

目 录

| | |
|--------------------------|------|
| 第一节 DWDM概述 | 1-1 |
| 1.1 DWDM技术产生背景 | 1-1 |
| 1.2 DWDM原理概述 | 1-2 |
| 1.3 DWDM设备工作方式 | 1-3 |
| 1.3.1 双纤双向传输 | 1-3 |
| 1.3.2 单纤双向传输 | 1-4 |
| 1.3.3 光信号分出和插入 | 1-5 |
| 1.4 DWDM的应用形式 | 1-5 |
| 1.5 DWDM的优越性 | 1-5 |
| 第二节 DWDM传输媒质 | 2-1 |
| 2.1 光纤的结构 | 2-1 |
| 2.2 光纤的种类 | 2-2 |
| 2.3 光纤的基本特性 | 2-3 |
| 2.3.1 几何尺寸（模场直径） | 2-3 |
| 2.3.2 模场同心度误差 | 2-4 |
| 2.3.3 弯曲损耗 | 2-4 |
| 2.3.4 衰减常数 | 2-4 |
| 2.3.5 色散系数 | 2-5 |
| 2.3.6 截止波长 | 2-6 |
| 2.4 光缆的种类及性能 | 2-6 |
| 2.4.1 光缆的种类 | 2-6 |
| 2.4.2 光缆的性能 | 2-6 |
| 第三节 DWDM关键技术 | 3-1 |
| 3.1 光源 | 3-1 |
| 3.1.1 激光器的调制方式 | 3-1 |
| 3.1.2 激光器的波长的稳定与控制 | 3-4 |
| 3.2 掺铒光纤光放大器（EDFA） | 3-5 |
| 3.2.1 EDFA工作原理 | 3-5 |
| 3.2.2 EDFA的应用 | 3-7 |
| 3.2.3 EDFA增益控制 | 3-9 |
| 3.2.4 EDFA的局限性 | 3-13 |
| 3.3 DWDM器件 | 3-14 |
| 3.3.1 光栅型DWDM器件 | 3-15 |

| | |
|-----------------------------------|------------|
| 3.3.2 介质薄膜型DWDM器 | 3-16 |
| 3.3.3 熔锥型DWDM器 | 3-17 |
| 3.3.4 集成光波导型DWDM器 | 3-17 |
| 3.3.5 DWDM器件性能 | 3-18 |
| 第四节 DWDM组网设计 | 4-1 |
| 4.1 DWDM的几种网络单元类型 | 4-1 |
| 4.1.1 光终端单元 (OTM) | 4-1 |
| 4.1.2 光放大单元 (OLA) | 4-2 |
| 4.1.3 光分插复用单元 (OADM) | 4-3 |
| 4.1.4 电中继单元 (REG) | 4-4 |
| 4.2 DWDM网络的一般组成 | 4-5 |
| 4.2.1 点到点组网 | 4-5 |
| 4.2.2 链形组网 | 4-6 |
| 4.2.3 环形组网 | 4-6 |
| 4.2.4 网络管理信息通道备份和互联能力 | 4-7 |
| 4.3 DWDM组网考虑的要素 | 4-9 |
| 4.3.1 色散受限距离 | 4-9 |
| 4.3.2 功率 | 4-10 |
| 4.3.3 光信噪比 | 4-11 |
| 4.3.4 其它因素 | 4-14 |
| 4.4 DWDM网络的保护 | 4-23 |
| 4.4.1 基于单个波长的保护 | 4-23 |
| 4.4.2 光复用段 (OMSP) 保护 | 4-25 |
| 4.4.3 环网的应用 | 4-26 |
| 4.5 实例分析 | 4-27 |
| 4.5.1 组网图 (实际网络站点) | 4-27 |
| 4.5.2 组网图 (考虑光源的色散受限距离, 划分网络的再生段) | 4-27 |
| 4.5.3 组网图 (考虑光放大器功率, 划分网络的光中继段) | 4-28 |
| 4.5.4 组网图 (考虑OSNR) | 4-29 |

第一节 DWDM概述

目标：

掌握DWDM的概念。

了解DWDM的产生背景、技术特点。

1.1 DWDM技术产生背景

随着话音业务的飞速增长和各种新业务的不断涌现，特别是IP技术的日新月异，网络容量必将会受到严重的挑战。传统的传输网络扩容方法采用空分复用（SDM）或时分复用（TDM）两种方式。

