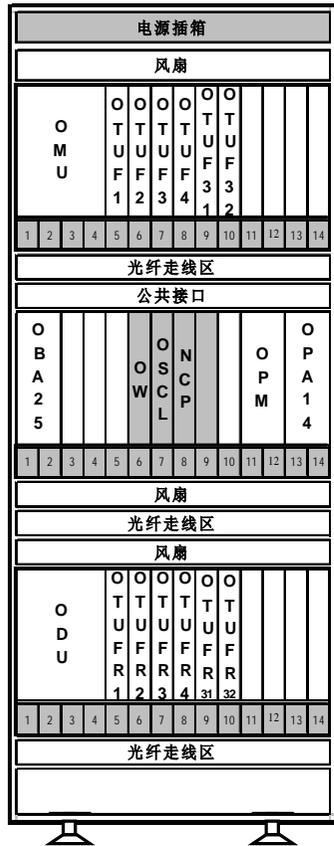


u WDM系统中网元组成及原理

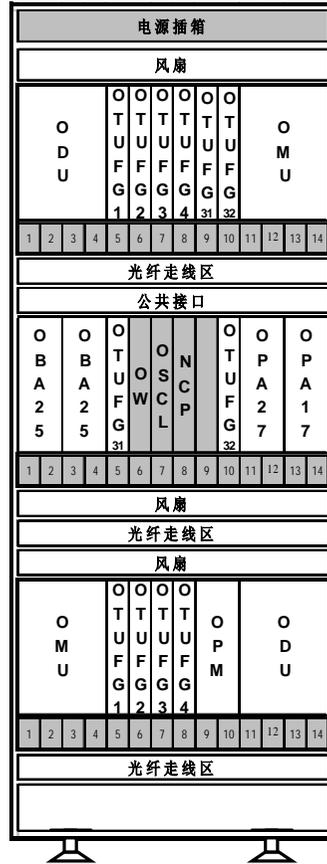
- ü 网元类型
- ü 网元组成
- ü WDM系统连接图

波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*

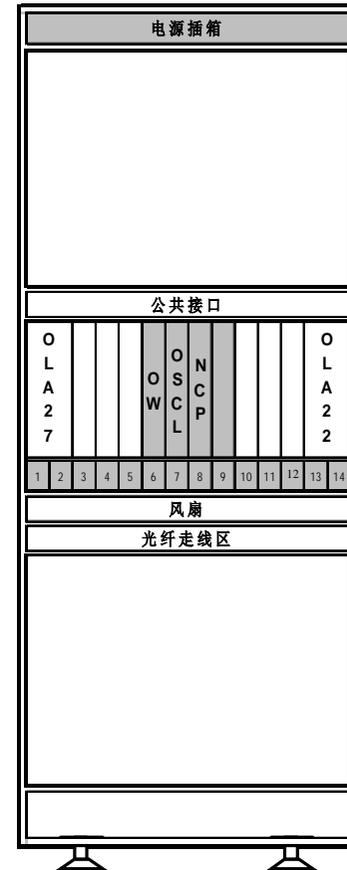
终端设备



中继设备



光放设备



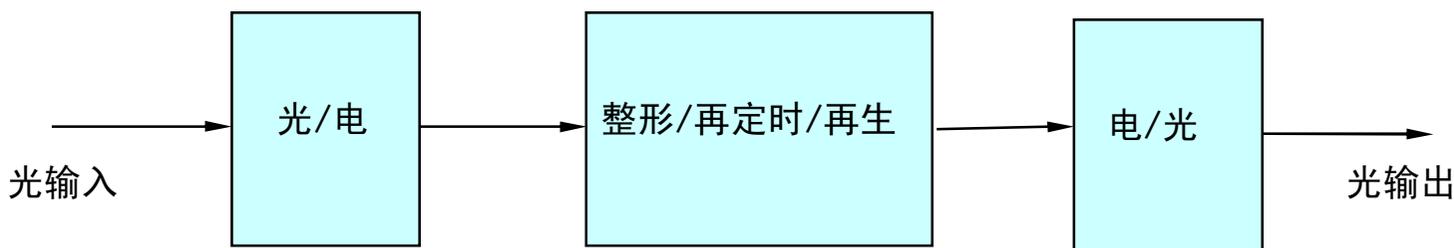
u 网元组成

- ü 波长转换器 (OTU)
- ü 合波器 (OMU)
- ü 分波器 (ODU)
- ü 光放大器 (OA)

u 波长转换器（OTU）

ü 发送端光波长转换器采用的是O/E/O的方式将1280-1565nm波长范围内符合ITU-T G. 957、G. 691建议的STM-16、STM-64光信号转换为符合ITU-T G. 692建议的标准波长的STM-16、STM-64光信号，从而可以被复用到一根光纤中；

ü 光信号经长距离传输后，会有一定的传输损伤，主要表现为波形畸变和信噪比恶化。光纤的非线性效应、各光连接器的反射、色度色散、偏振模色散、光放大器的ASE噪声等都可能引起传输损伤。接收端OTU的作用就是保证任何业务设备均能可靠地接收经过WDM系统长距离传输后的信号。



ü 根据OTU使用的位置：发送端OTU、作为电再生器的OTU和接收端的OTU；

u 合波器（OMU）

- ü 将多个波长通道复用进主信道的功能；
- ü 提供在线监测光口，可以由该光口接入光谱分析仪或波分系统的多通道处理板，在不中断业务的情况下，监测主信道的光谱；
- ü 具有输出光功率检测功能，与主控板及网管系统的通信，上报单板告警及性能事件、接收网管下发的设置命令，同时具有灯光告警显示功能；
- ü 集成光波导型和介质薄膜滤波器型

u 分波器（ODU）

- ü 完成主信道解复用成多个波长通道的功能；
- ü 提供在线监测光口，可以由该光口接入光谱分析仪或波分系统的多通道处理板，在不中断业务的情况下，监测主信道的光谱；
- ü 具有光功率检测功能，通过总线与主控板及网管系统的通信，上报单板告警及性能事件、接收网管下发的设置命令，同时具有灯光告警显示功能；
- ü 光纤布喇格光栅型、介质薄膜滤波器型和集成光波导型。

u 光放大器 (OA)

ü BA: 用来提高发送的光功率, 补偿无源光器件的插入损耗。

WDM系统对于光功率放大器的要求是输出光功率大;

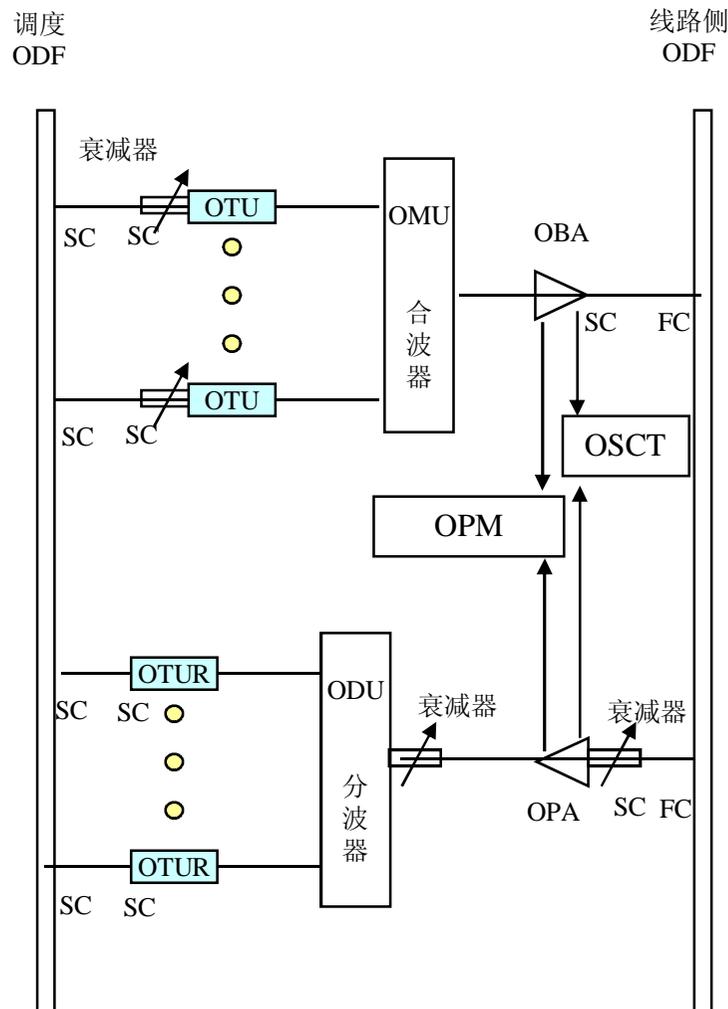
ü PA: 用来提高光接收机的接收灵敏度, 补偿无源光器件的插入损耗。WDM系统对于光前置放大器的要求主要是噪声指数低;

ü LA: 用来补偿线路光缆造成的光信号功率衰减, 延长传输距离。

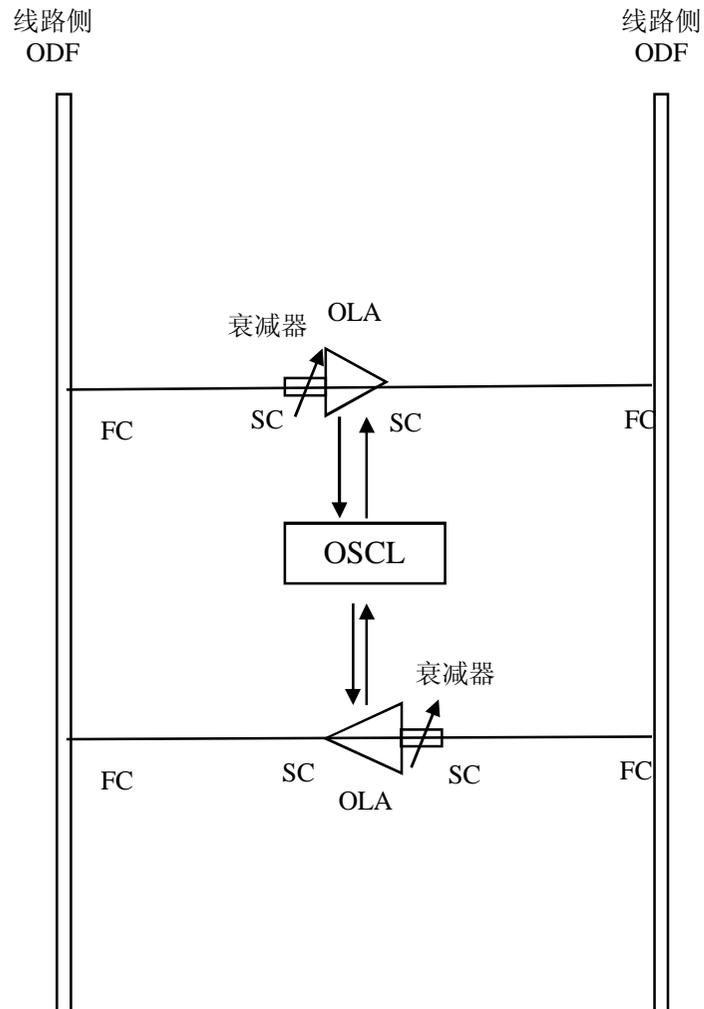
WDM系统对于光线路放大器的要求主要是增益高。

波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*

终端设备连接图

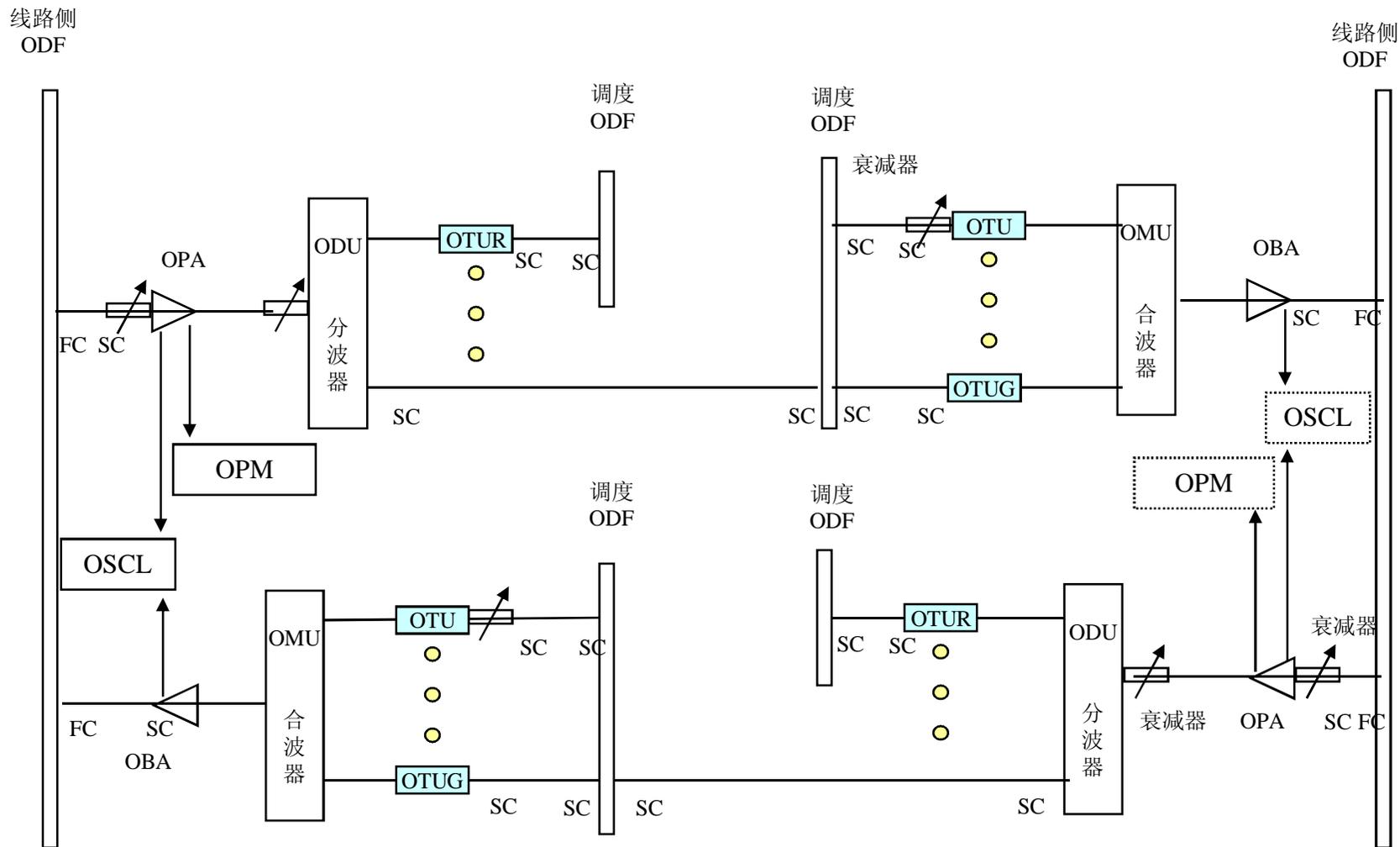


光放设备连接图



波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*

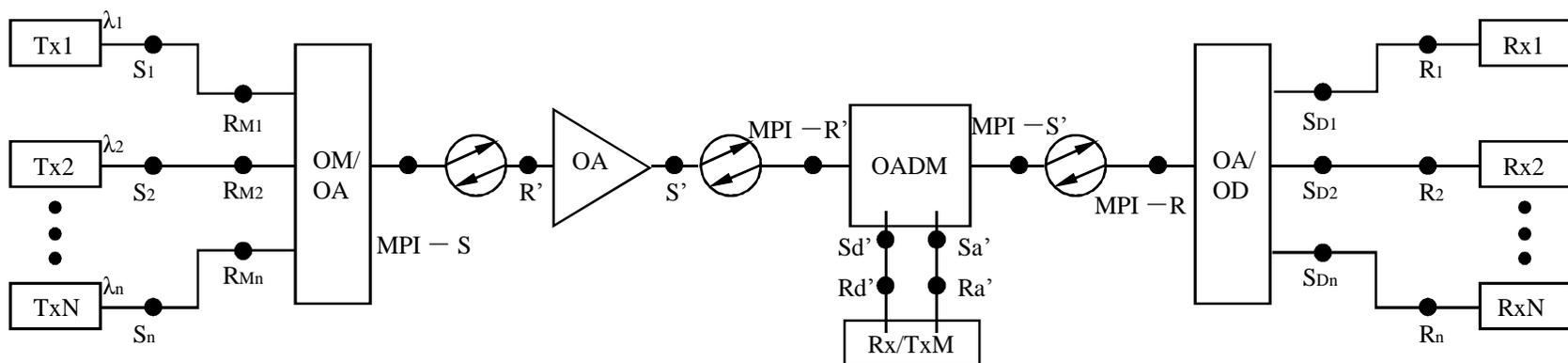
u 中继设备连接图



u WDM系统的网络结构

网络拓扑	(1) 线性; (2) 环形
系统接口	WDM系统光接口参考点
应用形式	(1) 集成式; (2) 开放式
工作方式	(1) 单纤双向; (2) 单纤单向
保护方式	(1) 1:N保护; (2) 光通道保护; (3) 光线路保护; (4) 光环网保护

WDM系统接口



图中：S1…Sn点分别为通路1…n的发送机的输出光连接器处的光纤上的参考点；

RM1…RMn点分别为通路1…n在OM/OA输入光连接器前的光纤上的参考点；

MPI-S点为OM/OA输出光连接器后的光纤上的参考点；

R'点为线路光纤放大器输入光连接器前的光纤上的参考点；

S'点为线路光纤放大器输出光连接器后的光纤上的参考点；

MPI-R'点为OADM输入光连接器前的光纤上的参考点；

MPI-S'点为OADM输出光连接器后的光纤上的参考点；

MPI-R点为OA/OD输入光连接器前的光纤上的参考点；

SD1…SDn点为OA/OD输出光连接器处的参考点；

R1…Rn点为接收器输入光连接器处的参考点；

Sd'点为OADM下通路输出光连接器处的参考点；

Rd'点为下通路接收器输入光连接器处的参考点；

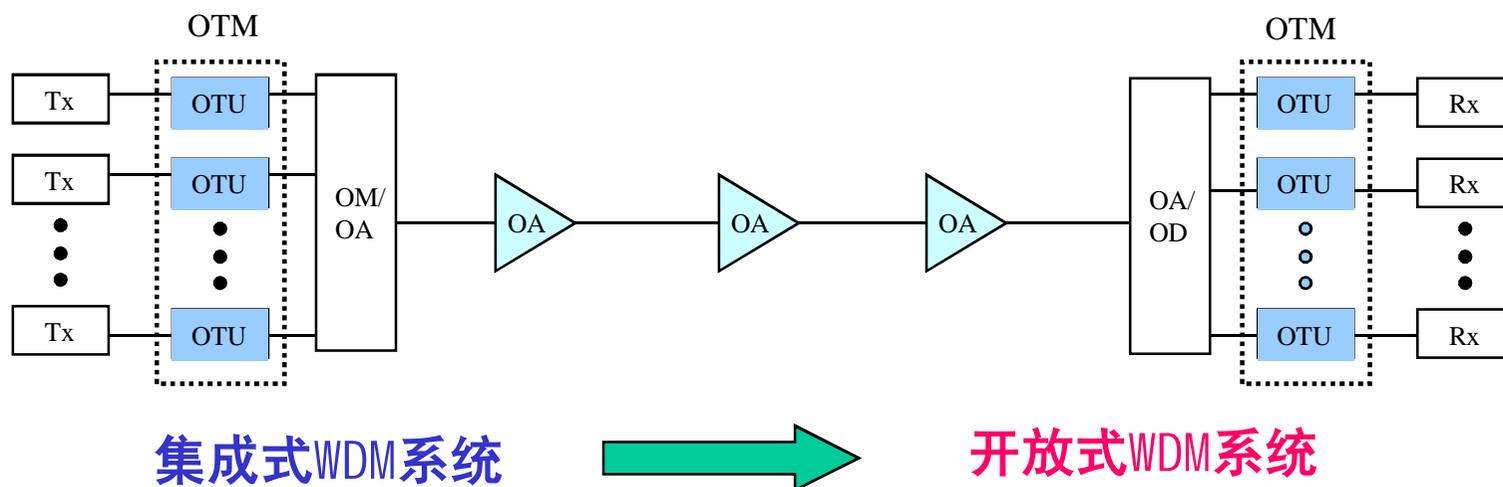
Sa'点为OADM上通路输入光连接器处的参考点；

Ra'点为上通路发送机的输出光连接器处的参考点；

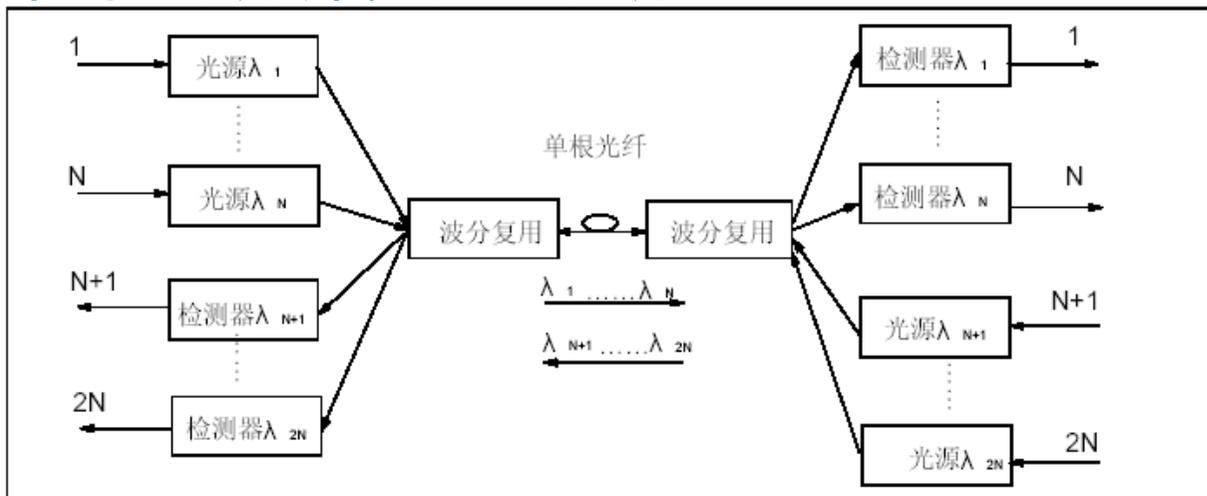
波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*

Ø **集成式WDM**系统没有采用波长转换技术，它要求复用终端的光信号的波长符合WDM系统的规范，不同的复用终端设备发送不同的符合ITU-T建议的波长，这样他们在接入合波器时就能占据不同的通道，从而完成合波。根据工程的需要可以选用不同的应用形式。在实际应用中，开放式WDM和集成式WDM可以混合使用。

Ø **开放式WDM**系统的特点是对复用终端光接口没有特别的要求，只要这些接口符合ITU-T G.957建议的光接口标准。WDM系统采用波长转换技术，将复用终端的光信号转换成指定的波长，不同终端设备的光信号转换成不同的符合ITU-T建议的波长，然后进行合波。

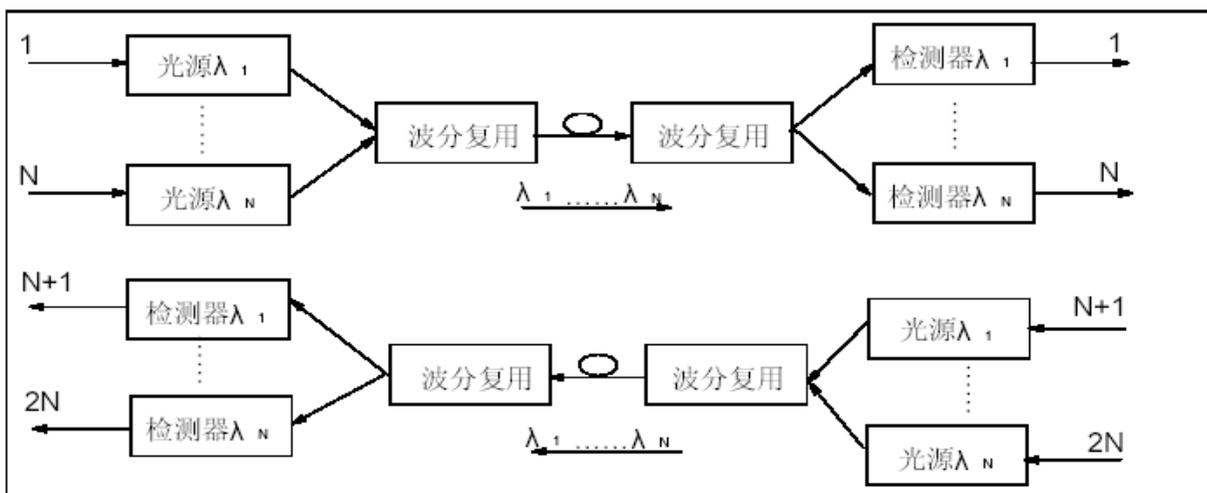


单纤双向传输的WDM系统

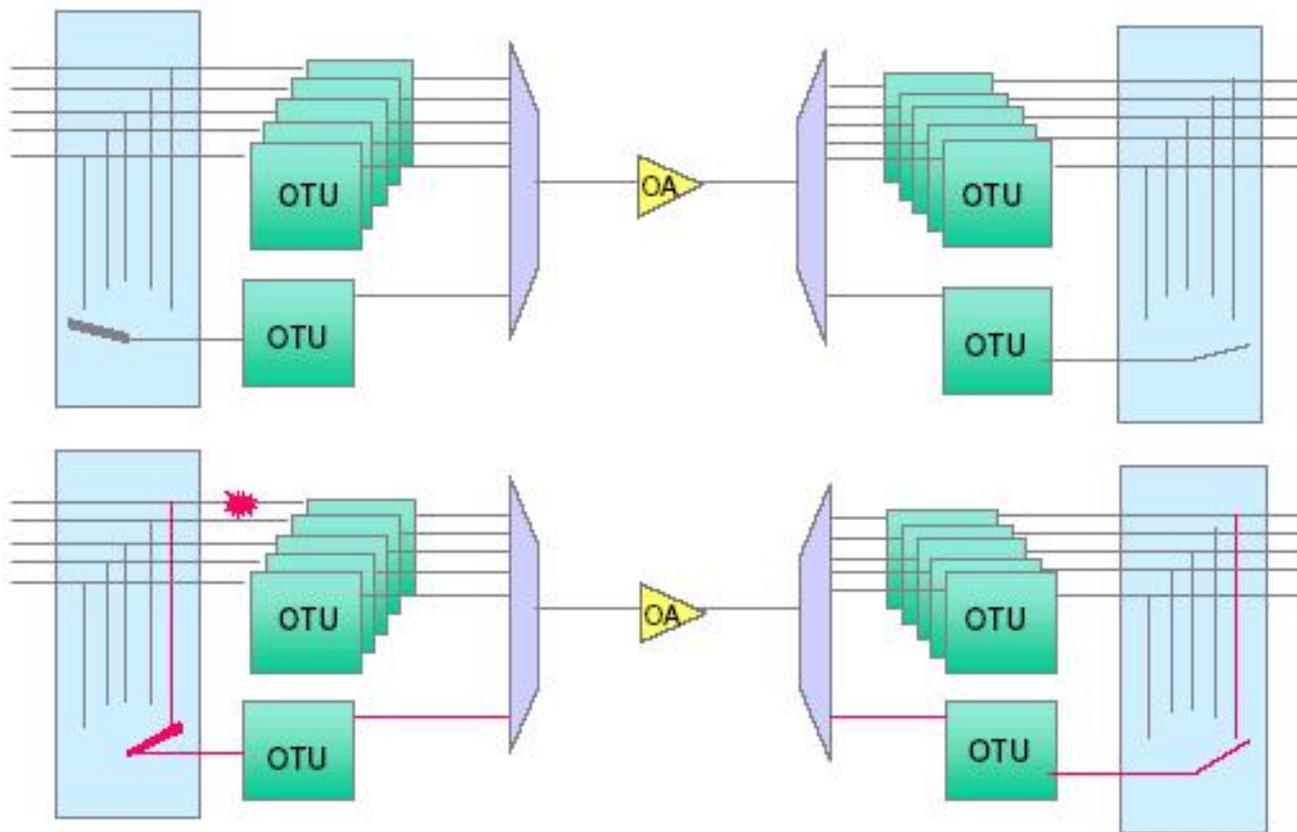


单纤双向传输允许单根光纤携带全双工通路，通常可以比单向传输节约一半的光纤器件，由于两个方向传输的信号不交互产生FWM（四波混频）产物，因此其总的FWM产物比双纤单向传输少很多，但缺点是该系统需要采用特殊的措施来对付光反射（包括由于光接头引起的离散反射和光纤本身的瑞利后向反射），以防多径干扰；当需要将光信号放大以延长传输距离时，必须采用双向光纤放大器以及光环形器等元件，其噪声系数稍差

单纤单向传输的WDM系统

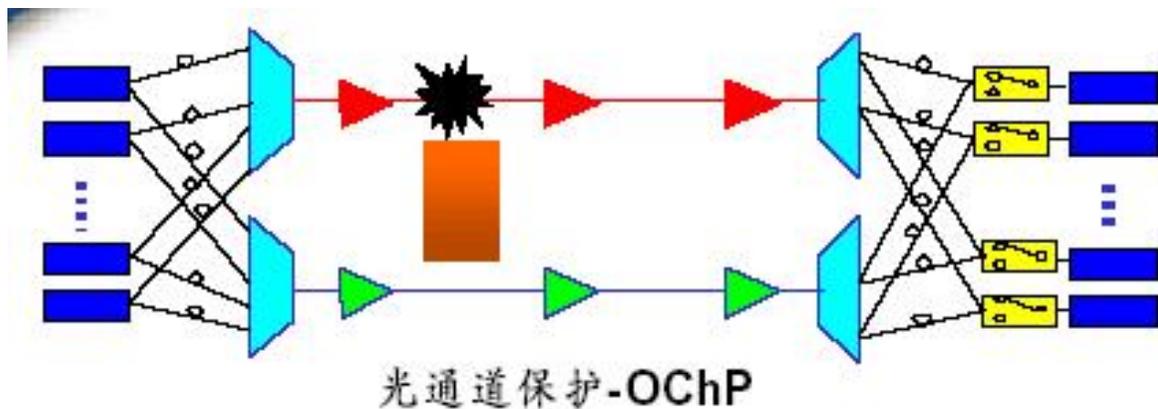


u 1:N保护

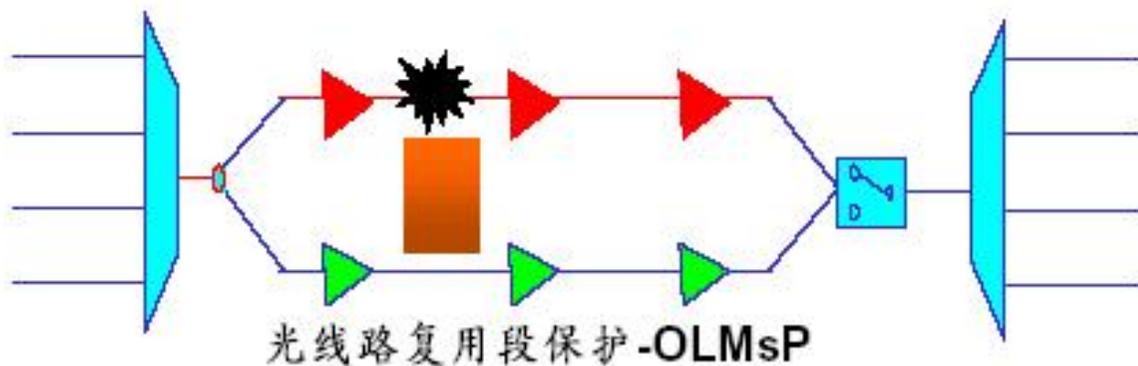


1:8端到端波长保护充分利用了备件资源，提高了系统安全性，节省了网络投资和维护成本

光通道/线路保护



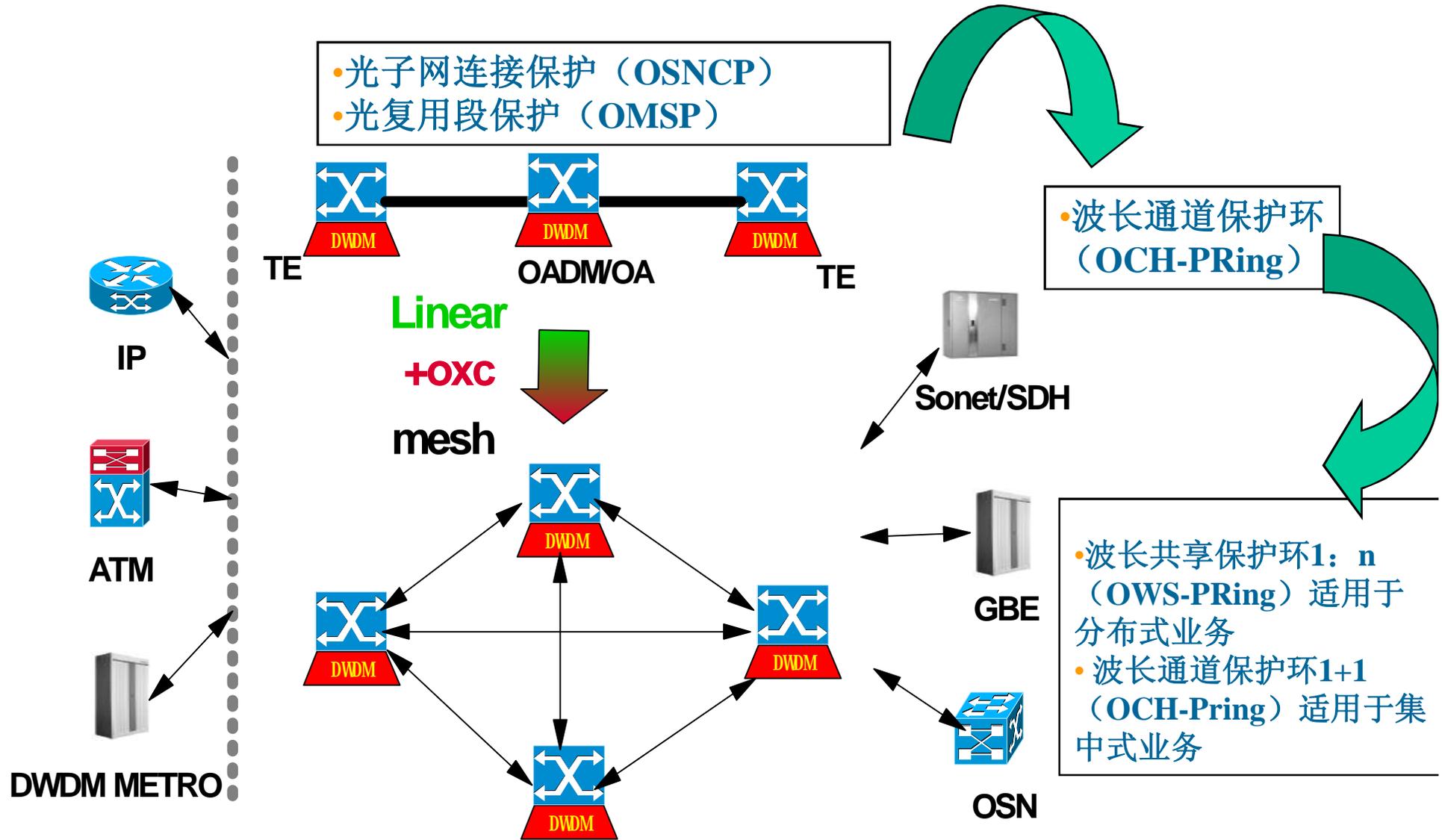
OTU的双发选收，通过LOS、B1 OVER等触发保护倒换，系统信号切换到备用光通道。（SCS）

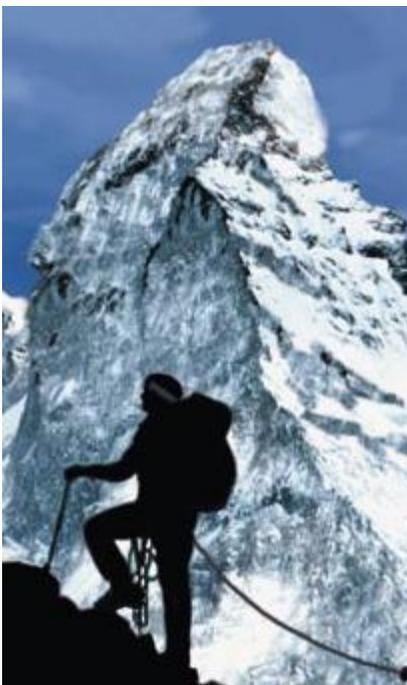


合波分波器的双发选收，通过LOS、B1 OVER等触发保护倒换，系统信号切换到备用光线路。（OLP）

• 还具备业界常规的光层保护能力，包括光通道保护、光线路复用段保护。

波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*





• 波分复用技术概述

• 波分系统的组成及原理

• 波分系统的传输媒质

• 波分系统的关键技术

• 波分系统的网络设计原则

• 波分系统的发展方向

u 光纤的种类（1）

由于单模光纤具有内部损耗低、带宽大、易于升级扩容和成本低的优点，国际上已一致认同DWDM系统将只使用单模光纤作为传输媒质。目前，ITU-T已经在G. 652、G. 653、G. 654和G. 655建议中分别定义了4种不同设计的单模光纤。

其中G. 652光纤是目前已广泛使用的单模光纤，称为1310nm性能最佳的单模光纤，又称为色散未移位的光纤。按纤芯折射率剖面，又可分为匹配包层光纤和下陷包层光纤两类，两者的性能十分相近，前者制造简单，但在1550nm波长区的宏弯损耗和微弯损耗稍大；而后者连接损耗稍大。

G. 653光纤称为色散移位光纤或1550nm性能最佳光纤。这种光纤通过设计光纤折射率的剖面，使零色散点移到1550nm窗口，从而与光纤的最小衰减窗口获得匹配，使超高速超长距离光纤传输成为可能。

u 光纤的种类（2）

G. 654光纤是截止波长移位的单模光纤。这类光纤的设计重点是降低1550nm的衰减，其零色散点仍然在1310nm附近，因而1550nm的色散较高，可达18ps/(nm.km)，必须配用单纵模激光器才能消除色散的影响。G. 654光纤主要应用于需要很长再生段距离的海底光纤通信。

G. 655光纤是非零色散移位单模光纤，与G. 653光纤相近，从而使1550nm附近保持了一定的色散值，避免在DWDM传输时发生四波混频现象，适合于DWDM系统应用。

除上述所讲的四种已正式标准化的光纤外，还有一种适合于更大容量和更长传输距离的大有效面积光纤也已经问世。其零色散点在1510nm左右，但有效面积增大到72平方mm以上，因而可以更有效地克服非线性影响，最适合以10Gbit/s为基础的DWDM系统应用。

u 衰减常数

光纤的损耗主要取决于吸收损耗、散射损耗、弯曲损耗三种损耗，弯曲损耗对光纤衰减常数的影响不大；决定光纤衰减常数的损耗主要是吸收损耗和散射损耗。

吸收损耗是制造光纤的材料本身造成的，其中的过量金属杂质和氢氧根OH⁻离子对光的吸收而产生的损耗。

散射损耗通常是由于光纤材料密度的微观变化，以及所含SiO₂、GeO₂和P₂O₅等成分的浓度不均匀，使得光纤中出现一些折射率分布不均匀的局部区域，从而引起光的散射，将一部分光功率散射到光纤外部引起损耗；或者在制造光纤的过程中，在纤芯和包层交界面上出现某些缺陷、残留一些气泡和气痕等。这些结构上有缺陷的几何尺寸远大于光波，引起与波长无关的散射损耗，并且将整个光纤损耗谱曲线上移，但这种散射损耗相对前一种散射损耗而言要小得多。

综合以上几个方面的损耗，单模光纤在1310nm和1550nm波长区的衰减常数一般分别为0.3~0.4dB/km(1310nm)和0.17~0.25dB/km(1550nm)。ITU-T G.652建议规定光纤在1310nm和1550nm的衰减常数应分别小于0.5dB/km和0.4dB/km。

u 色度色散

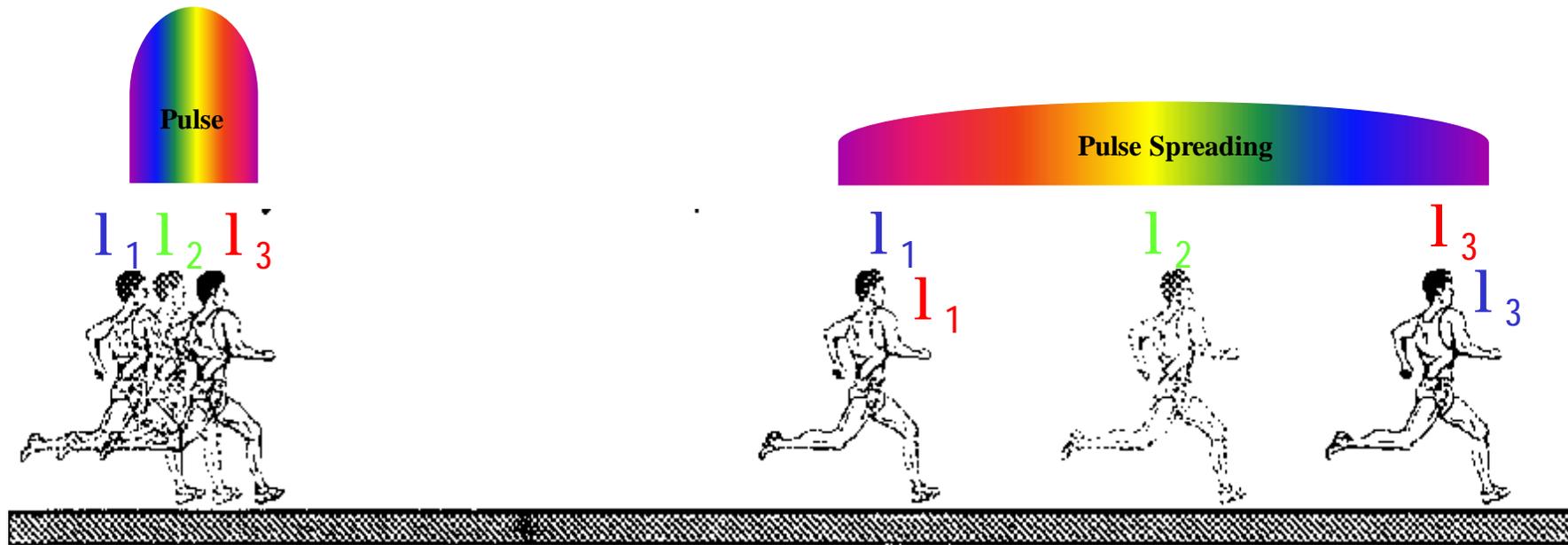
光纤的色散指光纤中携带信号能量的各种模式成分或信号自身的不同频率成分因群速度不同，在传播过程中互相散开，从而引起信号失真的物理现象。一般光纤存在三种色散：

- 1) **模式色散**：光纤中携带同一个频率信号能量的各种模式成分，在传输过程中由于不同模式的时间延迟不同而产生。
- 2) **材料色散**：由于光纤纤芯材料的折射率随频率变化，使得光纤中不同频率的信号分量具有不同的传播速度而引起的色散。
- 3) **波导色散**：光纤中具有同一个模式但携带不同频率的信号，因为不同的传播群速度而引起的色散。

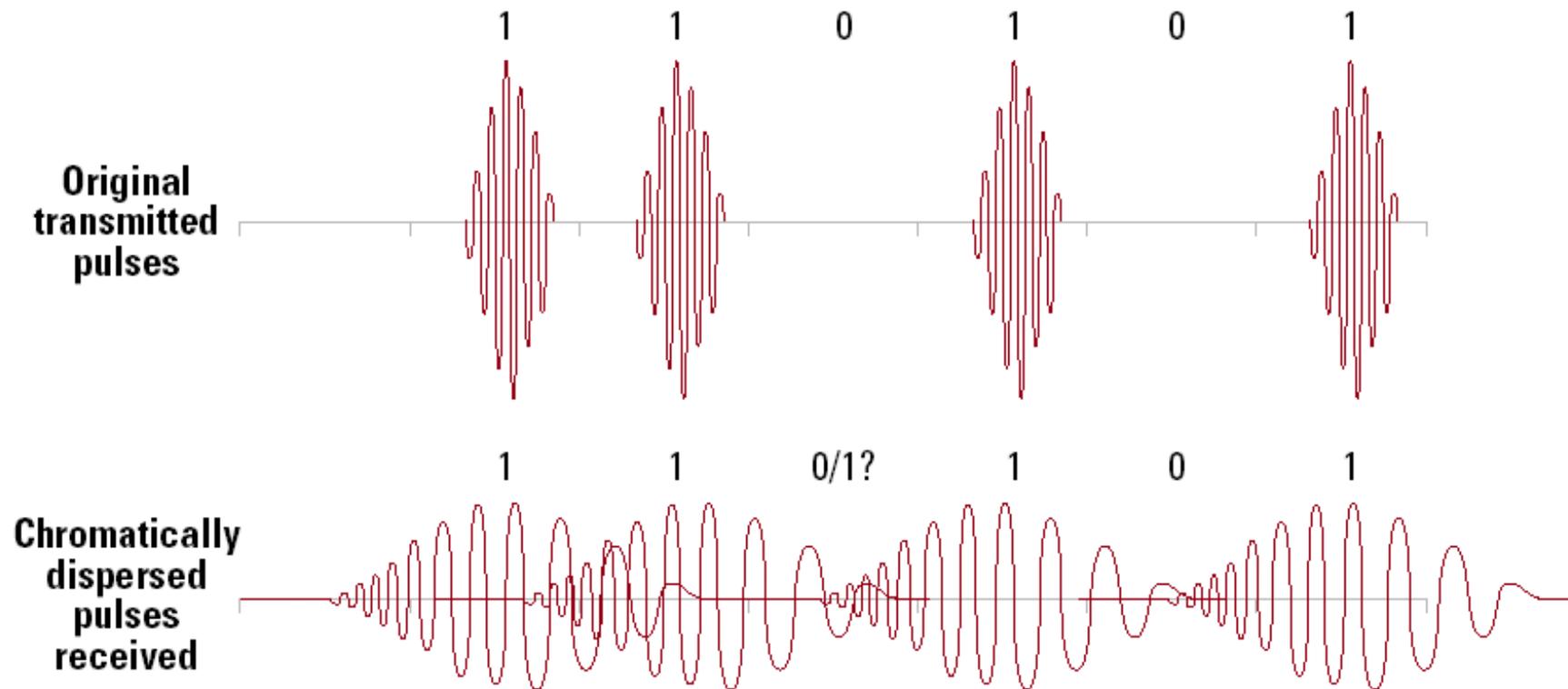
这三种色散统称为色度色散。ITU-T G. 652 建议规定零色散波长范围为：1300nm~1324nm，最大色散斜率为0.093ps/ (nm². km)，在1525~1575nm波长范围内的色散系数约为20ps/ (nm.km)。ITU-T G. 653建议规定零色散波长为：1550nm，在1525~1575nm区的色散斜率为0.085ps/ (nm.km)。在1525~1575nm波长范围内的最大色散系数为3.5ps/ (nm.km)。G. 655光纤在1530~1565nm范围内的色散系数在绝对值应处于0.1~6.0 ps/ (nm.km)。

波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*

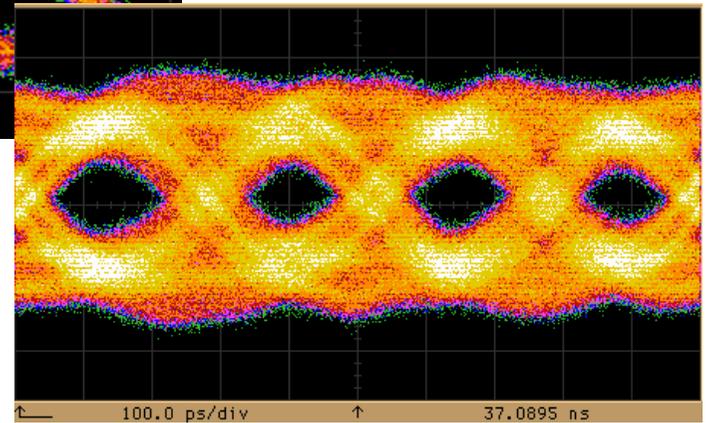
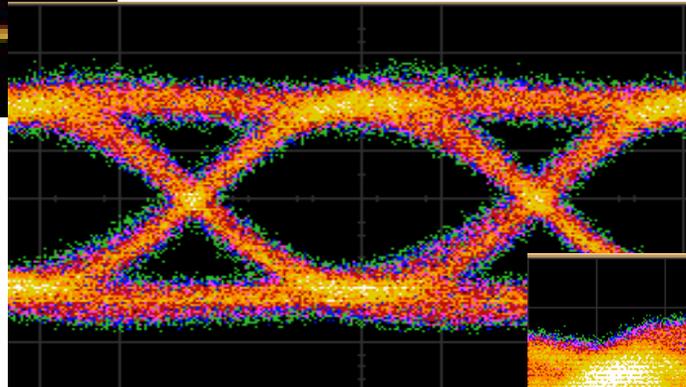
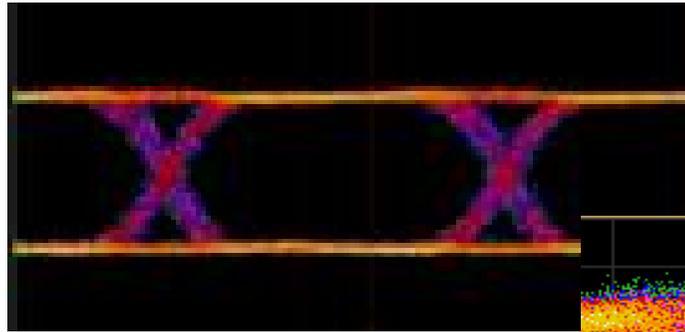
- u 不同波长的光在光纤中传输的速度不同
- u 具有不同的传输速度（群速度）
- u 脉冲展宽（色散）