1. 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。

2. 时分复用TDM（Time Division Multiplexer）

时分复用也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。

但时分复用的扩容方式有两个缺陷：第一是影响业务，即在“全盘”升级至

更高的速率等级时，网络接口及其设备需要完全更换，所以在升级的过程中，不得不中断正在运行的设备；第二是速率的升级缺乏灵活性，以SDH设备为例，当一个线路速率为155Mbit/s的系统被要求提供两个155Mbit/s的通道时，就只有将系统升级到622Mbit/s，即使有两个155Mbit/s将被闲置，也没有办法。

对于更高速率的时分复用设备，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。

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，会由于器件和线路等各方面特性的限制而不得不寻找另外的解决办法。

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。

DWDM技术就是在这样的背景下应运而生的，它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。

1.2 DWDM原理概述

DWDM技术是利用单模光纤的带宽以及低损耗的特性，采用多个波长作为载波，允许各载波信道在光纤内同时传输。

与通用的单信道系统相比，密集WDM（DWDM）不仅极大地提高了网络系统的通信容量，充分利用了光纤的带宽，而且它具有扩容简单和性能可靠等诸多优点，特别是它可以直接接入多种业务更使得它的应用前景十分光明。

在模拟载波通信系统中，为了充分利用电缆的带宽资源，提高系统的传输容量，通常利用频分复用的方法。即在同一根电缆中同时传输若干个信道的信号，接收端根据各载波频率的不同利用带通滤波器滤出每一个信道的信号。

同样，在光纤通信系统中也可以采用光的频分复用的方法来提高系统的传输容量。事实上，这样的复用方法在光纤通信系统中是非常有效的。与模拟的载波通信系统中的频分复用不同的是，在光纤通信系统中是用光波作为信号的载波，根据每一个信道光波的频率（或波长）不同将光纤的低损耗窗口划分成若干个信道，从而在一根光纤中实现多路光信号的复用传输。

由于目前一些光器件（如带宽很窄的滤光器、相干光源等）还不很成熟，因此，要实现光信道非常密集的光频分复用（相干光通信技术）是很困难的，但基于目前的器件水平，已可以实现相隔光信道的频分复用。人们通常把光信道间隔较大（甚至在光纤不同窗口上）的复用称为光波分复用（WDM），再把在同一窗口中信道间隔较小的DWDM称为密集波分复用（DWDM）。

随着科技的进步，现代的技术已经能够实现波长间隔为纳米级的复用，甚至可以实现波长间隔为零点几个纳米级的复用，只是在器件的技术要求上更加严格而已，因此把波长间隔较小的8个波、16个波、32乃至更多个波长的复用称为DWDM。

DWDM系统的构成及光谱示意图如图1-1所示。发送端的光发射机发出波长不同而精度和稳定度满足一定要求的光信号，经过光波长复用器复用在一起送入掺铒光纤功率放大器（掺铒光纤放大器主要用来弥补合波器引起的功率损失和提高光信号的发送功率），再将放大后的多路光信号送入光纤传输，中间可以根据情况有或没有光线路放大器，到达接收端经光前置放大器（主要用于提高接收灵敏度，以便延长传输距离）放大以后，送入光波长分波器分解出原来的各路光信号。