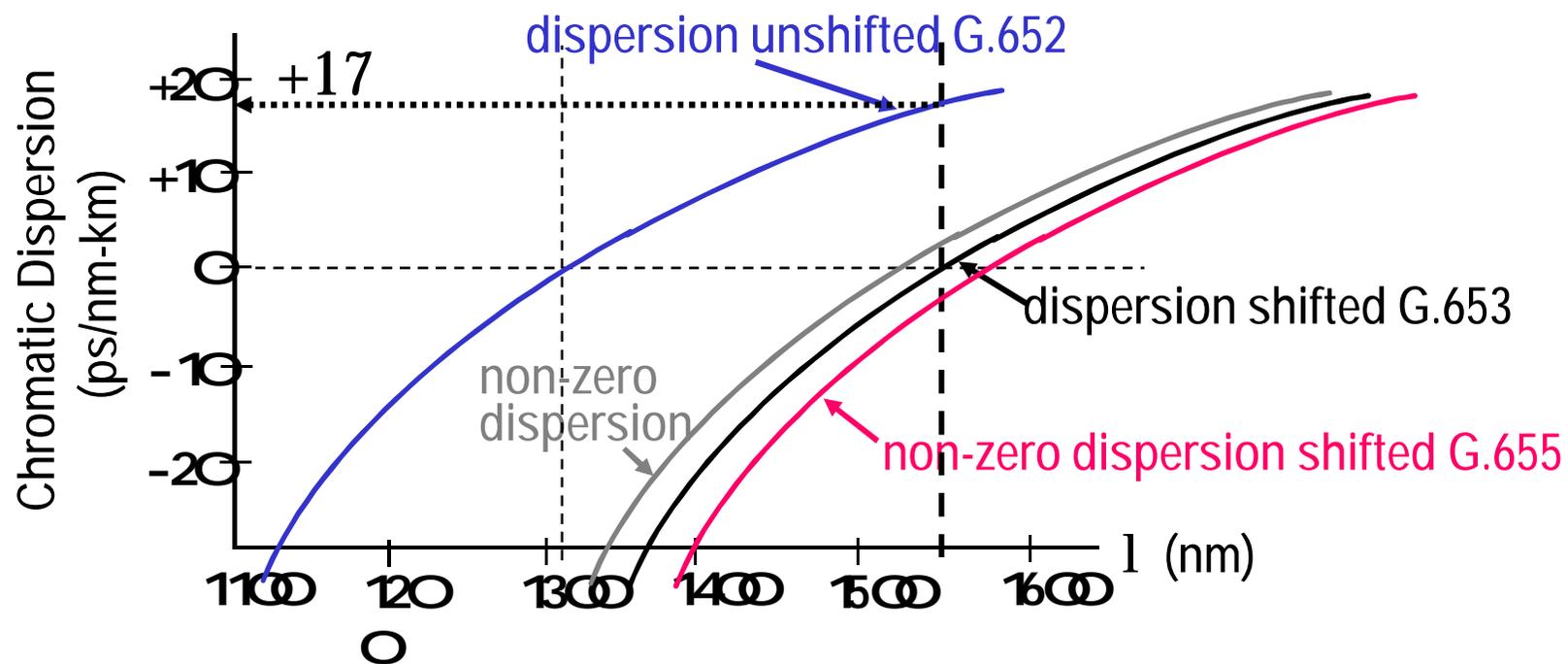
色散的影响—误码率



色散的影响—眼图



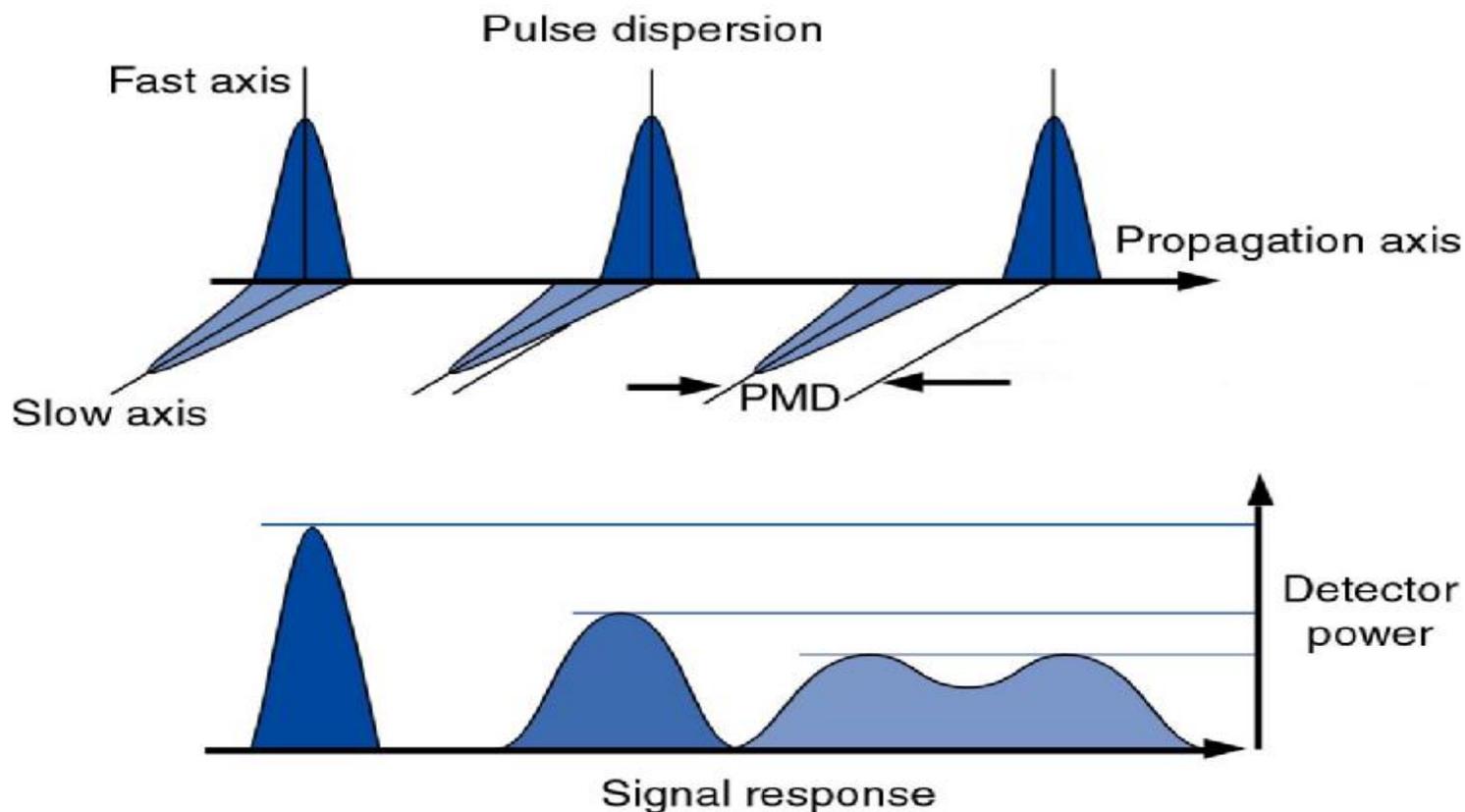
典型光纤的色散值

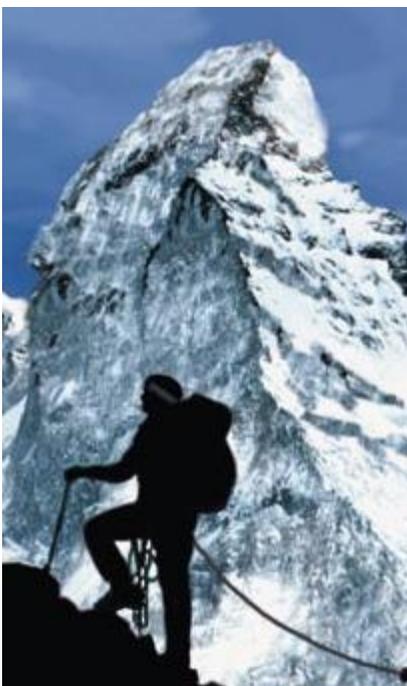


u 偏振模色散 (PMD)

ü 由于在不同的偏振模式下光传输的速度不同而造成的群时延的不同

ü 产生原因：由于光纤的双折射





• 波分复用技术概述

• 波分系统的组成及原理

• 波分系统的传输媒质

• 波分系统的关键技术

• 波分系统的网络设计原则

• 波分系统的发展方向

u 光源

ü 在WDM系统中，激光器波长的稳定是一个十分关键的问题，根据ITU-TG. 692建议的要求，中心波长的偏差不大于光信道间隔的十分之一，即当光信道间隔为0.8nm的系统，中心波长的偏差不能大于 $\pm 20\text{GHz}$ 。在WDM系统中，由于各个光通路的间隔很小（可低达0.8nm），因而对光源的波长稳定性有严格的要求，例如0.5nm的波长变化就足以使一个光通路移到另一个光通路上。在实际系统中通常必须控制在0.2nm以内，其具体要求随波长间隔而定，波长间隔越小要求越高，所以激光器需要采用严格的波长稳定技术。

ü WDM系统的无电再生中继长度从单个SDH系统传输50~60km增加到500~600km，在延长传输系统的色散受限距离的同时，为了克服光纤的非线性效应（如受激布里渊散射效应（SBS）、受激拉曼散射效应（SRS）、自相位调制效应（SPM）、交叉相位调制效应（XPM）、调制的不稳定性以及四波混频（FWM）效应等），要求WDM系统的光源要使用技术更为先进、性能更为优越的激光器。

ü 总之，WDM系统的光源的两个突出的特点：比较大的色散容纳值及标准而稳定的波长。

ü 广泛使用的光纤通信系统均为强度调制——直接检波系统，对光源进行强度调制的方法有两类，即直接调制和**间接调制**。

u 基本概念

绝对频率参考

193.1THz

最小通路间隔

相邻通路间的标称频率差：均匀及非均匀

标称中心频率

光波分复用系统中每个通路对应的中心频率

光波长区分配

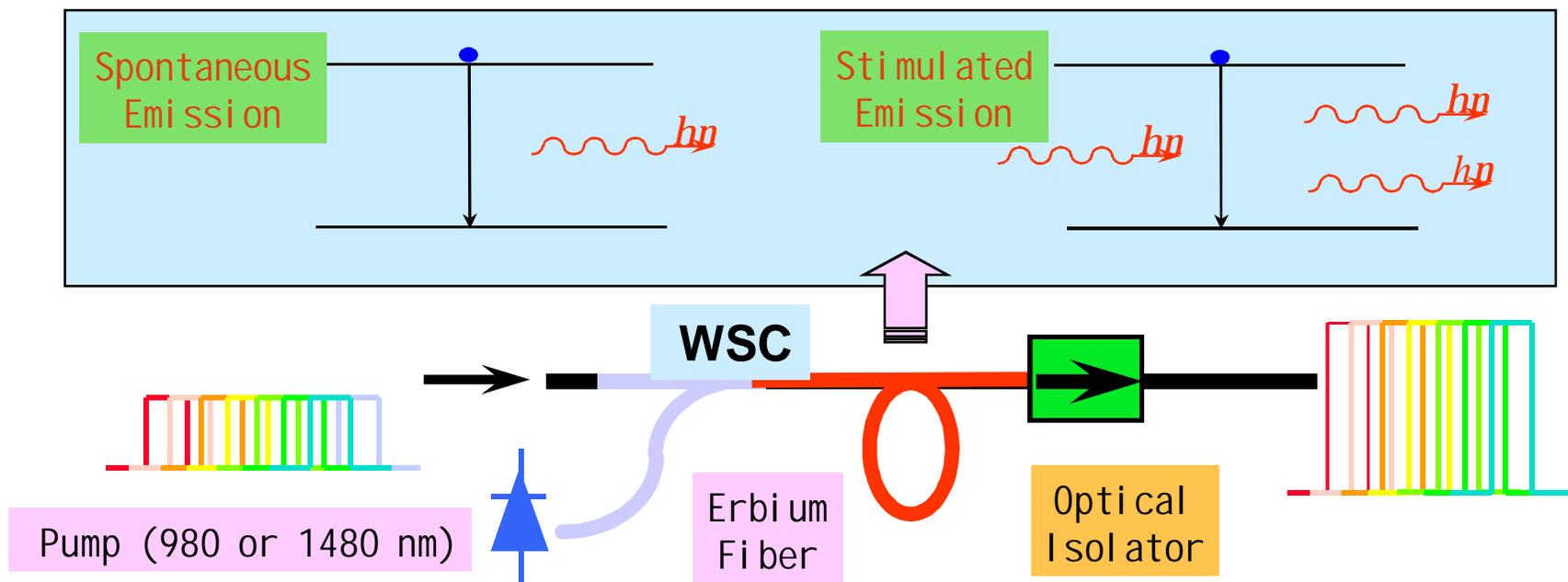
光纤有两个长波长的低损耗区，但由于常用的EDFA（C波段）工作波长范围为1525nm—1565nm,因此光波分复用的工作波长区为1525nm—1565nm

中心频率偏差

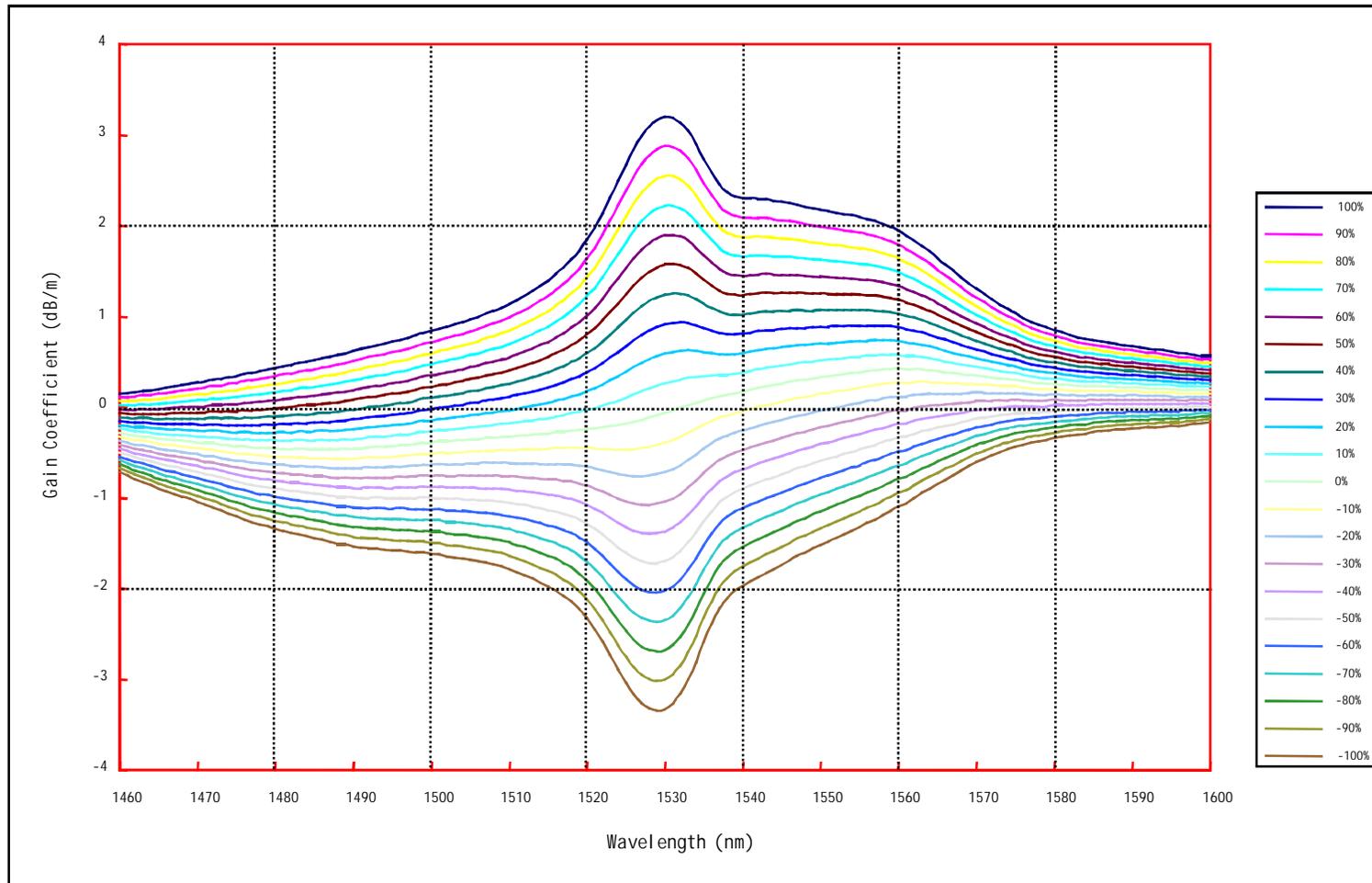
标称中心频率与实际中心频率之差

u WDM光放大技术

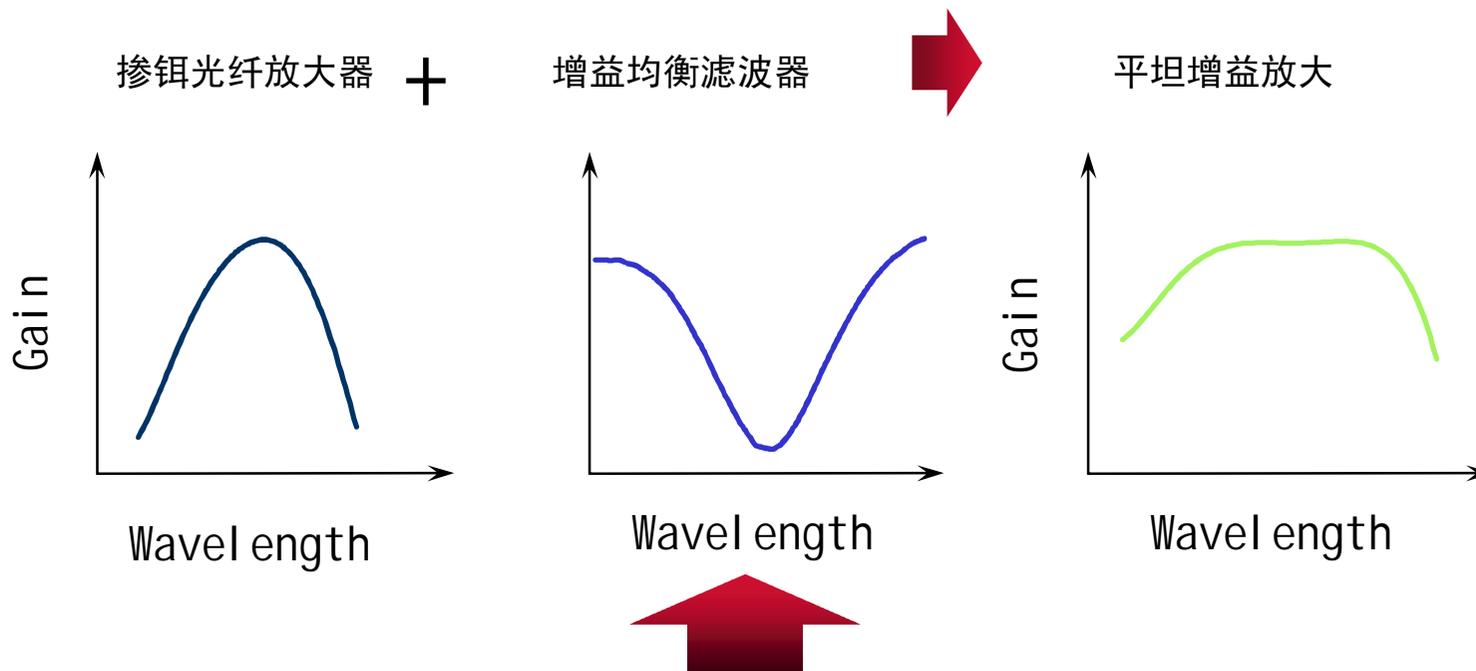
EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) 掺铒光纤放大器作为新一代光通信系统的关键部件, 具有增益高、输出功率大、工作光学带宽较宽、与偏振无关、噪声指数较低、放大特性与系统比特率和数据格式无关等优点。它是大容量WDM系统中必不可少的关键部件。



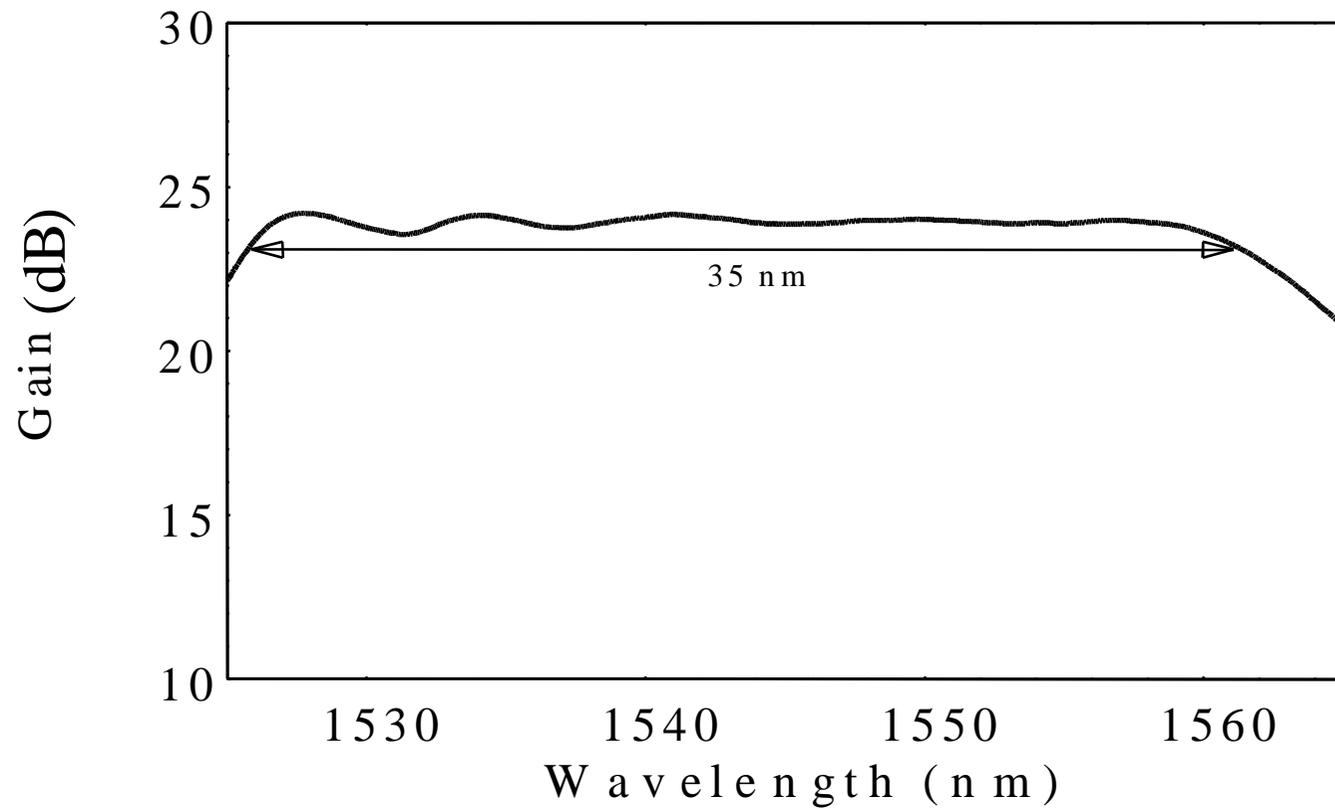
u 放大器增益谱曲线



增益均衡滤波



u 采用增益均衡滤波后的宽带放大器



u 功率放大器（BA）

置于终端复用设备或中继设备的发射光源之后，主要作用是实现助推发送功率，通过提高注入光纤的光功率（一般在10dBm以上），从而延长传输距离。此时对放大器的噪声特性要求不高，主要要求功率线性放大的特性。

u 线路放大器（LA）

置于整个中继段的中间，是将EDFA直接插入到光纤传输链路中对信号进行直接放大的应用形式。线路放大器主要应用于长距离通信，此时要求EDFA对小信号增益高，而且噪声系数小。

u 前置放大器（PA）

置于光接收设备之前，主要作用是对经线路衰减后的小信号进行放大，从而提高光接收机的接收灵敏度，此时的主要问题是噪声问题。

最主要的差别体现在输入光功率和增益：

BA：输入光功率比较高，增益比较小；

PA：输入光功率比较低，增益和BA相差不多；

LA：输入光功率和PA相差不多，只是增益比BA大。

u EDFA的局限性

非线性问题

虽然EDFA的采用提高了光功率，但是这个光功率并非越大越好。当光功率大到一定程度时，光纤将产生非线性效应（包括拉曼散射和布里渊散射），尤其是布里渊散射（SBS）受EDFA的影响更大，非线性效应会极大地限制EDFA的放大性能和长距离无中继传输的实现

光浪涌问题

采用EDFA以后，因衰减限制无中继长距离传输的问题虽然得以解决，但随着距离的增加，总色散也随之增加，原来的衰减受限系统变成了色散受限系统

色散问题

采用EDFA以后，因衰减限制无中继长距离传输的问题虽然得以解决，但随着距离的增加，总色散也随之增加，原来的衰减受限系统变成了色散受限系统

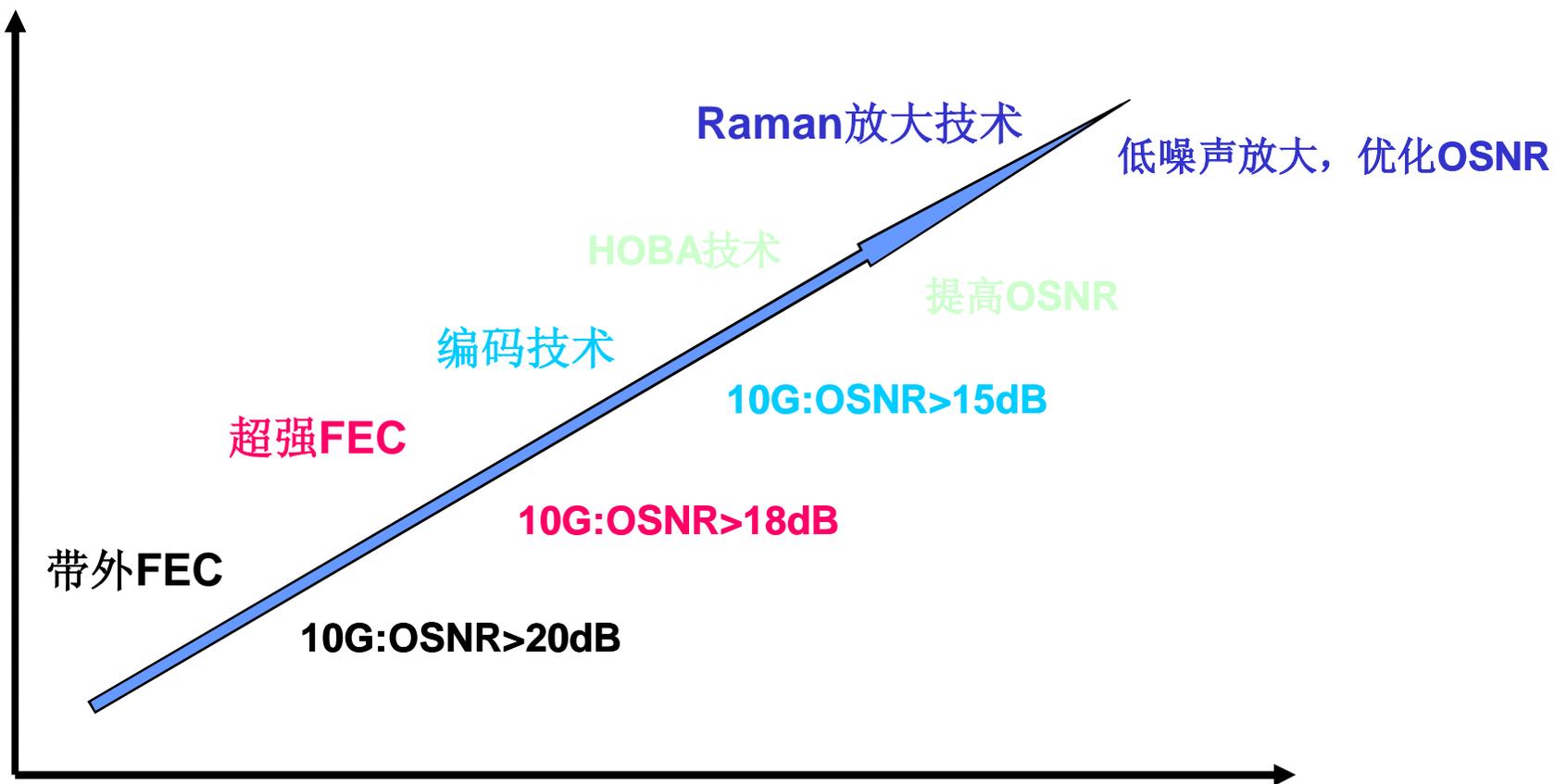
u WDM器件

ü 在WDM系统中，WDM器件分为合波器和分波器两种，合波器的主要作用是将多个信号波长合在一根光纤中传输；分波器的主要作用是将在一根光纤中传输的多个波长信号分离。WDM系统性能好坏的关键是WDM器件，其要求是复用信道数量足够、插入损耗小、串音衰耗大和通带范围宽等。从原理上讲，合波器与分波器是相同的，只需要改变输入、输出的方向。WDM系统中使用的WDM器件的性能满足ITU-T G.671及相关建议的要求；

ü WDM器件有多种制造方法，制造的器件各有特点，目前已广泛商用的；

ü WDM器件有四类：干涉滤光器型、光纤耦合器型、光栅型、列阵波导光栅。

u LH/ULH相关技术



- u 编码及调制技术
- u 光放大技术
- u FEC技术
- u 色散管理技术
- u 动态功率均衡技术
- u 增值服务技术

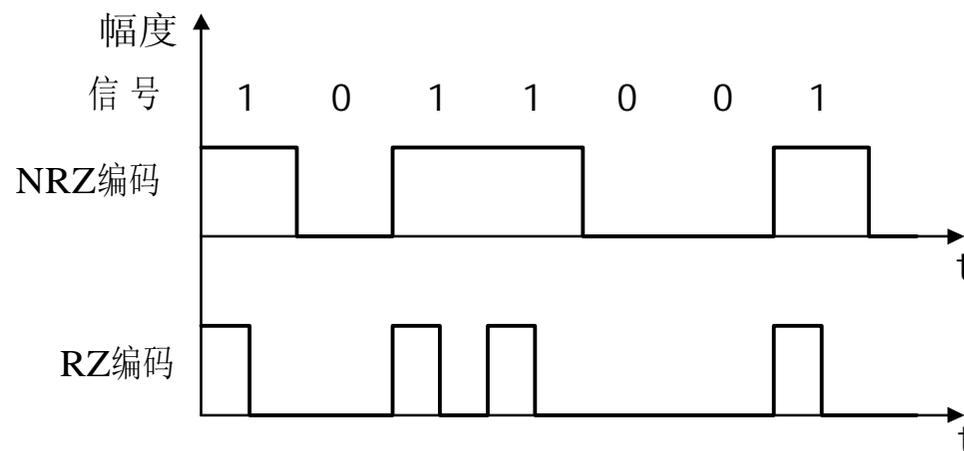
u 编码及调制技术

NRZ: Non Return-to-zero

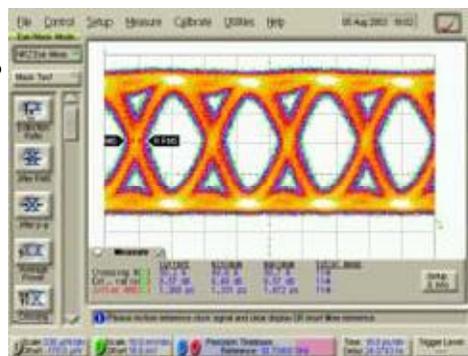
RZ: Return-to-zero

RZ码:

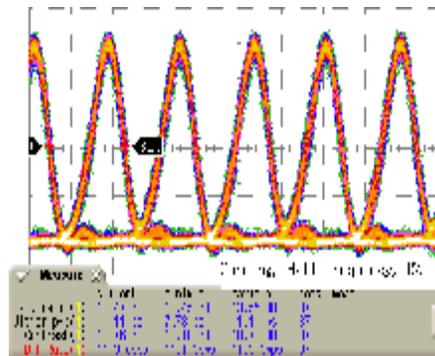
优点: 时域上RZ的占空比小, 脉冲窄,
可以容忍更大的PMD效应 ;
从频域来看, RZ的功率谱密度低
有利于抑制色散、非线性影响;
等效改善OSNR 3dB;



NRZ

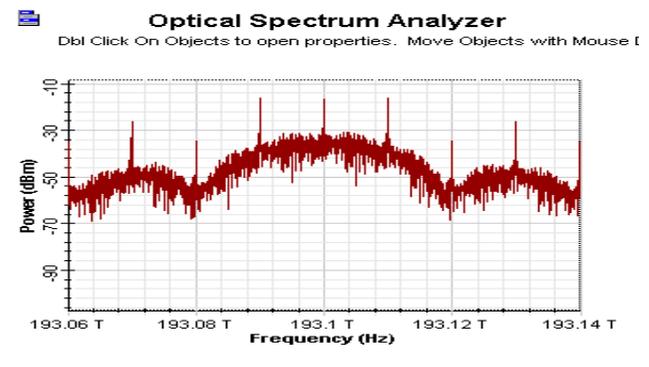
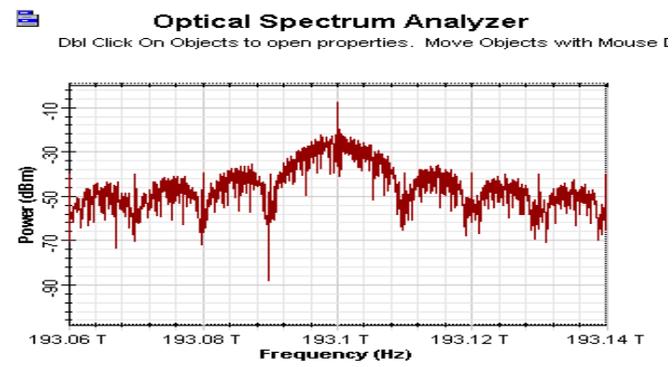
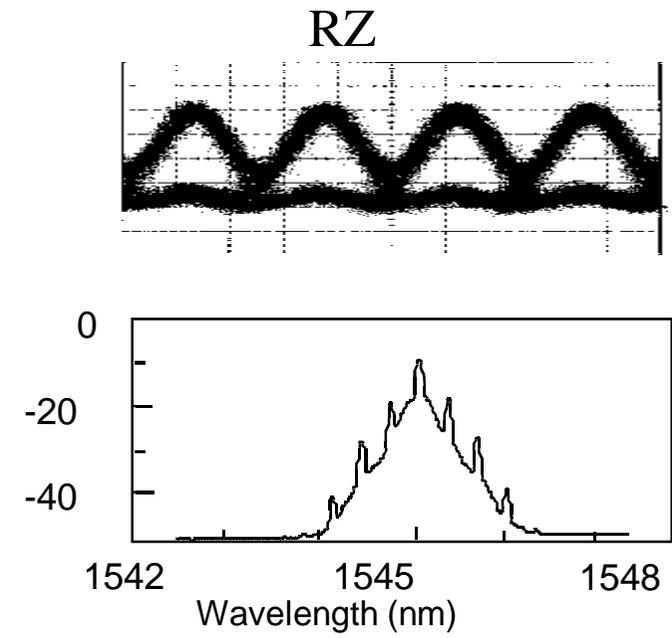
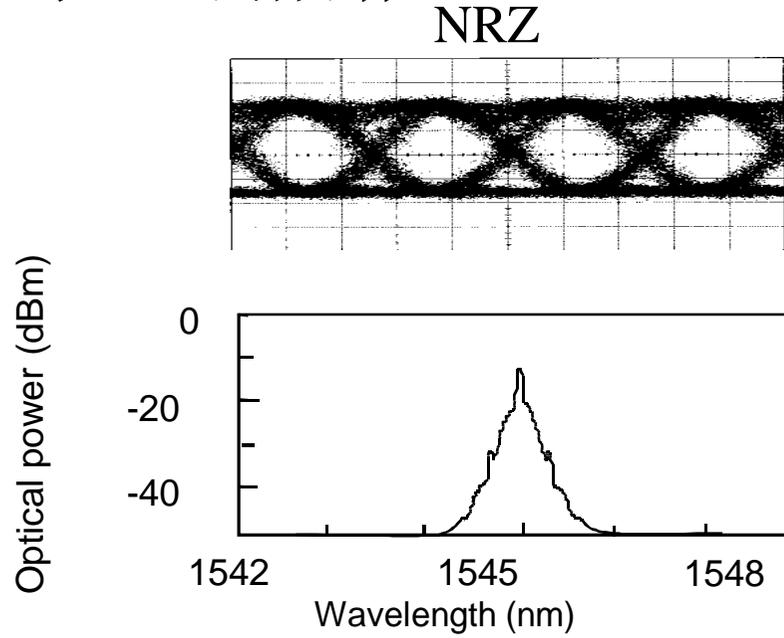


RZ

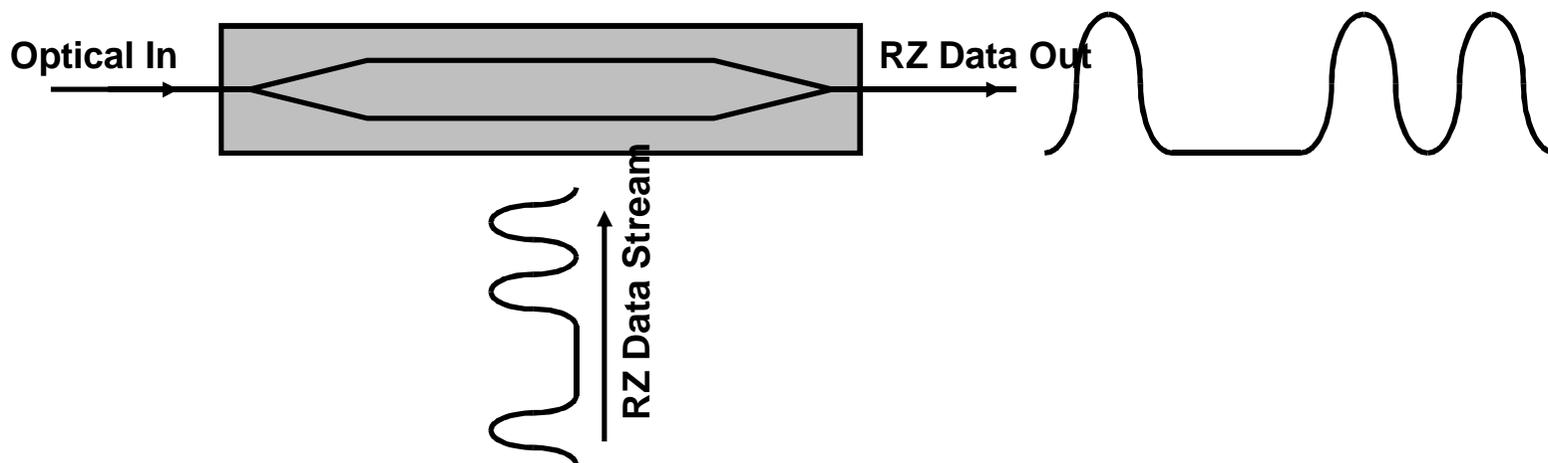


缺点: 信号光谱展宽。

RZ与NRZ的频谱

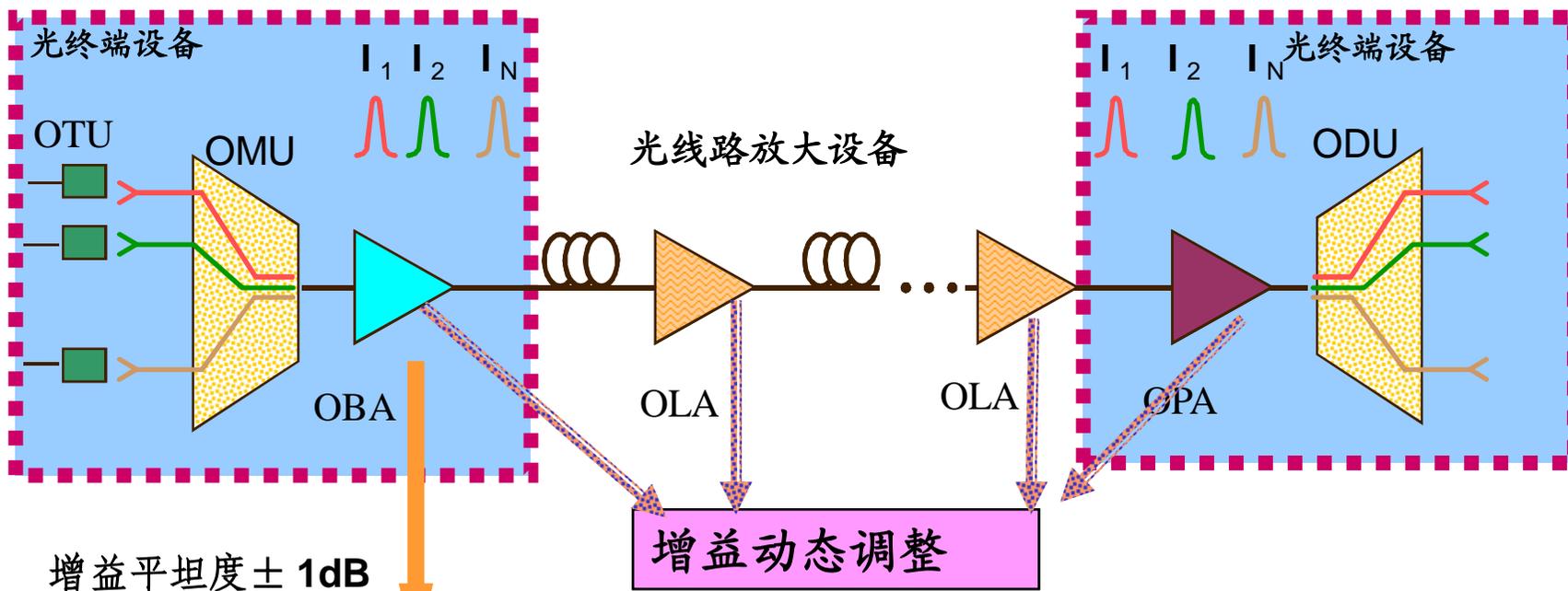


ERZ: 调制信号在电域是RZ信号。单级调制方式:

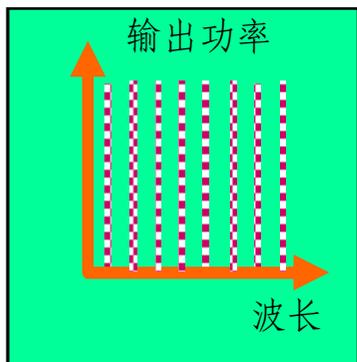


- 1、采用单级调制方式，解决了传统两级调制方式的级间定时和时延要求高的难题，集成度高；
- 2、具有很强的非线性抑制能力，相对于普通NRZ码，ERZ码具有更低的功率谱密度，可以有效降低非线性效应的干扰作用；
- 3、与CRZ技术相比，频谱宽度 $CRZ > ERZ$ ，ERZ可以支持更窄的信道间隔，可应用于通道间隔50GHz的80/160波DWDM系统；
- 4、与传统的NRZ调制相比，ERZ调制可等效降低系统信噪比要求3~5dB。

光放大技术



增益平坦度 ± 1dB

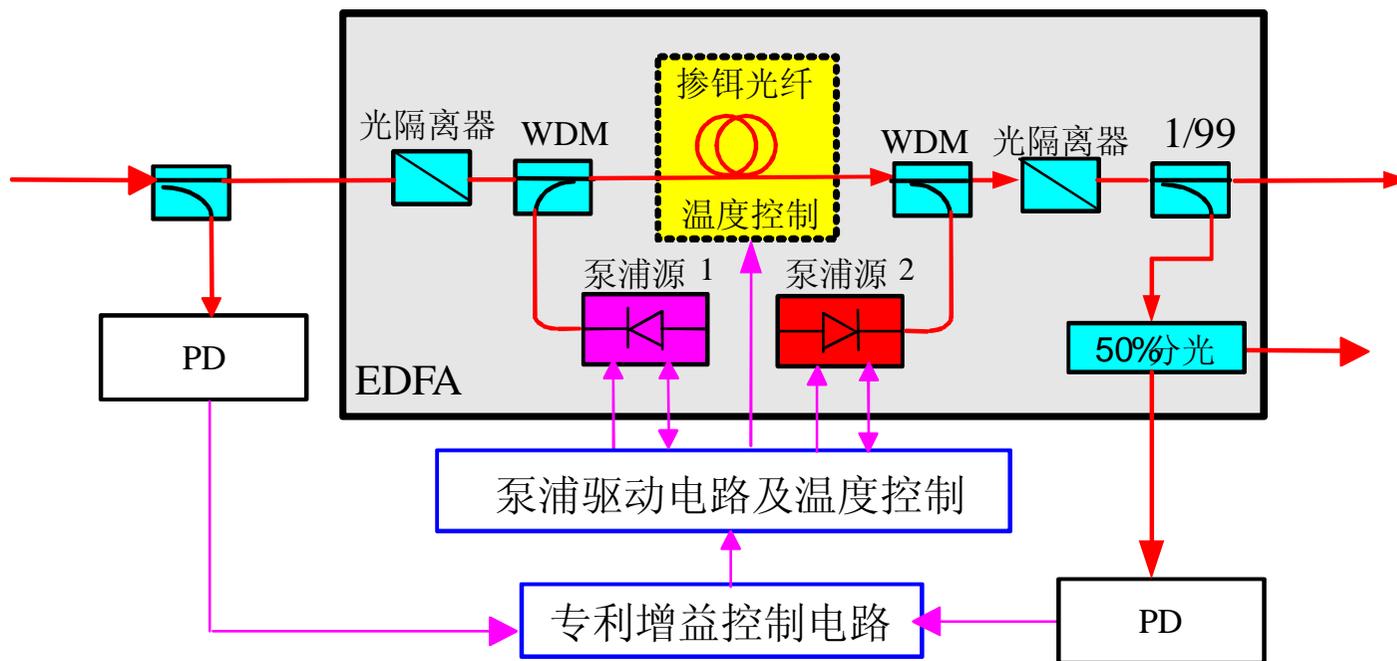


增益锁定值可调：通过网管实现4dB调整范围，有效应对光放大段不等距和光纤老化问题，实现增益补偿损耗的理想配置

配置LAC（内置EVOA电可调光衰减器）的情况下实现更大范围的衰减调整

U AGC专利技术—有助于系统平滑升级

U 瞬态抑制功能—波长数量改变时无突发误码

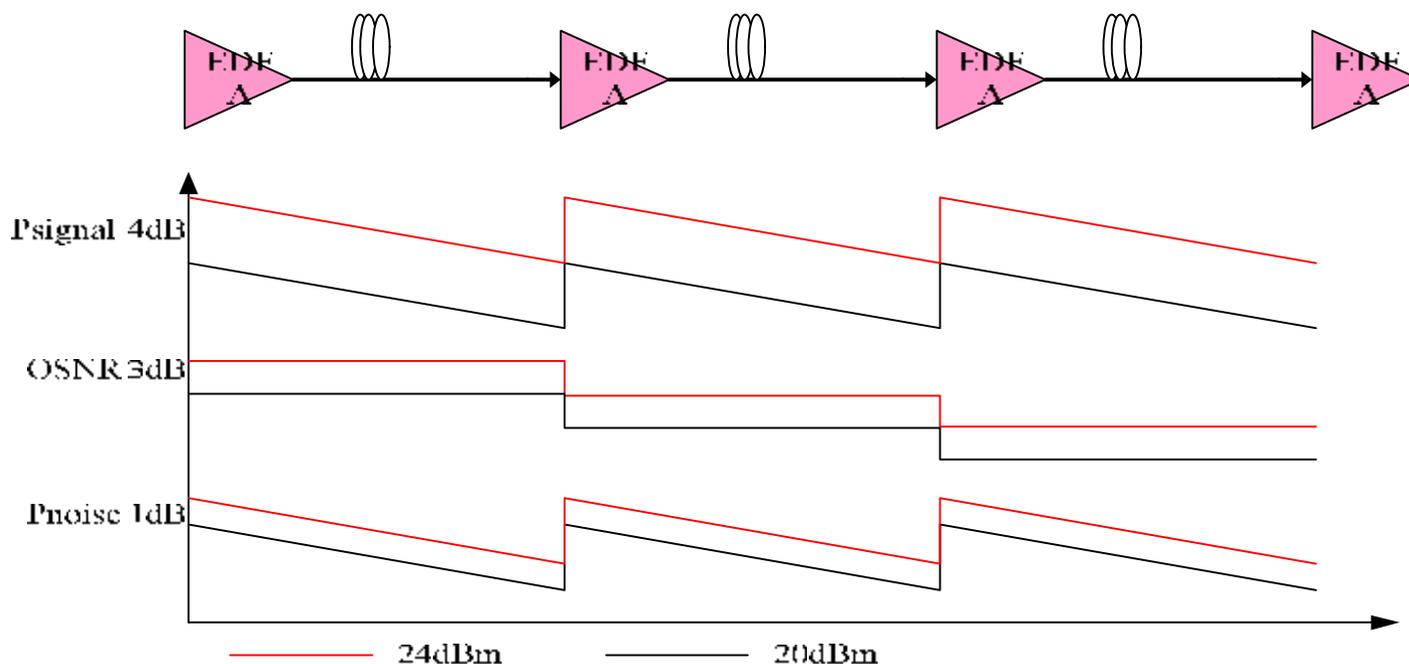


EDFA放大器的控制技术有APC自动功率锁定，ACC自动电流锁定，AGC自动增益锁定三种。

ZXWM M900系统放大器采用独特专利的AGC技术，在工作范围内保持增益锁定，兼具瞬态抑制功能，在系统运行波长数目改变的情况下，无需改变系统参数设置，系统无误码，便于维护；另外，EDFA放大器的增益锁定值还可以实现在线可调。