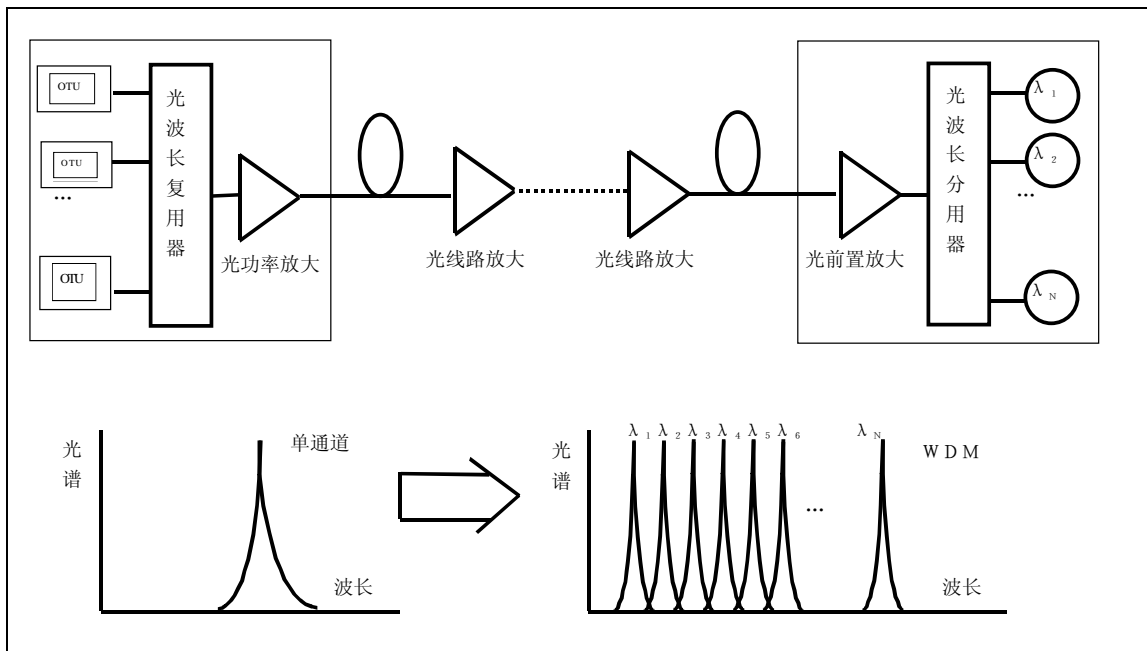


图1-1 DWDM系统的构成及频谱示意图

1.3 DWDM设备工作方式

1.3.1 双纤双向传输

如图1-2所示，一根光纤只完成一个方向光信号的传输，反向光信号的传输由另一根光纤来完成。因此，同一波长在两个方向上可以重复利用。

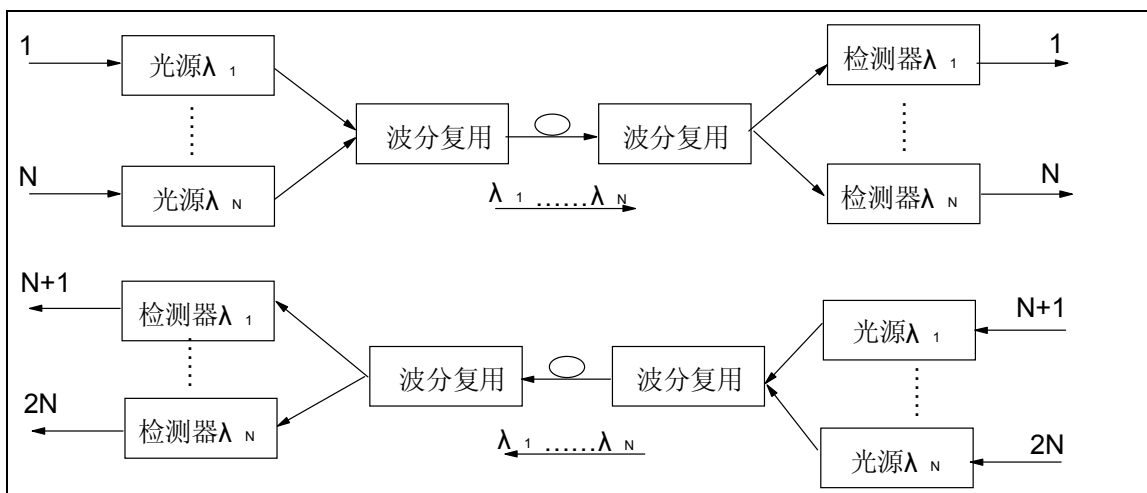


图1-2 双纤双向传输的DWDM系统

这种DWDM系统可以充分利用光纤的巨大带宽资源，使一根光纤的传输容量扩大几倍至几十倍。在长途网中，可以根据实际业务量的需要逐步增加波长来实现扩容，十分灵活。在不清楚实际光缆色散的前提下，也是一种暂时避免采用超高速光系统而利用多个2.5Gbit/s系统实现超大量传输的手段。