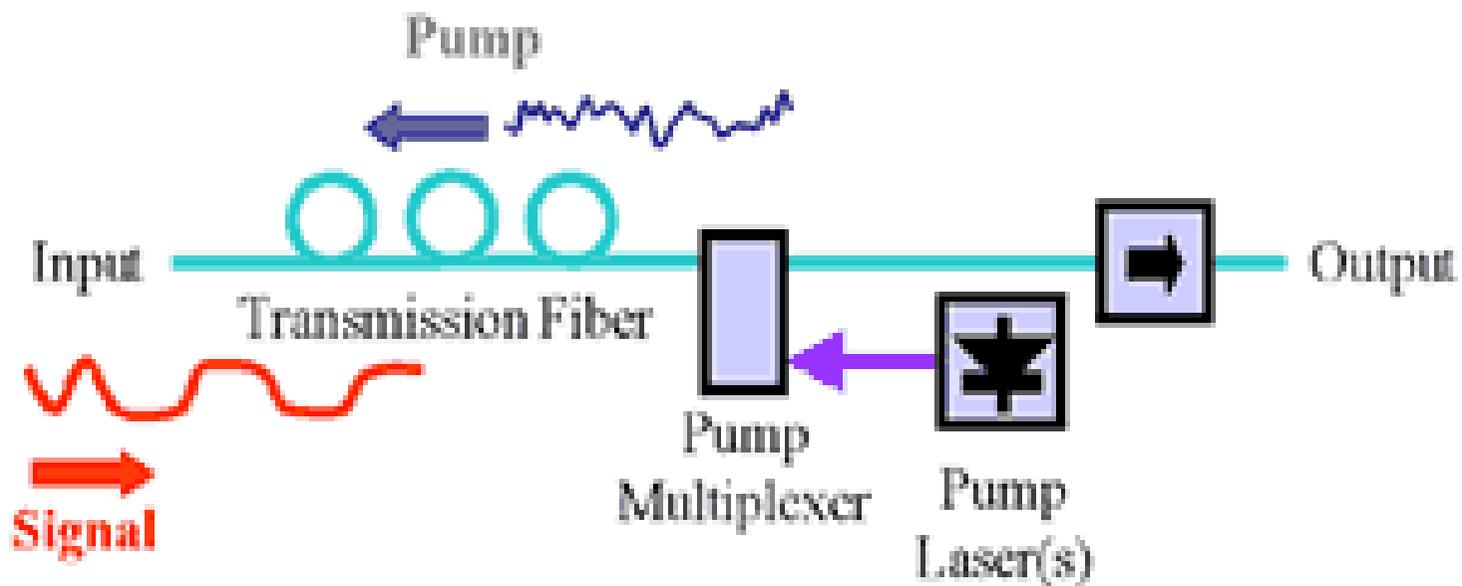
u High-Power EDFA-改善系统信噪比

- U 常用EDFA饱和输出功率为20dBm，ZXWM M900系统所用高饱和输出的EDFA输出可达24dBm，可以使得单信道输出功率得到显著提升，从而最终实现系统信噪比的改善。EDFA高饱和输出必然引入非线性，24dBm是信噪比与非线性综合衡量的结果。



RAMAN放大器原理

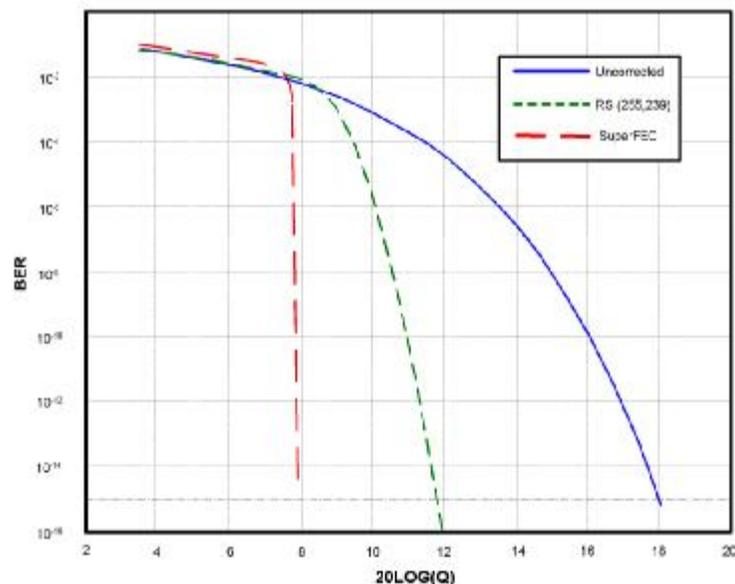
RAMAN放大器放大介质为线路光纤，放大特性为分布式放大，有效距离为30-50km，分布式放大的特性使其等效噪声指数可以达到-2dB。相对于EDFA而言，使用DRA可以达到降低噪声，改善系统信噪比的目的。



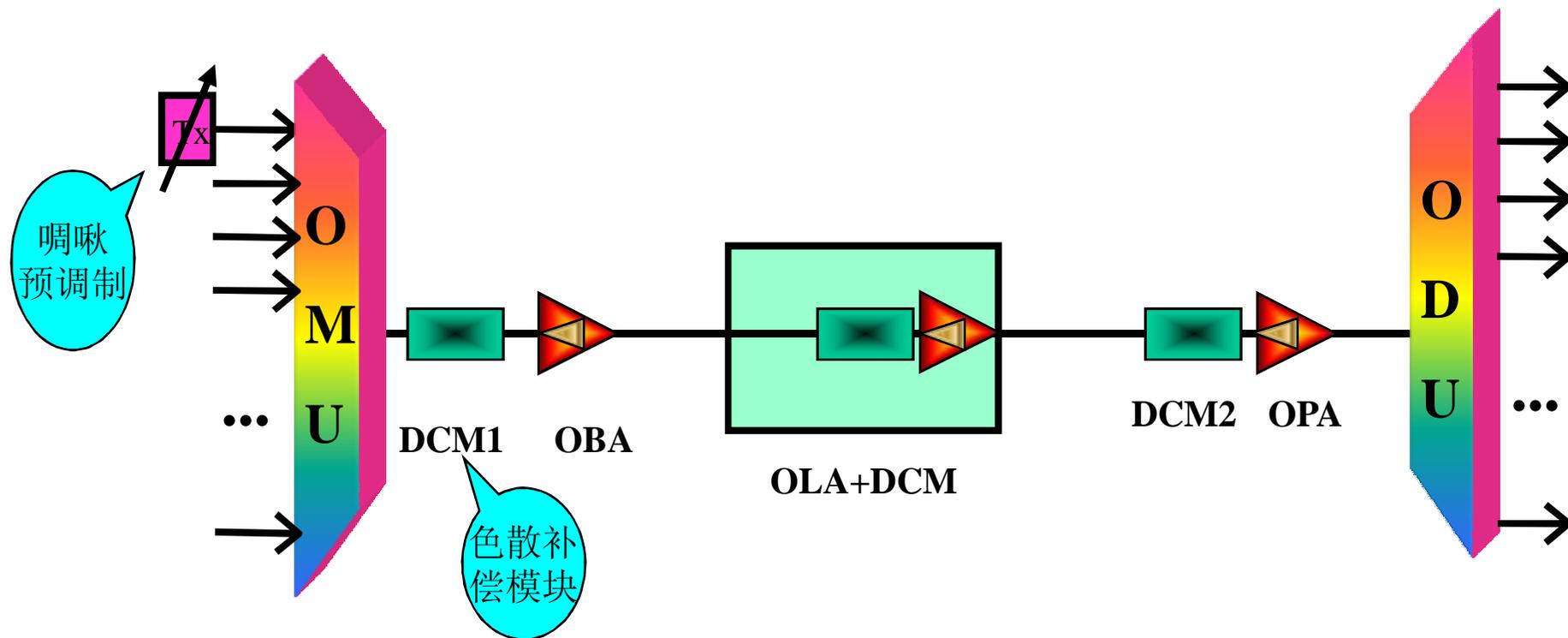
u FEC技术

n 标准FEC: RS(255,239),
G.709 , 10.71Gbps;
增益5-7dB.

n 超强FEC (Enhanced FEC, Advanced FEC):
RS(255,239)+RS(255,239),12.44Gbps;
RS(255,239)+BCH, BCH+BCH;
增益7-9dB.



色散管理技术

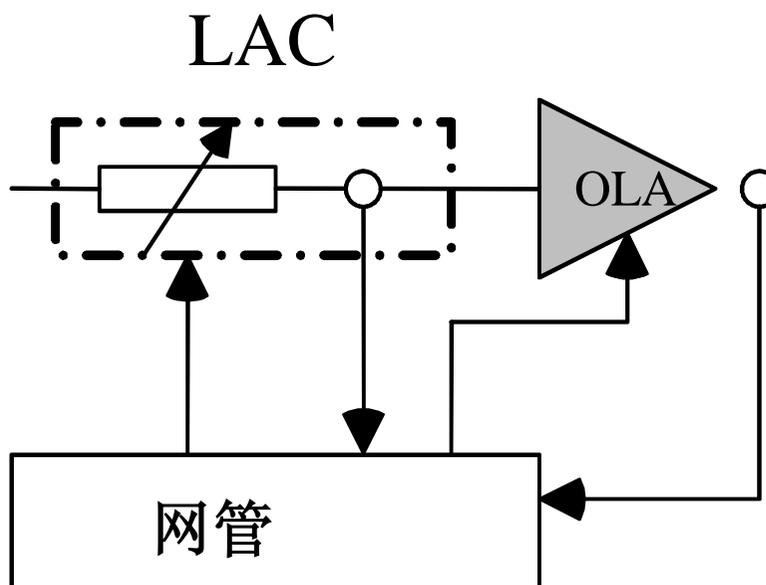


- 】 激光器预啾啾技术
- 】 宽带色散补偿模块，分布式补偿，合理分配线路补偿、预补偿、后补偿量，实现均匀补偿。
- 】 EDC：电域色散补偿技术，进行动态色散补偿

u 动态功率均衡技术

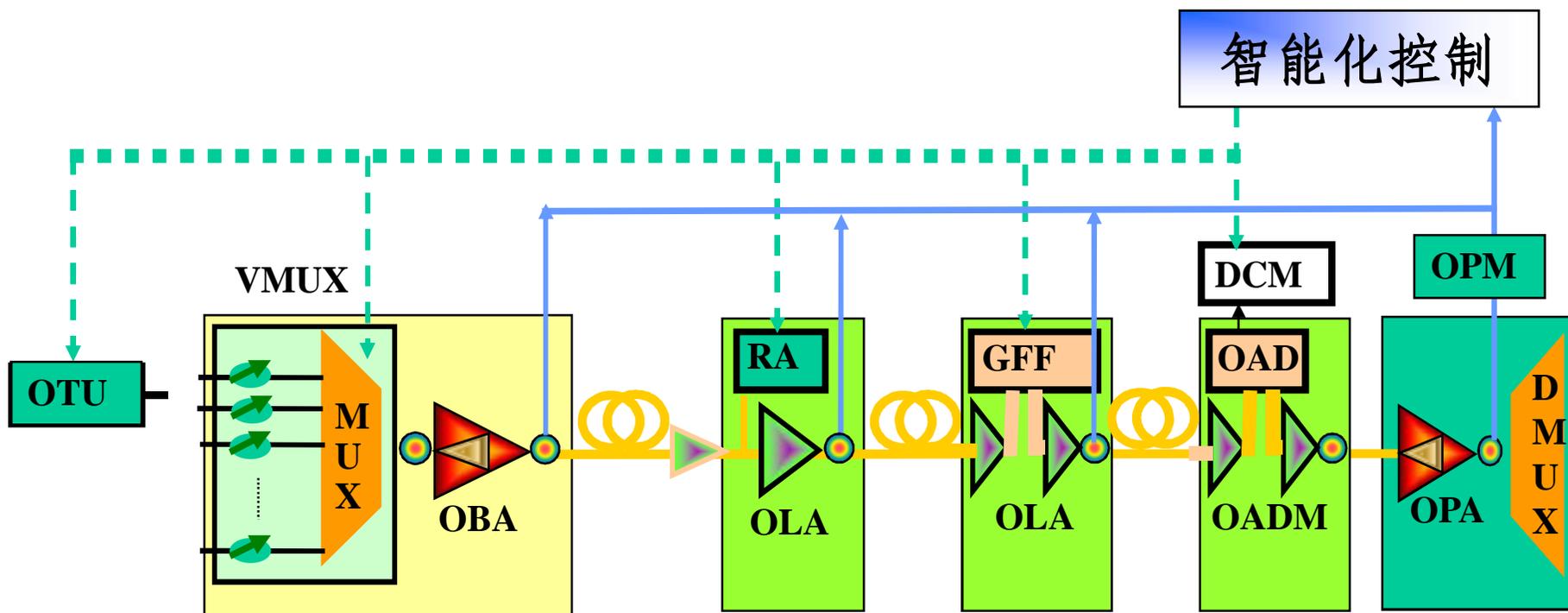
LAC-进行自动线路功率控制

LAC单板（内置EVOA）即线路衰减控制板，可以放于线路光纤与放大器之间，也可以放在两级放大器之间，可以有效的实现线路损耗变化的在线调整。



VMUX—进行自动通道功率控制

采用通道功率预加重的方法实现接收端通道功率均衡。在接收端节点，使用OPM检测光谱性能，并将信噪比、信道功率等数据通过OSC监控信道传回发送端节点，并对其进行分析和处理，以处理结果用于优化VMUX中各信道的VOA衰减量值，最终实现各信道网络性能的优化。



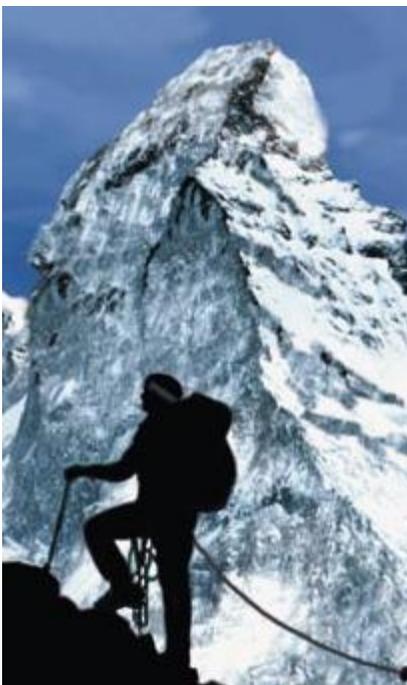
u 增值服务技术

内置光谱分析单元：可帮助维护人员及时了解到DWDM网络的运行状态，从上报的数据可了解到传输系统不同参考点处的WDM波形特性，包括每个通道的光功率、OSNR、波长、中心频率偏移、系统中总的通道数量和WDM光谱平坦度，使网管人员对设备运行状态一目了然，也便于提前发现潜在的传输性能劣化现象

光纤光缆自动监控系统（OAMS）：嵌入式OAMS系统利用OTDR技术，通过测试传输光纤路径上不同距离处的反射谱，获得光纤线路的损耗、光连接器损耗特性及其历史变化趋势，提供光纤老化预警。若光纤发生故障，OAMS系统可发出相应告警并精确定位出光路中断点的位置和断点类型，方便对光纤线路维护和监控。嵌入式OAMS特性可进一步完善传输设备的告警性能，变被动维护为主动维护，增强传输网络的可维护性。

PDH时钟传送：可为同步网时钟提供PDH级别的传输通道，系统可实现双向传送3路2M PDH时钟，并可在任何站点选择上下或者穿通。同时还可根据时钟的优先级别，对时钟单板进行1+1单板保护，为时钟网络传送提供了一种新的、高附加值的解决方案

波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*



• 波分复用技术概述

• 波分系统的组成及原理

• 波分系统的传输媒质

• 波分系统的关键技术

• 波分系统的网络设计原则

• 波分系统的发展方向

业务信号通过WDM系统传播的过程中，由于系统和传输媒介的特点，会发生不同程度的信号失真，2.5Gb/s以下速率的信号因速率低而受失真的影响不大；而10Gb/s以上的高速率信号对这些信号失真非常敏感，受影响很大，造成信号失真的因素主要有如下两大类：**线性失真、非线性失真**

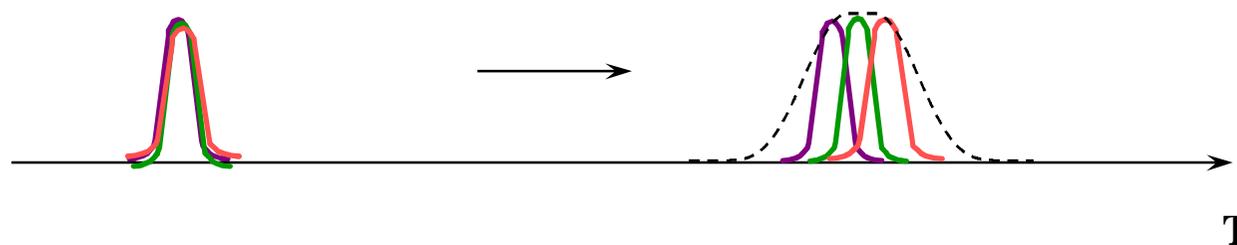
线性失真(1)

线性失真主要是由于线路光纤的色度色散和衰耗引起的失真，这种失真不依赖于信号强度。

光纤色度色散对光信号中的不同频率成分产生不同程度的时延，最终导致整个光信号在到达链路末端时产生脉冲展宽而失真，失真程度随着光缆长度的增加而增强，且因为不同类型的光纤而不同。解决累积色度色散问题的办法是每隔一定的光纤长度接入色散特性相反、长度合适的色散补偿光纤模块（DCM）。

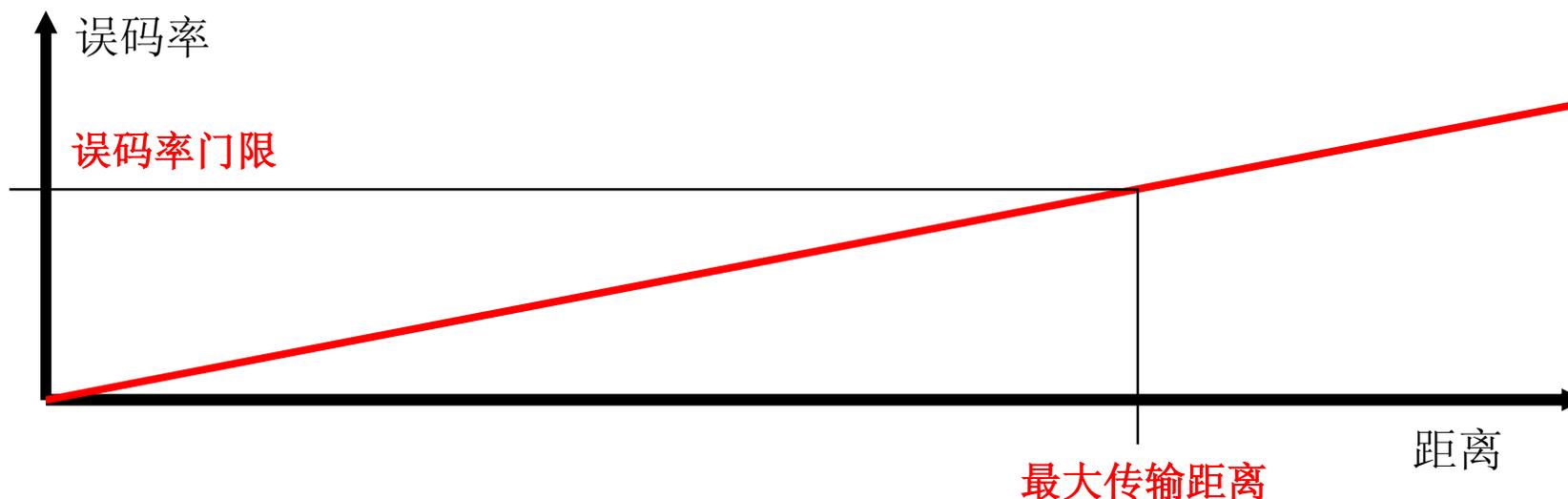
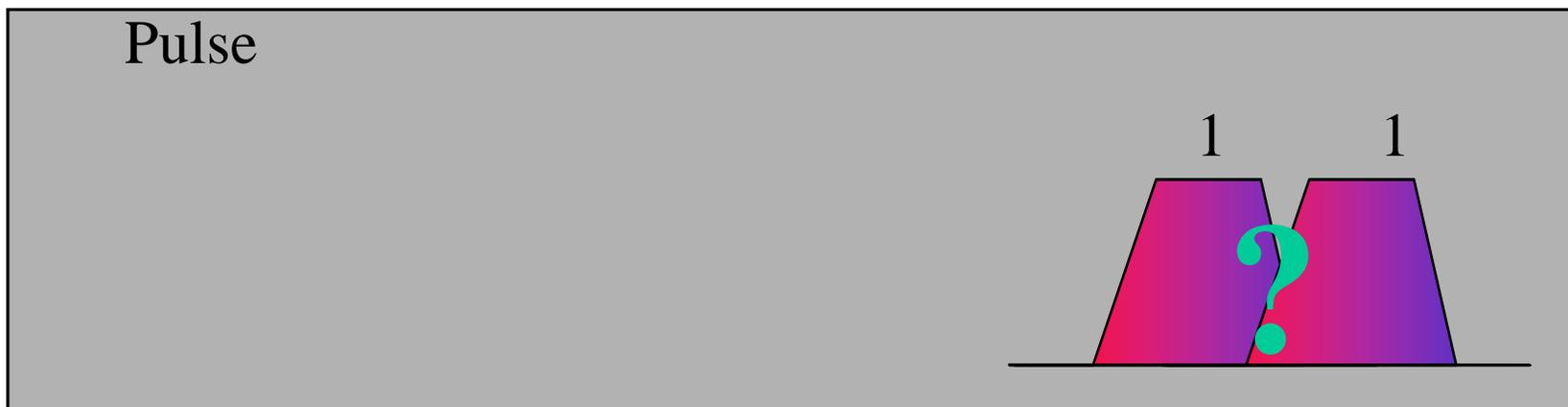
色度色散

脉冲展宽

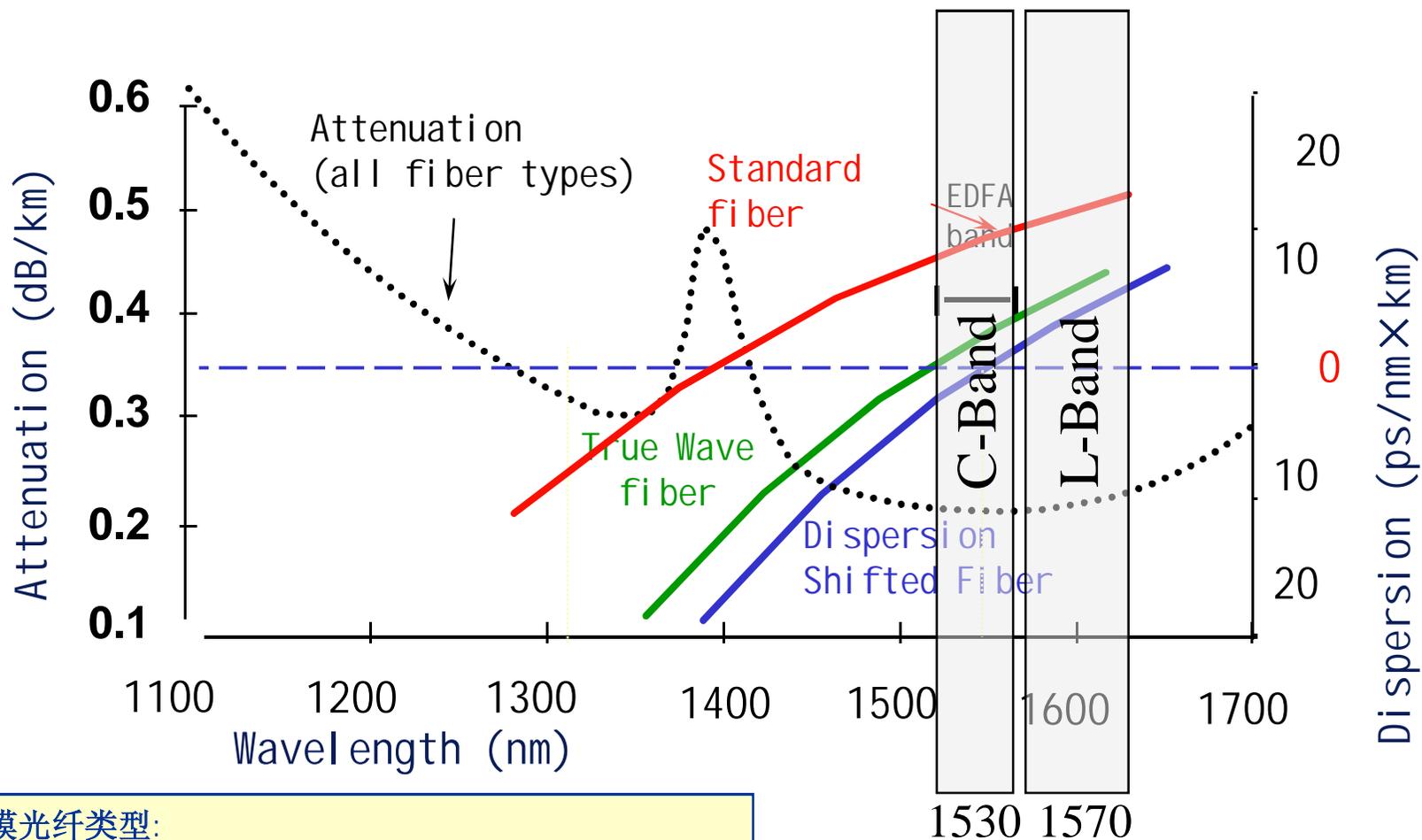


光脉冲信号中的不同频谱成份在光纤中的传输速度不同，导致脉冲信号传输后展宽甚至离散。

光纤中的色散

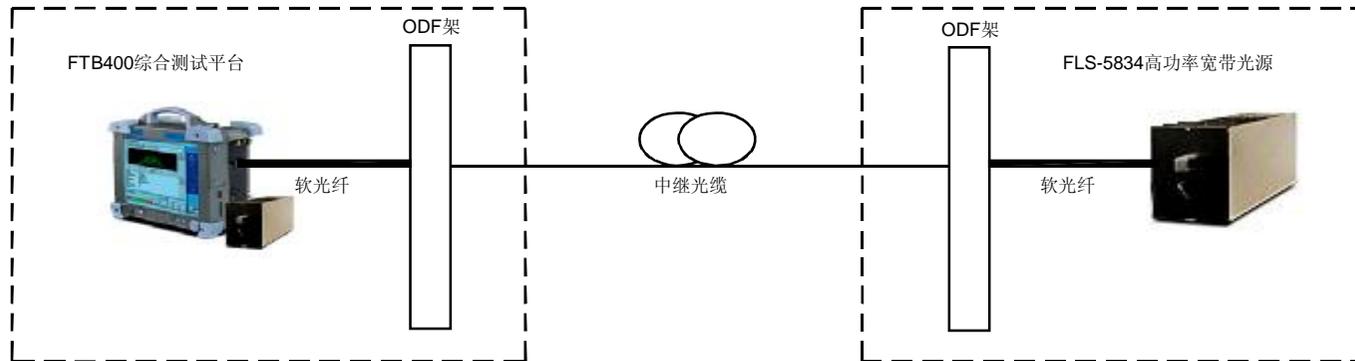
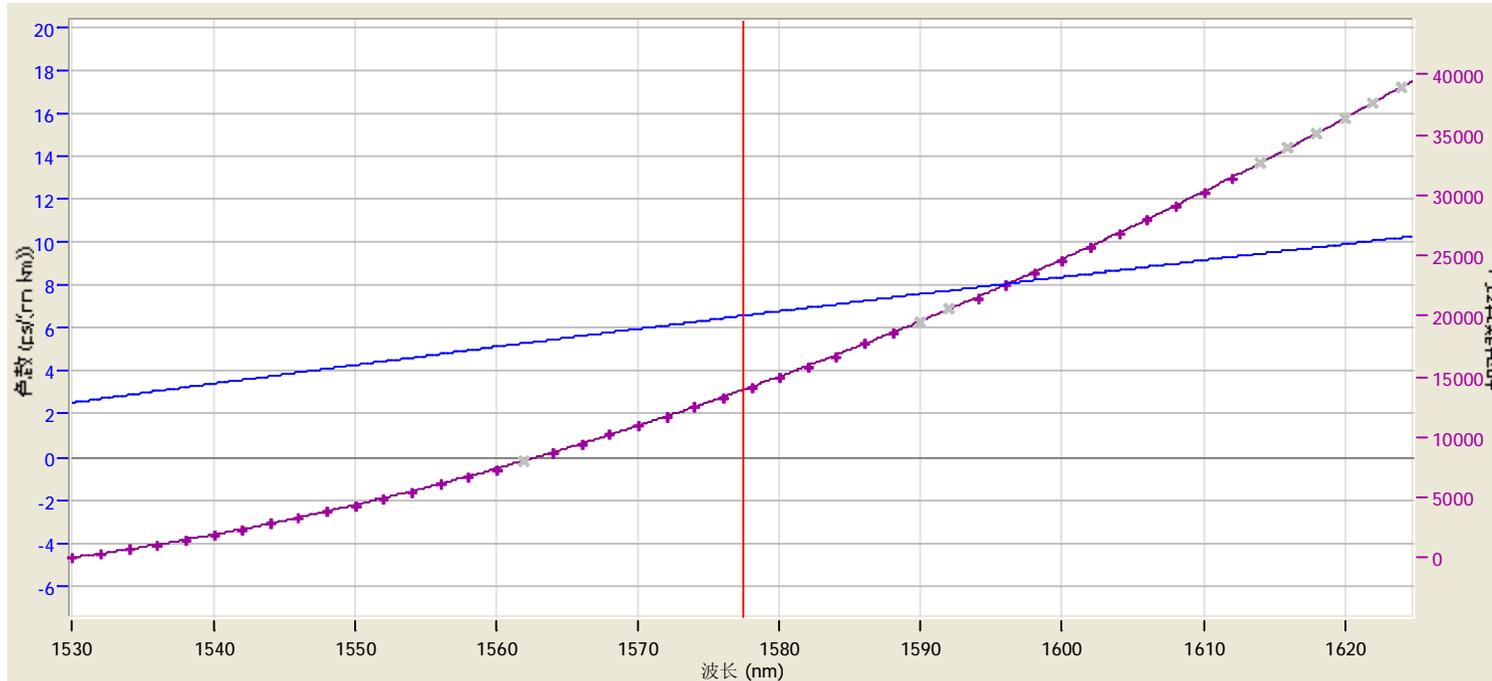


光纤中的损耗与色散曲线



单模光纤类型:
 标准单模光纤 (无色散位移) —— G. 652
 色散位移光纤 —— G. 653
 非零色散位移光纤 (NZDF) —— G. 655
 (TrueWave光纤和LEAF光纤)

波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*

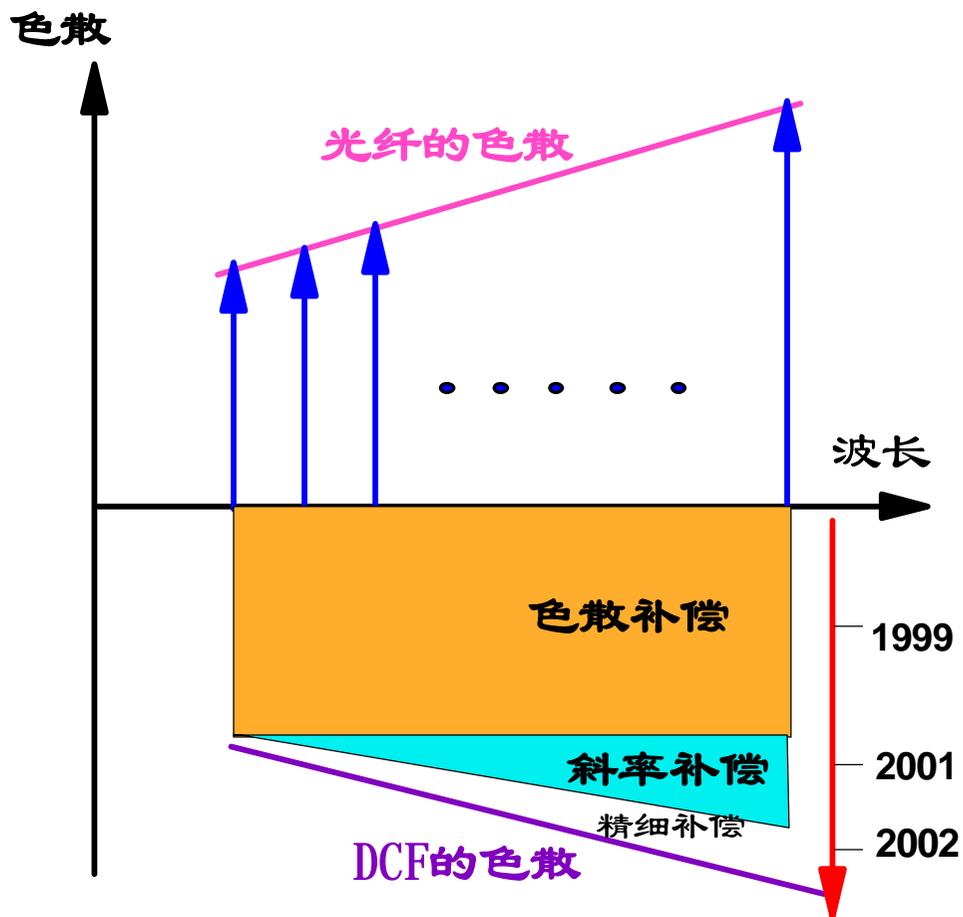


色散限制的来源

- 光源的线宽、调制信号的光学带宽
- 光纤的色散 (GVD、PMD)
- 光无源器件的色散

色散可以通过补偿来克服

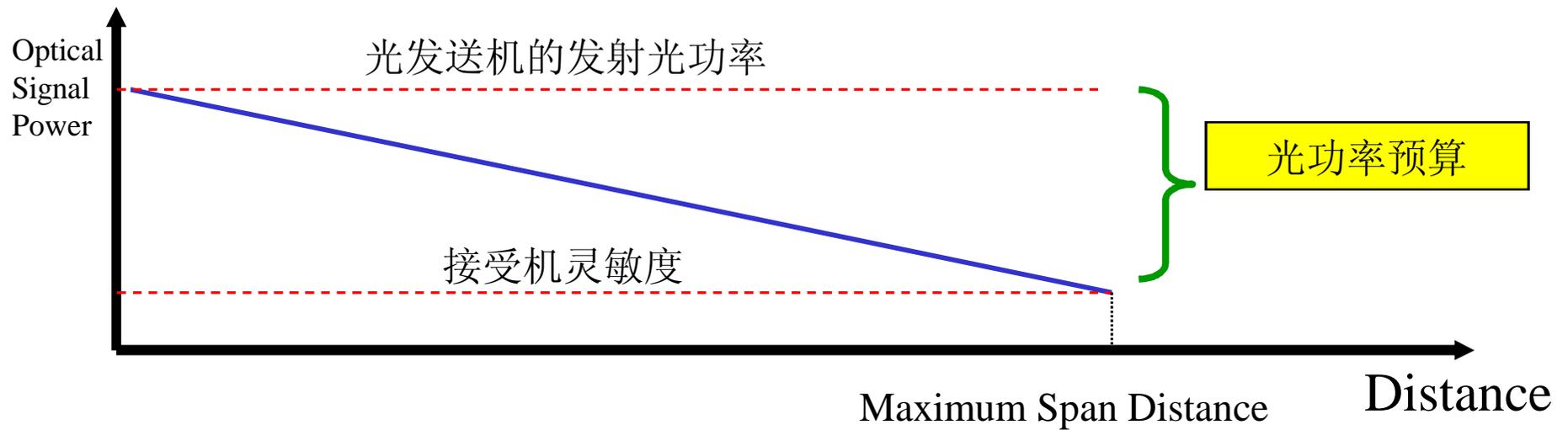
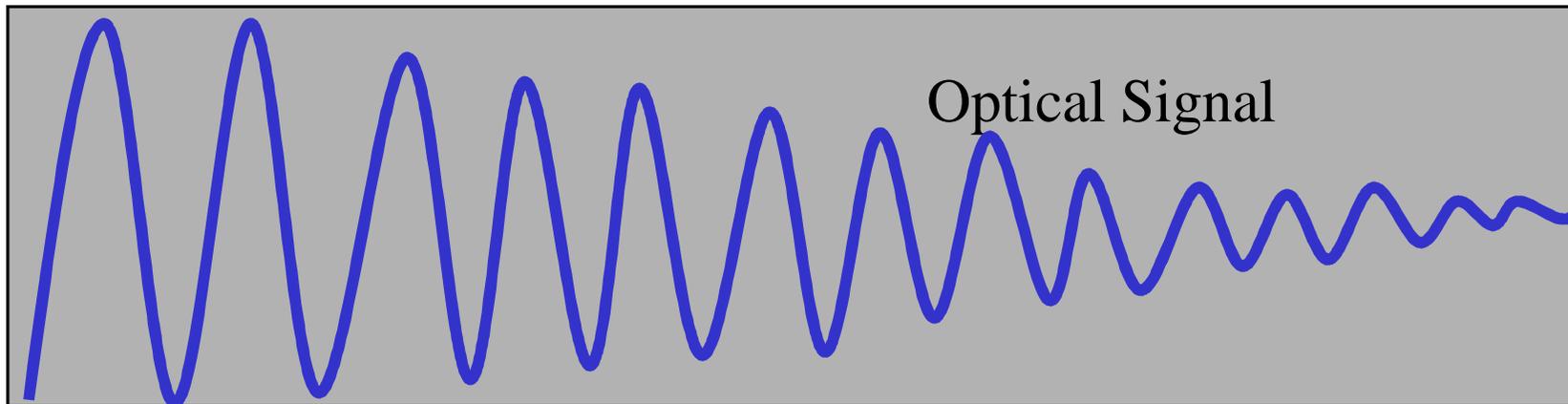
- DCF (引入损耗和非线性, 带宽小)
- 色散斜率补偿技术
- 可调色散补偿技术 (精细补偿)



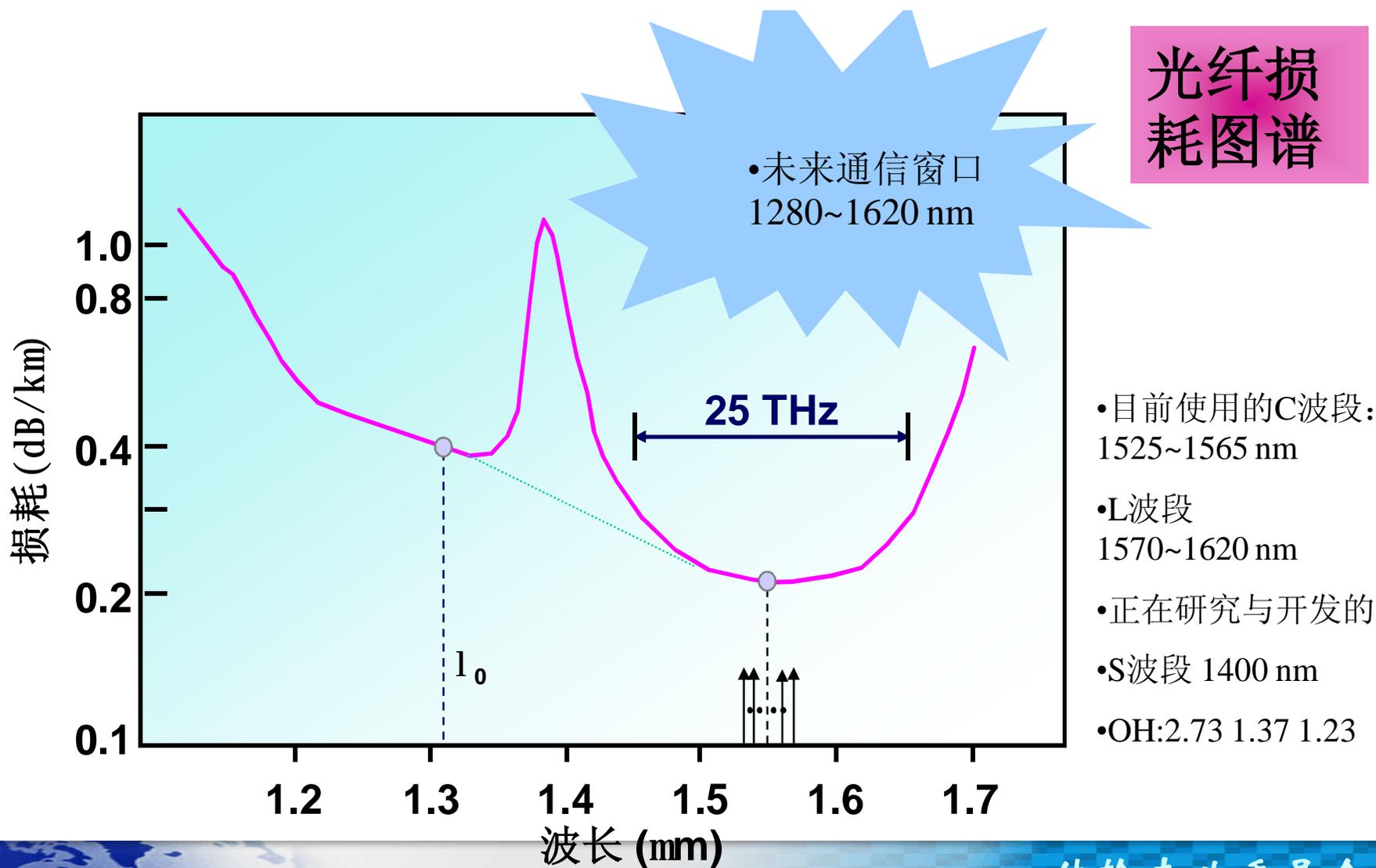
线性失真(2)

线路衰耗会削弱信号光功率，造成信号质量劣化。信号劣化到了一定限度，将被噪声掩盖而无法正常通信。解决累积衰耗问题的途径是设立光中继站，利用EDFA光放大器和外置泵浦源实现光信号再生。

光纤中的损耗



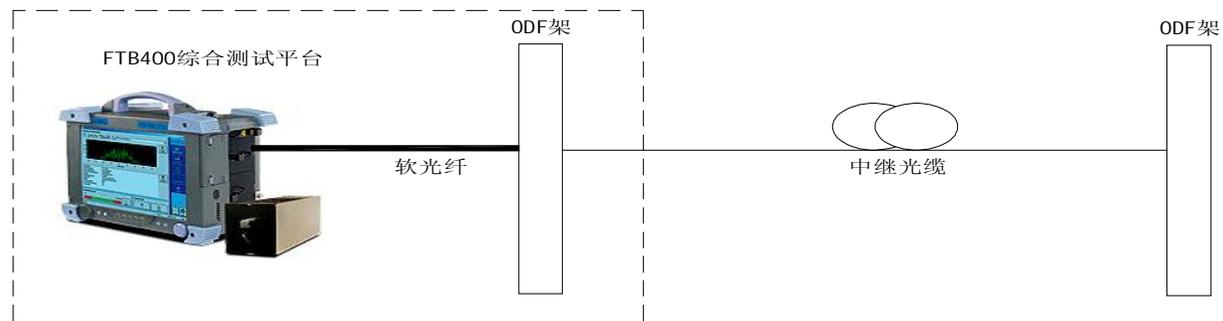
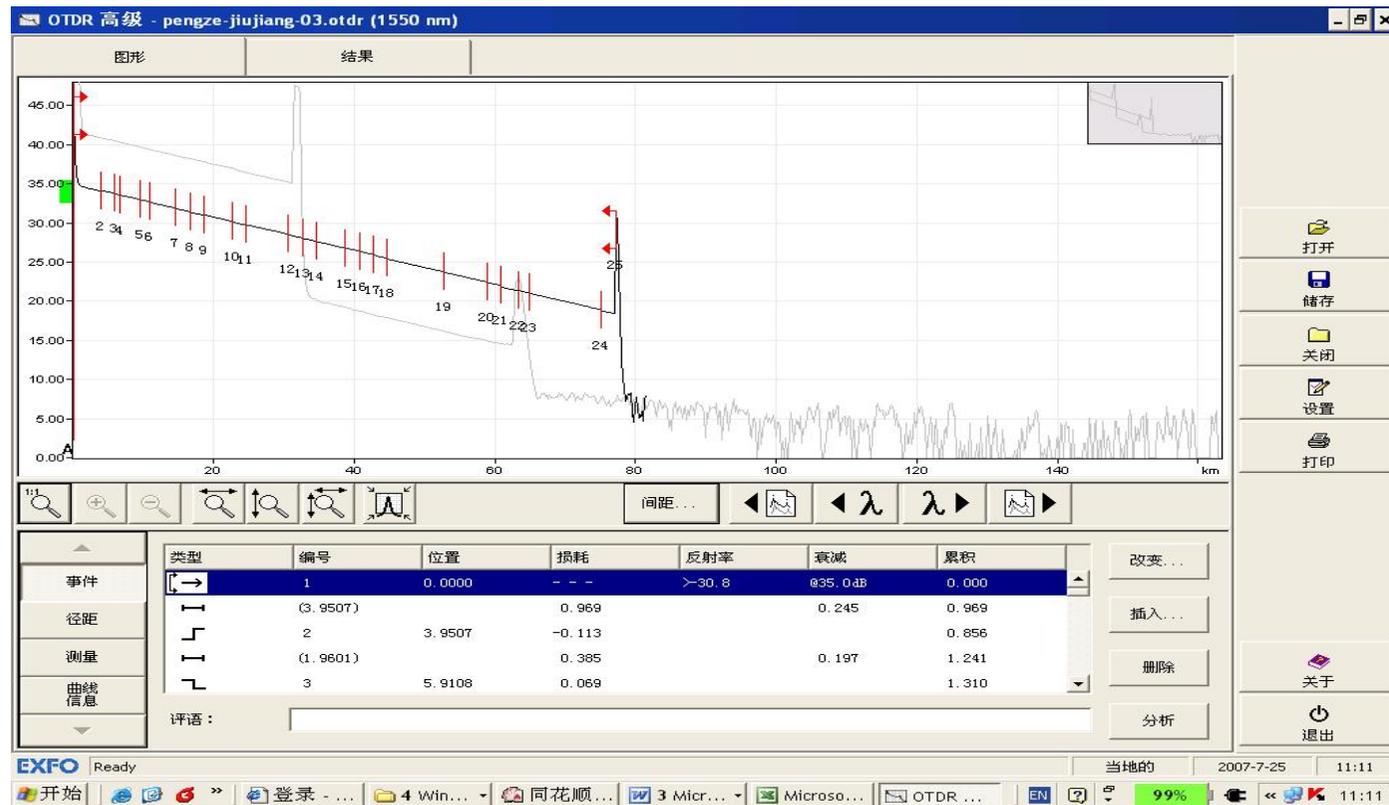
影响系统的光纤特性——光纤损耗



光纤损耗图谱

- 未来通信窗口 1280~1620 nm
- 目前使用的C波段: 1525~1565 nm
- L波段 1570~1620 nm
- 正在研究与开发的
- S波段 1400 nm
- OH: 2.73 1.37 1.23

波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*

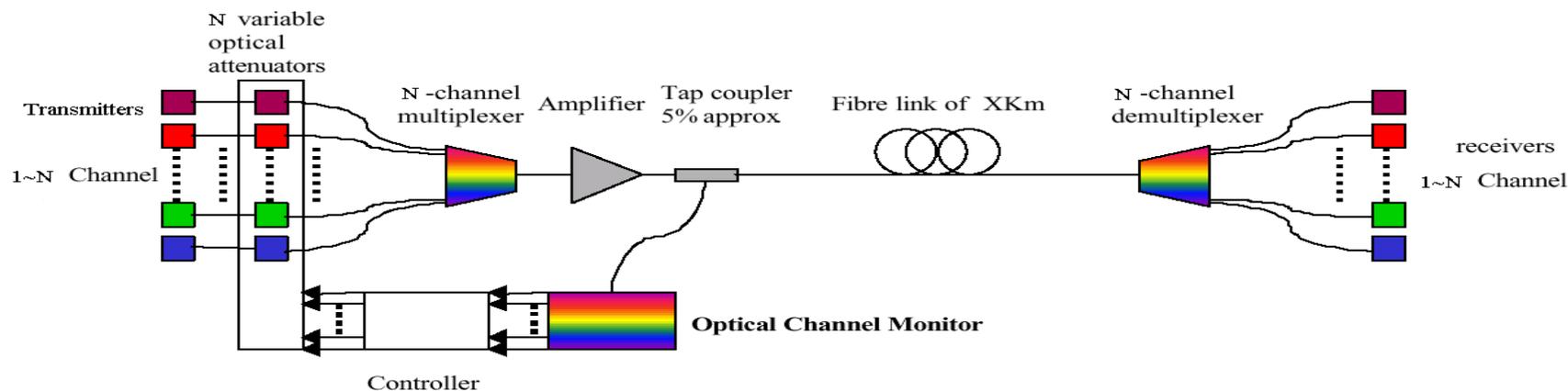


Ø 功率限制的来源

- 光发射机的功率及其全波段范围内不平坦性
- 光纤损耗、各种器件的损耗（波长相关）
- 接收机灵敏度

Ø 克服功率限制的主要手段

- 光放大器：EDFA、TDFFA、SOA、RAMAN enhanced EDFA、EWDA
- 系统级别的光功率均衡技术。



线性失真(3)

关于色散和衰耗还存在斜率(tilt)问题。同一根光纤对不同波长的信号所产生的色散和衰耗是有差别的，实际EDFA放大器也不可能达到理想的增益平坦，所以，如果没有采取相应措施，各波信号经过多跨段、长距离的传输到达末端后，在通道光功率、光信噪比(OSNR)、累积色散等参数上会有很大的差别，形成所谓的功率tilt、OSNR tilt和色散tilt，导致信号质量参差不齐。色散tilt通过带斜率补偿的特殊DCM解决，而OSNR和功率tilt处理方法有：特殊放大器的tilt控制；功率均衡和预加重调整。

非线性失真

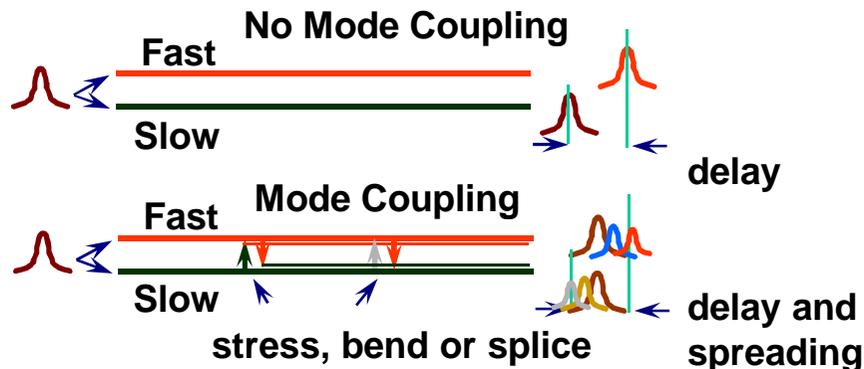
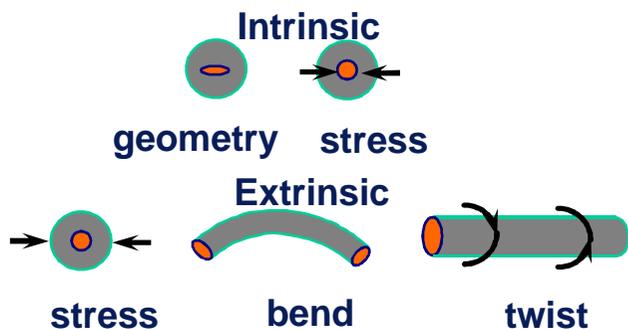
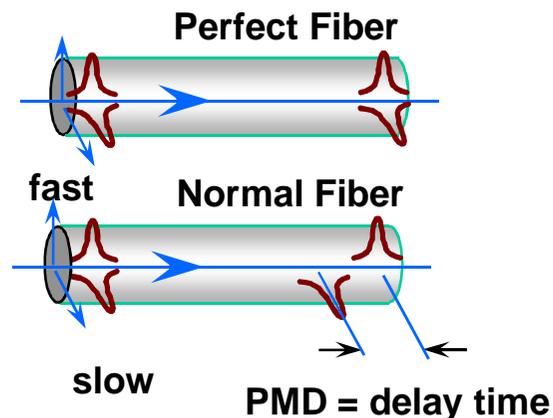
PMD影响

当入纤光功率较强时, 光纤的基本参数折射率 n 受光功率变化影响较大, 呈现出非线性, 称为克尔效应。克尔效应主要表现形式有四波混频(FWM)、自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)等。非线性失真还包括随信号强度而变化的各种散射过程, 如: 受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)。

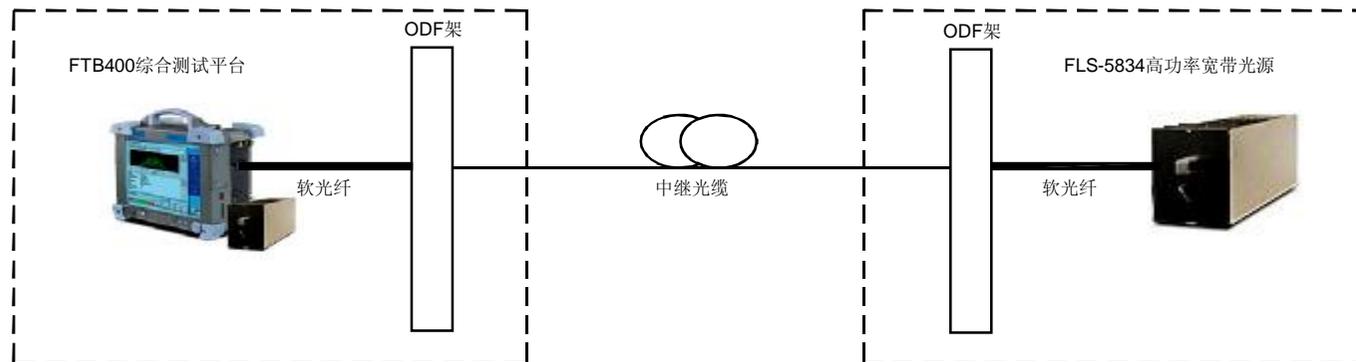
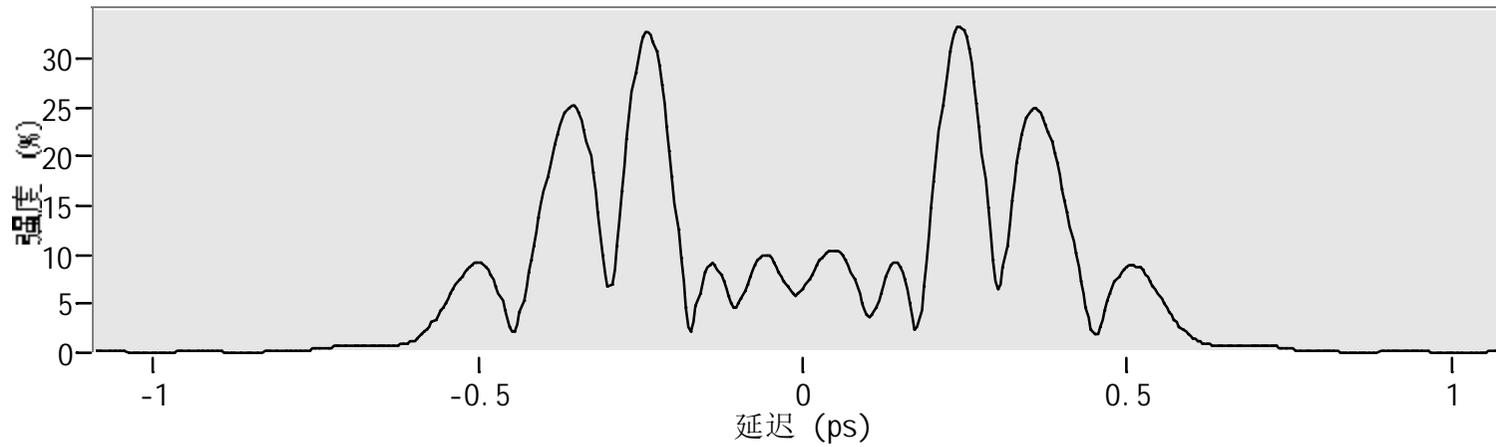
非线性效应也会导致光信号脉冲展宽, 产生失真、畸变, 从而影响传输质量。削弱或消除非线性失真的主要措施有: 器件设计的噪声抑制; 控制入纤功率在合适范围; 适当的残留色散利于抑制FWM; 信号预加重调整。

光纤的极化模色散——PMD

光波沿光纤中两个不同偏振态传播速度不同



波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*



光纤非线性效应：

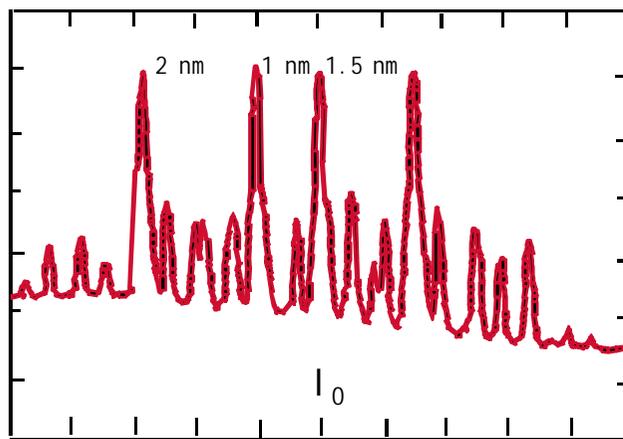
- Ø 受激拉曼散射 (SRS)
- Ø 受激布里渊散射 (SBS)
- Ø 自相位调制 (SPM)
- Ø 交叉相位调制 (XPM)
- Ø 四波混频 (FWM)

光纤的非线性效应

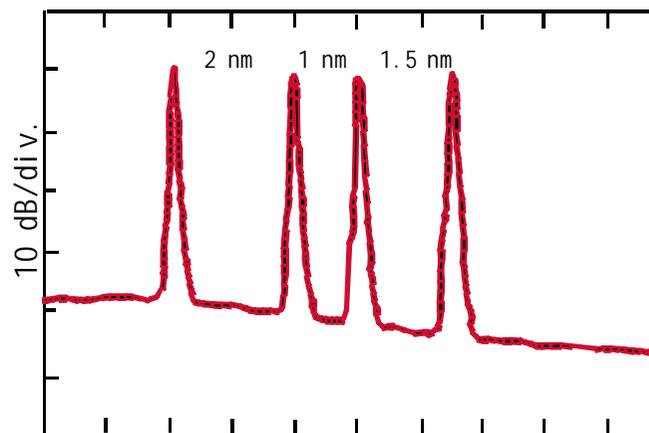
- § 受激散射效应 –
 - 光子与分子晶格的相互作用
 - 受激拉曼散射 (SRS)
 - 受激布里渊散射 (SBS)
- § 折射率效应 –
 - 光信号强度对光纤折射率的调制
 - 自相位调制 (SPM)
 - 交叉相位调制 (CPM, XPM)
 - 四光子混频 (FWM, FPM)

四波混频

§ 引起通道间的串扰，降低了波分复用系统的性能



Dispersion-Shifted Fiber (25 km)
 $D \sim 0$ ps/nm-km



TrueWave Fiber (50 km)
 $D \sim -2.5$ ps/nm-km

四波混频的补偿措施

特点：

- ∅ FWM的效率 \propto 信道间隔,
- ∅ FWM的效率 \propto 光纤色散（相位匹配）。
- ∅ 在 P/ch 较大时 降低FWM效应的方法是：大 $|D|$ ，大 A_{eff} 。

补偿措施：

- ∅ 控制入纤功率
- ∅ 采用非零色散位移光纤（G. 655）和常规单模光纤（G. 652）
- ∅ 采用大有效纤芯面积光纤（LEAF）

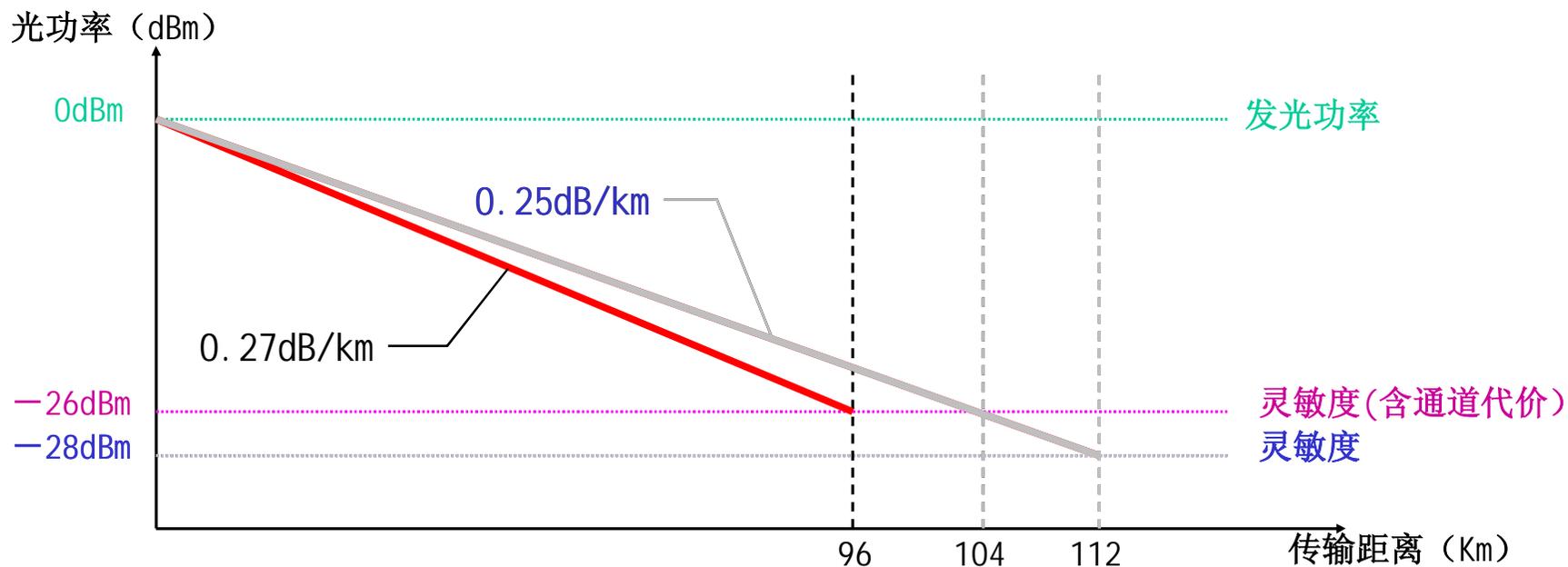
系统设计的限制因素

- Ø 光纤损耗=>功率减弱
- Ø 光纤色散=>脉冲变形(时域), 线性过程, 可逆
- Ø PMD =>脉冲变形(时域), 随机过程
- Ø 光纤非线性=>信号畸变(频域), 非线性过程, 不可逆

传输系统设计一般原则

< 光功率预算设计—通常用于设计单通道SDH传输系统的设计

- 光发送机发光功率 (dBm)
- 光接收机灵敏度 (dBm)
- 光通道代价 (dB)
- 光纤衰耗 (dB/Km)
- 光纤维护余量 (dB/Km)



传输系统设计一般原则

< 光信噪比预算(由于光纤放大器的引入)——通常用于波分复用网络的设计

—系统提供给接受机的光信噪比—— $OSNR_{input}$

—接受机在满足误码率前提下所需要s的最小光信噪比—— $OSNR_{require}$

—网络设计的简单原则—— $OSNR_{input} > OSNR_{require}$

—系统设计的简单原则——**尽可能降低** $OSNR_{require}$

Ø 系统噪声的来源

- 光发射机（相位噪声等）
- 光接收机噪声
- 光放大器ASE噪声

Ø 提高OSNR的方法

- 提高光发射机的消光比
- 采用新型低噪声放大器（RAMAN等）
- 提高光接收机的灵敏度
- 增加输入功率
- 降低线路传输损耗
- 采用FEC、SFEC等技术

如何降低接收机所需的光信噪比 $OSNR_{require}$

- 光发送机采用波长锁定机制，降低通道中心频率的漂移
- 采用带外前向纠错技术，可以使误码率为 10^{-16} 对 $OSNR_{require}$ 的要求降低5-7dB
- 采用滤波曲线更为陡峭的分波器，降低各通道间的串扰
- 在接受机中采用对判决点的自动调整，降低错判的概率

WDM设计方法

- 一、规则设计法（又可称为固定衰耗法）
- 二、简易的信噪比计算法
- 三、专用系统计算工具计算

上述三种计算方法都应在工程实施前通过模拟仿真系统来验证

波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*

- 1、16波、32/40波WDM系统的应用代码（基于STM-16基础速率）；
- 2、32/40波WDM系统的应用代码（基于STM-64基础速率）
- 3、无喇曼放大器、具有常规带外FEC的80/160波WDM系统（50GHz间隔）的应用代码（采用G. 652/G. 655光纤、基于STM-64基础速率）
- 4、具有常规FEC、喇曼放大器的80/160波WDM系统（50GHz间隔）的应用代码（采用G. 652光纤、基于STM-64基础速率）
- 5、具有常规FEC、喇曼放大器的80波WDM系统（100GHz间隔）的应用代码（采用G. 652光纤、基于STM-64基础速率）
- 6、具有超强FEC、喇曼放大器的80/160波WDM系统（50GHz间隔）的应用代码（采用G. 652光纤、基于STM-64基础速率）
- 7、具有超强FEC、喇曼放大器的80波WDM系统（100GHz间隔）的应用代码（采用G. 652光纤、基于STM-64基础速率）

应用场合	长距离	甚长距离	
波长范围	1530~1565nm（C波段）		
光纤类型	G.652、G.655	G.652、G.655	
再生目标距离	~640km	~360km	~550km
光放段数量	8	3	5
光放段目标距离	~80km	~120km	~110km
16通路	16L8-16.2/5	16V3-16.2/5	16V'5-16.2/5
32通路	32L8-16.2/5	32V3-16.2/5	32V'5-16.2/5

规则设计法（又可称为固定衰耗法）——即利用色散受限式及保证系统信噪比的衰耗受限式，分别计算这二式后，取其**较小值**。此方法适用段落比较均匀的情况。

(1) 色度色散受限距离

$$L = D_{\text{sys}} / |D|$$

式中：L——色散受限的再生段长度（km）

D_{sys} ——MPI-S、MPI-R点之间光通道允许的最大色散值

$|D|$ ——光纤色散系数（ps/nm·km）

(2) 衰耗受限距离

$$L = \sum_{i=1}^n \left[(A_{span} - \sum A_c) \div (A_f + A_{mc}) \right]$$

式中：**L**—保证信噪比的衰减受限的再生段长度（km）；

n—WDM系统应用的应用代码所限制的光放段数量；

A_{span}—最大光放段衰耗，其值应小于并等于WDM系统采用的应用代码所限制的段落衰耗（dB）；

∑A_c—MPI-S、R'点或S'、R'点或S'、MPI-R间所有连接器衰减之和（dB）；

A_f—光纤衰减常数（dB/km，含光纤熔接衰减）；

A_{mc}—光线路维护每千米余量（dB/km）；

简易的信噪比计算法—当规则设计法不能满足实际应用的要求时，可采用色散受限式及简易的信噪比计算式（3.8.2-3）进行系统设计，即利用保证色散受限和系统的信噪比来确定再生段/光放段的长度。此方法适用光放段衰耗差别不太大的情况。

$$\text{OSNR}_N = 58 + P_{\text{tot}}/M - N_f - A_{\text{span}} - 10L_g N$$

式中：OSNR_N—N个光放段后的每通路光信噪比（单位：dB）；

M—通路数量；

P_{tot}/M—每通路的平均输出功率（单位：dBm）；

N_f—光放大器的噪声系数；

A_{span}—最大光放段损耗（dB）；

在信噪比（OSNR）的计算中，取光滤波器带宽0.1nm，在每个光放段R'点及MPI-R点的各个通路的OSNR满足指标的情况下，由光放段损耗来决定光放段的长度，也确定了通过几个OA级联的再生段长度。

专用系统计算工具计算—在上述两种均不能满足系统OSNR的情况下，要采用专用系统计算工具计算OSNR来确定。

工程系统设计还应考虑的技术措施:

- 喇曼放大器可以用于个别站段间距超长或衰耗过大、加站困难的特殊段落;
- 常规FEC或超强FEC的使用;
- 工程初期的光放大器配置和局站设置, 应按系统终期传输容量考虑, 为系统升级扩容提供方便条件;
- WDM传输系统应能够适应一定程度的线路衰减变化, 当线路衰减变化时自动调整光放大器的输出功率使得系统工作在最佳状态。

对光纤的考虑

光纤引入的影响

4 光纤衰耗

- 采用1550nm低衰耗窗口
- 采用掺铒光纤放大器实现光信号的中继
- 典型值：0.23dB/km

4 光纤的色度色散

- 采用色散补偿技术 - 负色散光纤或光纤光栅技术
- 典型值：16.9dB/km

4 光纤的极化模色散

- 采用较新的光纤
- 采用极化模色散补偿或缩短电再生距离
- 采用较低速率的信号(2.5Gb/s以下)
- 典型值：0.1~0.3ps/km^{1/2}

工程设计规范的制定

§ 传输性能试验以及工程仿真计算是设计规范制定的最重要的两个因素

§ 仿真计算基于完全逼真的模型

§ 无论是实验还是仿真计算均模拟实际情况中所有的线路因素

— 色度色散

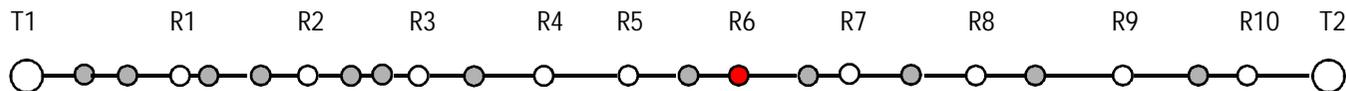
— 光纤折射率的非线性变化

— 受激散射

§ 在实验数据与理论计算之间不断进行验证，确保网络设计的万无一失



实际网络设计示例



- 光终端站
- 光放站
- 光直通站

光中继段长度—km	88.57	66.60	68.09	89.72	60.30	71.97	68.94	82.86	97.83	78.89	47.25
光中继段衰耗—dB	25.91	19.98	20.38	25.72	17.28	20.93	20.11	23.87	27.91	22.80	13.76
光复用段长度—km	821.01										

光纤衰耗系数：0.25dB/km

光纤维护余量：0.02dB/km

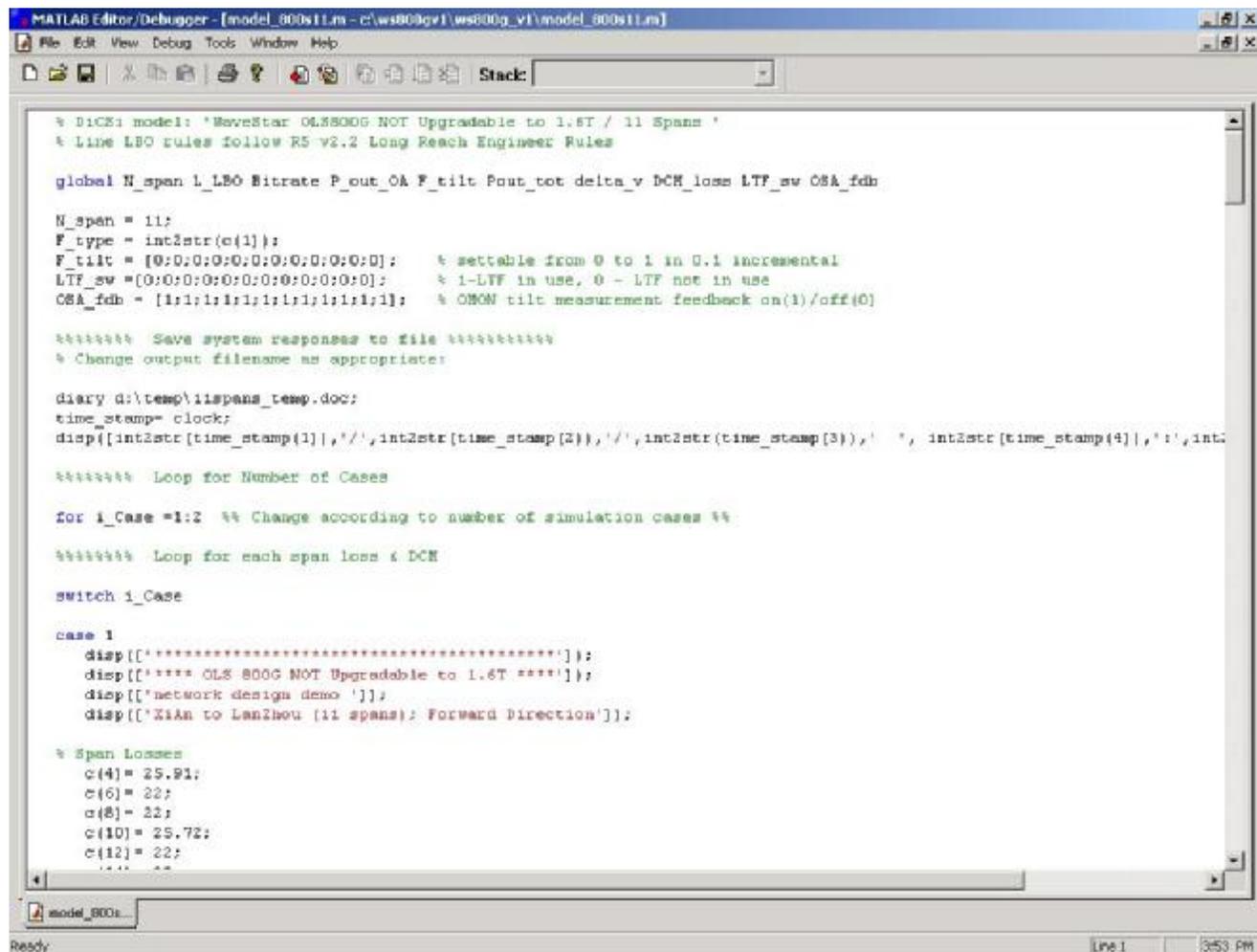
光纤活接头衰耗：0.5dB/个

光纤色散系数：17ps/nm.km

光中继段衰耗：光中继段长度*(0.25+0.02)+y*0.5

y：光纤活接头个数

§ 输入路由参数，建立网络模型



```
MATLAB Editor/Debugger - [model_800s11.m - c:\ws800g\1\ws800g_v1\model_800s11.m]
File Edit View Debug Tools Window Help
Stack:

% DiCS1 model: 'WaveStar OL8800G NOT Upgradable to 1.6T / 11 Spans '
% Line LBO rules follow R5 v2.2 Long Reach Engineer Rules

global N_span L_LBO Bitrate P_out_OA F_tilt Pout_tot delta_v DCM_loss LTF_sw OSA_fdb

N_span = 11;
F_type = int2str(c(1));
F_tilt = [0:0:0:0:0:0:0:0:0:0:0]; % settable from 0 to 1 in 0.1 incremental
LTF_sw = [0:0:0:0:0:0:0:0:0:0:0]; % 1-LTF in use, 0 - LTF not in use
OSA_fdb = [1:1:1:1:1:1:1:1:1:1:1]; % OMCW tilt measurement feedback on(1)/off(0)

%%%%%%%% Save system responses to file %%%%%%%%%
% Change output filename as appropriate:

diary d:\temp\11spans_temp.doc;
time_stamp= clock;
disp([int2str(time_stamp(1)), '/', int2str(time_stamp(2)), '/', int2str(time_stamp(3)), ' ', int2str(time_stamp(4)), ' ', int2str(time_stamp(5))]);

%%%%%%%% Loop for Number of Cases

for i_Case =1:2 % Change according to number of simulation cases %

%%%%%%%% Loop for each span loss & DCM

switch i_Case

case 1
    disp(['%%%%%%%%%']);
    disp(['***** OLS 800G NOT Upgradable to 1.6T *****']);
    disp(['network design demo ']);
    disp(['Xian to Lanzhou (11 spans): Forward Direction']);

% Span Losses
c(4) = 25.91;
c(6) = 22;
c(8) = 22;
c(10) = 25.72;
c(12) = 22;
.....

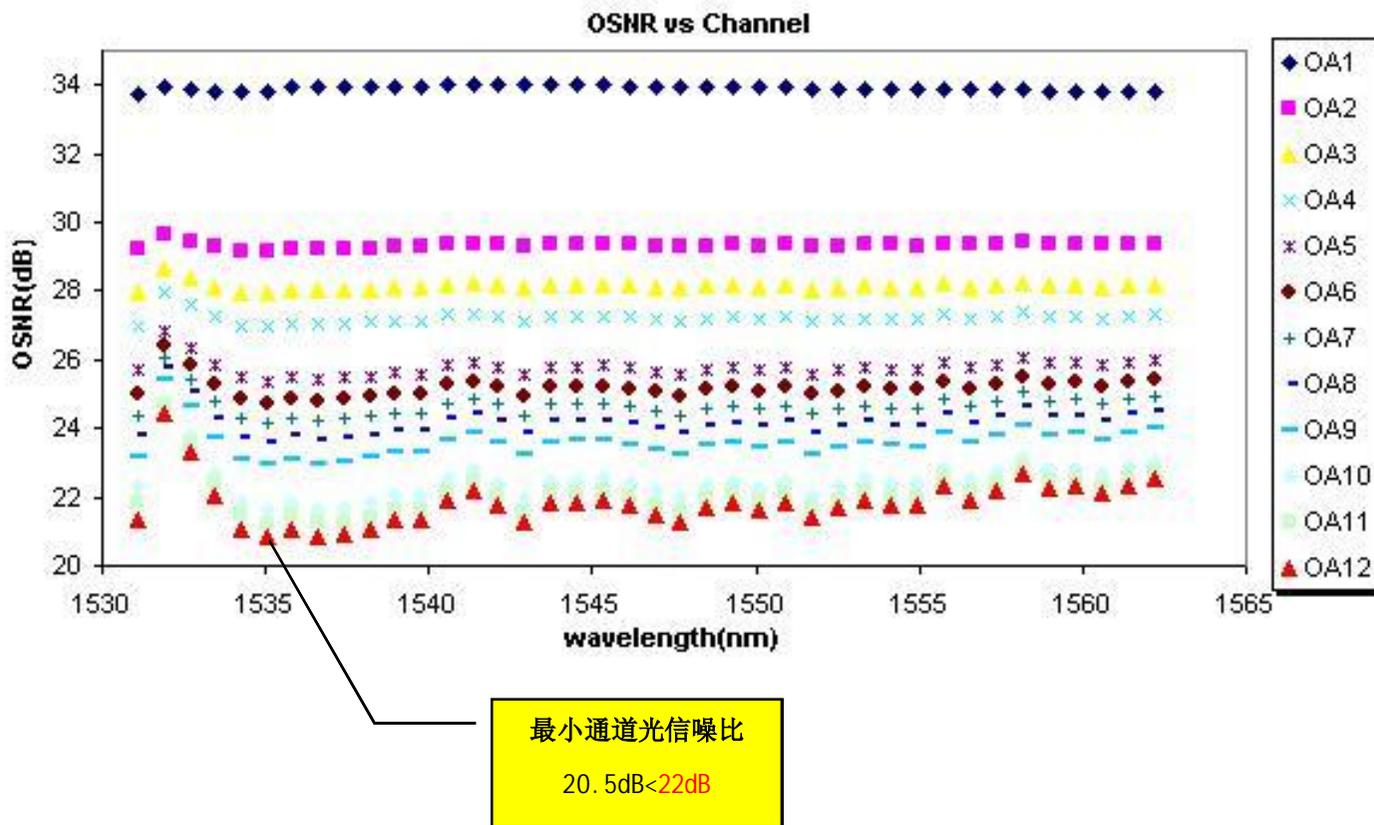
model_800s...
Ready Line 1 3:53 PM
```

波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*

§ 输入路由参数，建立网络模型



§ 每通道光信噪比输出结果

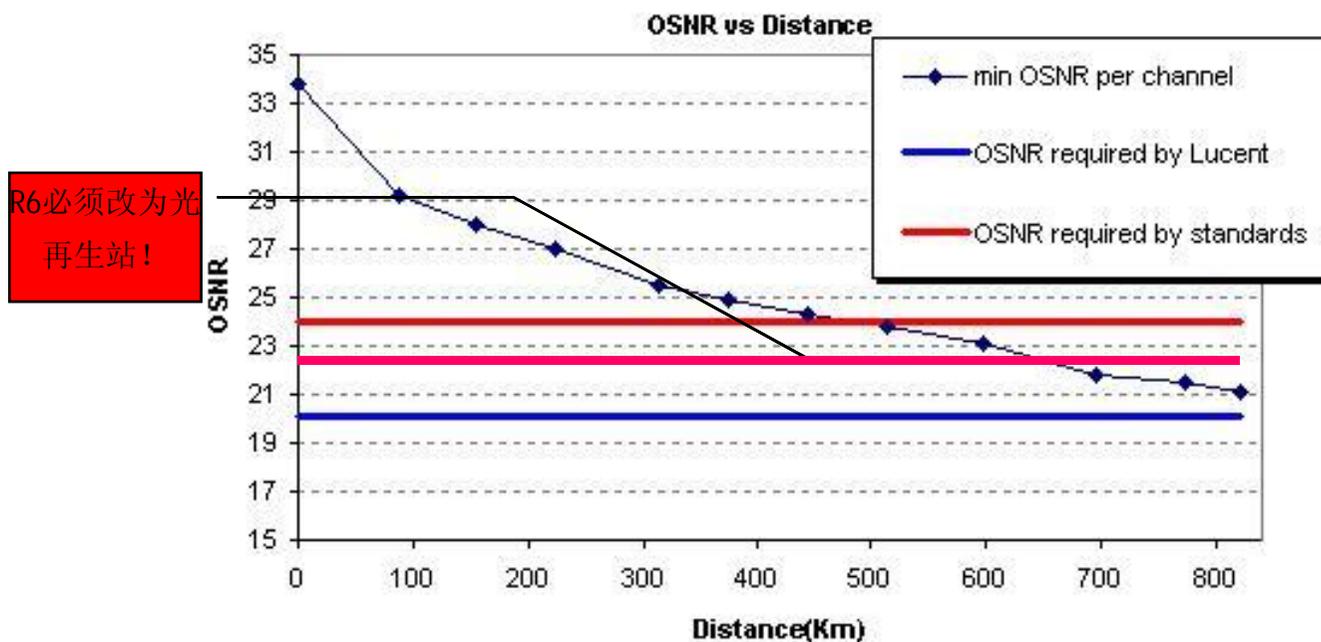


波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*

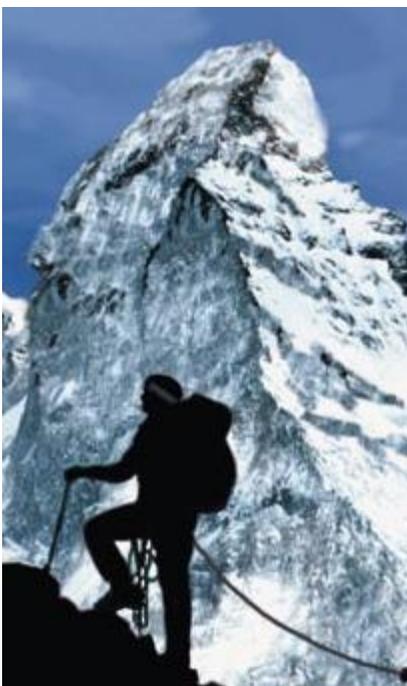
§ 最差通道光信噪比劣化图

§ 国标规定的最低所需光信噪比门限为22dB——**红线所示**

—445公里处的R6必须改为**光再生站**，以弥补光信噪比的不足！



波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*



• 波分复用技术概述

• 波分系统的组成及原理

• 波分系统的传输媒质

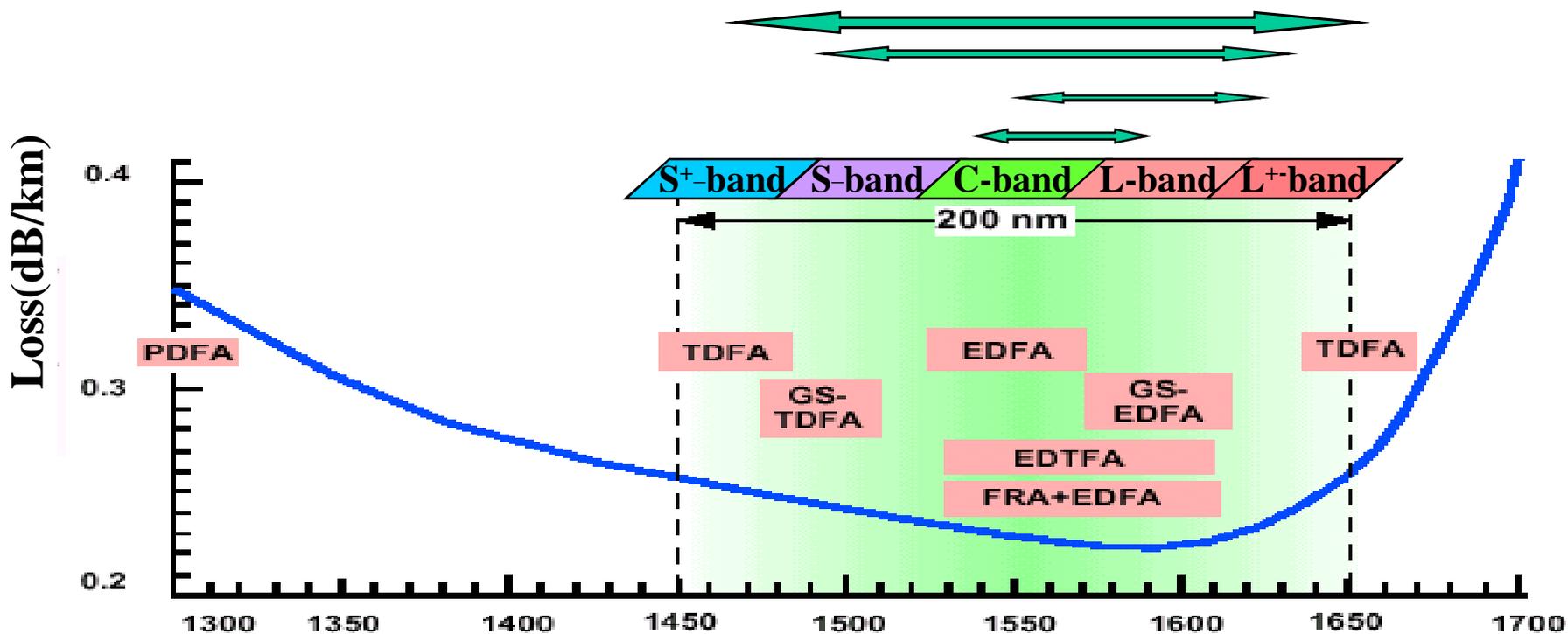
• 波分系统的关键技术

• 波分系统的网络设计原则

• 波分系统的发展方向

更宽的可用带宽

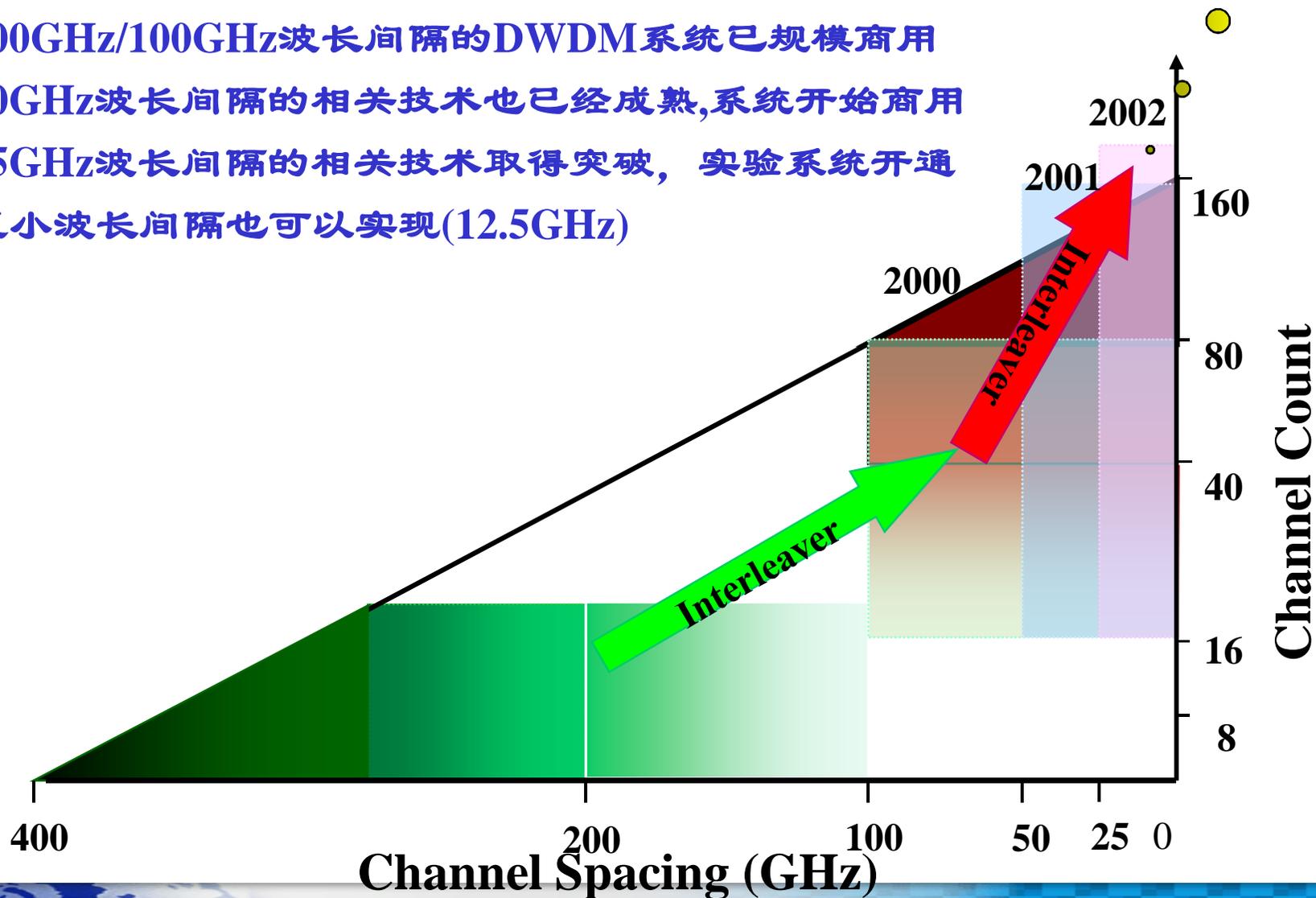
- Ø 光纤的可用带宽已经从C-BAND扩展到L-BAND、S-BAND, 逐步向全带宽方向发展
- Ø 光放大器也向全带宽方向发展, EDFA、PDFA+RAMAN构成未来光放大产品的主流。





减小信道间隔

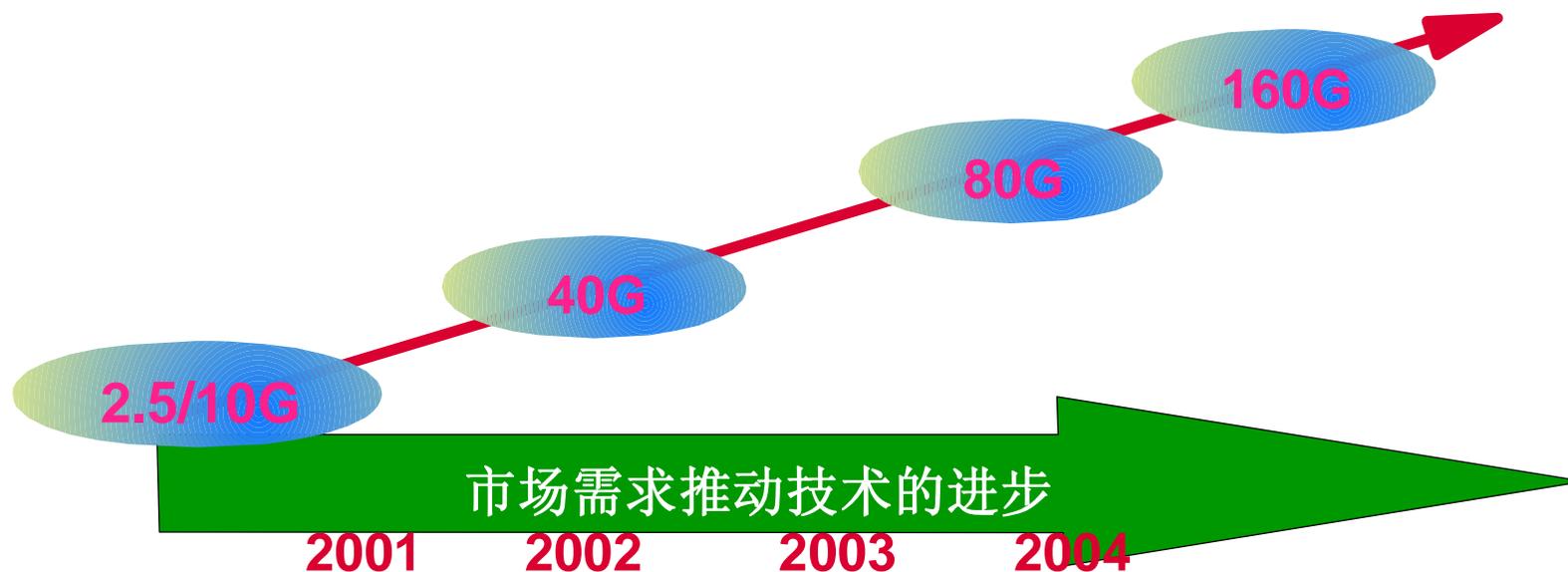
- Ø 200GHz/100GHz波长间隔的DWDM系统已规模商用
- Ø 50GHz波长间隔的相关技术也已经成熟,系统开始商用
- Ø 25GHz波长间隔的相关技术取得突破, 实验系统开通
- Ø 更小波长间隔也可以实现(12.5GHz)





提高单信道传输速率

- Ø 单信道2.5G/10G的DWDM系统已经实现商用。
- Ø 40G速率的DWDM系统正在走出实验室，进行现场实验。
- Ø 基于OTDM的80G/160G正在进行实验室研究。



提高传输距离

Ø 非线性限制的来源

传输容量的增大

ü 功率密度增大

ü ASE噪声增加

传输距离的延长

ü 要求入纤功率提高

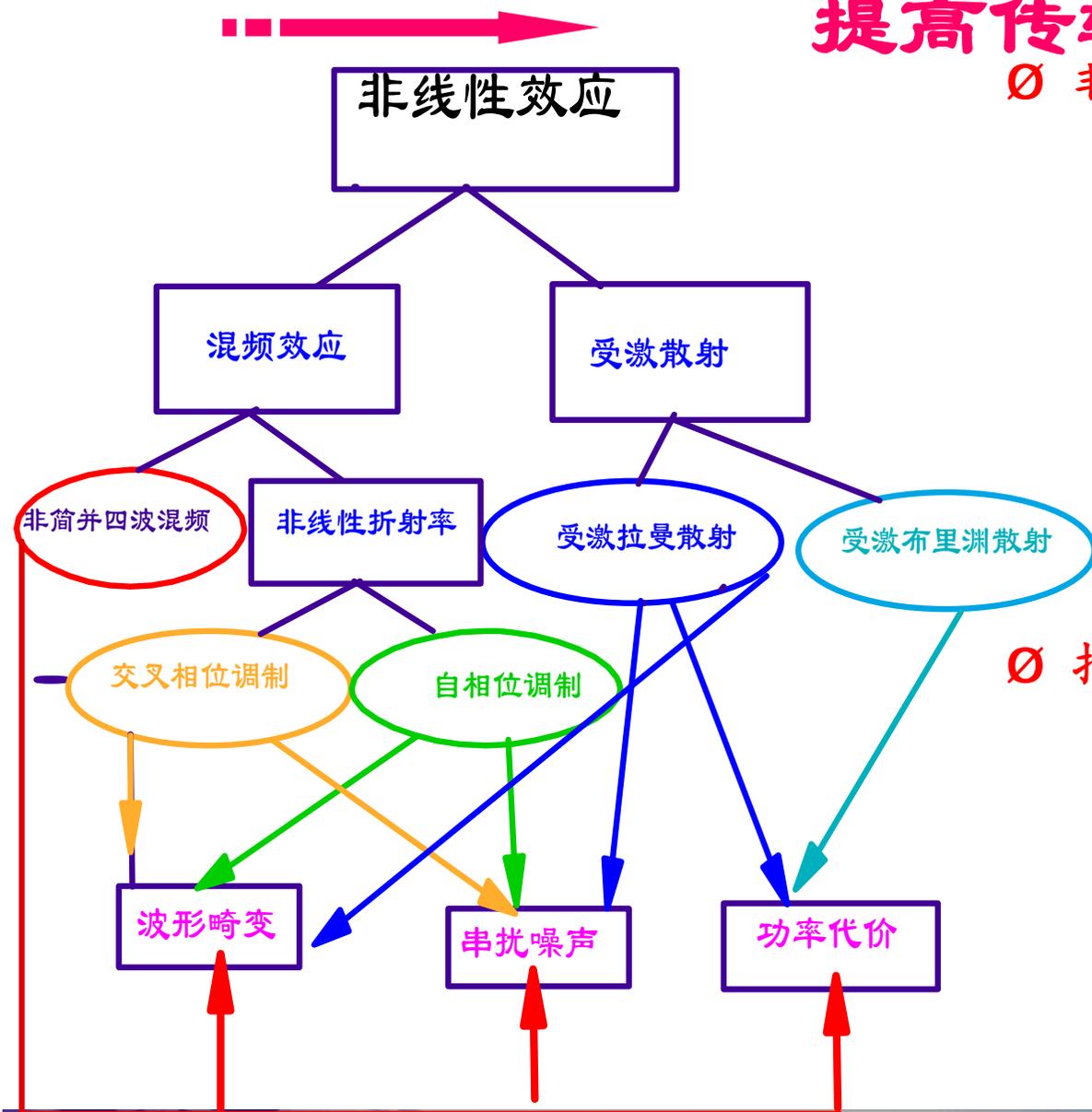
ü 非线性效应累积

Ø 抑制非线性效应的方法

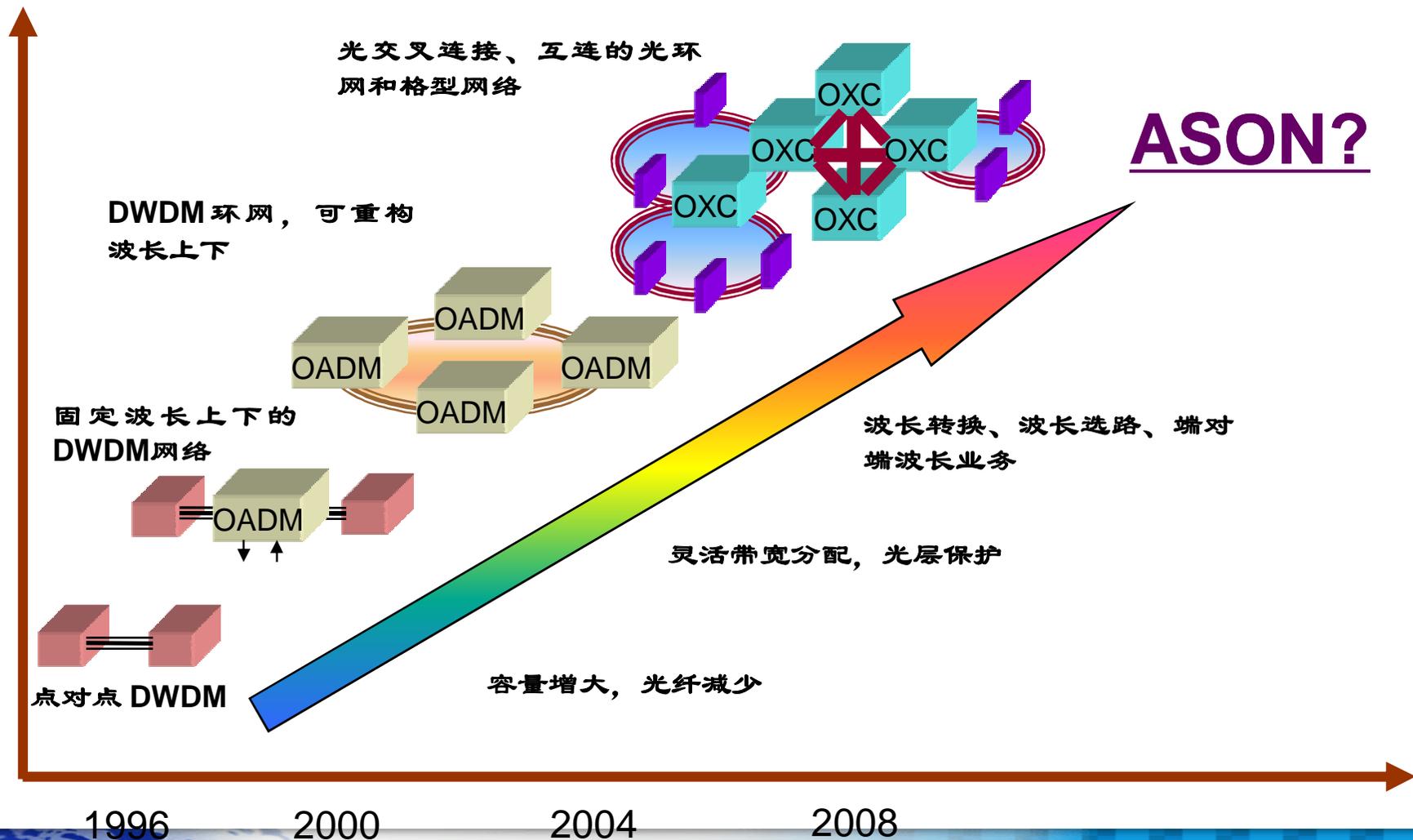
ü RAMAN放大技术降低入纤功率

ü 采用RZ编码技术

ü 非线性波形管理技术



光网络走向



波分复用技术及设计案例 *The Case and technology of Wavelength Division Multiplex*