1.3.2 单纤双向传输

如图1-3所示，在一根光纤中实现两个方向光信号的同时传输，两个方向光信号应安排在不同波长上。

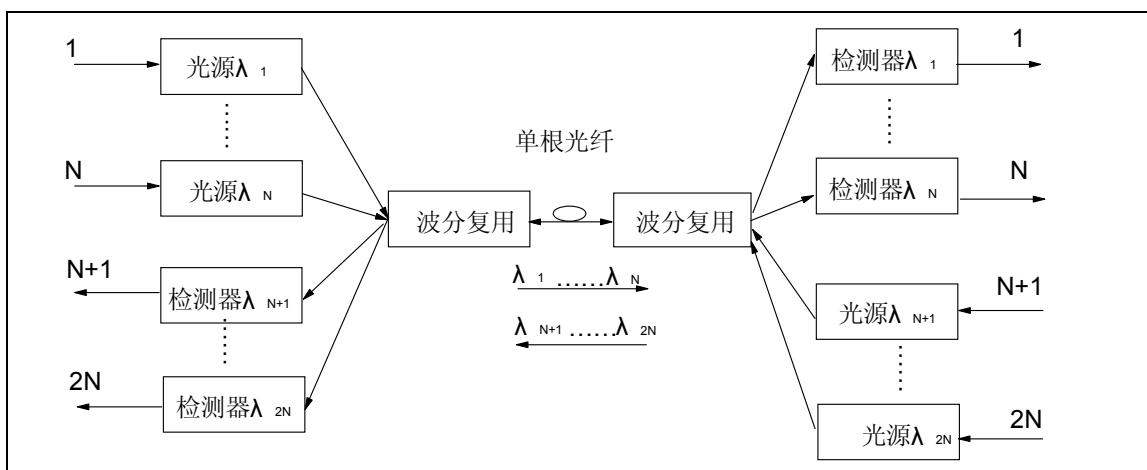


图1-3 单纤双向传输的DWDM系统

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行器等元件，但其噪声系数稍差。

1.3.3 光信号分出和插入

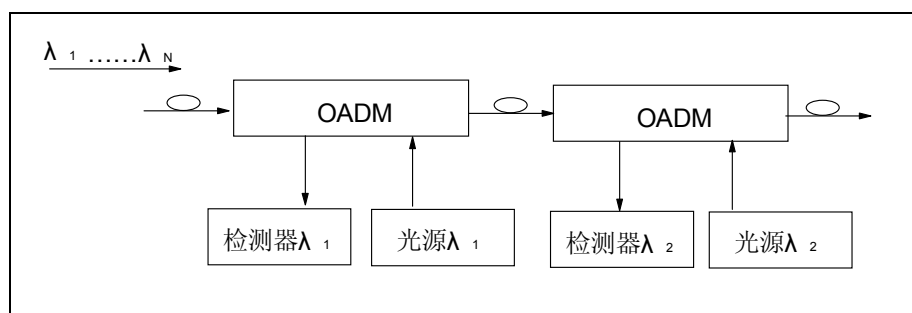


图1-4 光分出和插入传输

通过光分插复用器（OADM）可以实现各波长的光信号在中间站的分出与插入，即完成上/下光路，利用这种方式可以完成DWDM系统的环形组网。目前OADM只能做成固定波长上/下的器件（如图1-4所示），从而使该种工作方式的灵活性受到了限制。

1.4 DWDM的应用形式

DWDM通常有两种应用形式：

- 开放式DWDM
- 集成式DWDM

开放式DWDM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。DWDM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。

集成式DWDM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DWDM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DWDM和集成式DWDM可以混合使用。

1.5 DWDM的优越性

光纤的容量是极其巨大的，而传统的光纤通信系统都是在一根光纤中传输一路光信号，这样的方法实际上只使用了光纤丰富带宽的很少一部分。为了充分利用光纤的巨大带宽资源，增加光纤的传输容量，以密集WDM（DWDM）技术为核心的新一代的光纤通信技术已经产生。

DWDM技术具有如下特点：

1. 超大容量

目前使用的普通光纤可传输的带宽是很宽的，但其利用率还很低。使用DWDM技术可以使一根光纤的传输容量比单波长传输容量增加几倍、几十倍乃至几百倍。最近日本NEC公司已经在实验室实现了 $132 \times 20\text{Gbit/s}$ 的DWDM系统，传输距离120km。该系统总带宽为35nm（从1529nm~1564nm），信道间隔33GHz，可以传4000万路电话。

2. 对数据率“透明”

由于DWDM系统按光波长的不同进行复用和解复用，而与信号的速率和电调制方式无关，即对数据是“透明”的。因此可以传输特性完全不同的信号，完成各种电信号的综合和分离，包括数字信号和模拟信号，以及PDH信号和SDH信号的综合和分离。

3. 系统升级时能最大限度地保护已有投资

在网络扩充和发展中，无需对光缆线路进行改造，只需更换光发射机和光接收机即可实现，是理想的扩容手段，也是引入宽带业务（例如CATV、HDTV和B-ISDN等）的方便手段，而且利用增加一个附加波长即可引入任意想要的新业务或新容量。

4. 高度的组网灵活性、经济性和可靠性

利用DWDM技术构成的新型通信网络比用传统的时分复用技术组成的网络结构要大大简化，而且网络层次分明，各种业务的调度只需调整相应光信号的波长即可实现。由于网络结构简化、层次分明以及业务调度方便，由此而带来的网络的灵活性、经济性和可靠性是显而易见的。

5. 可兼容全光交换

可以预见，在未来可望实现的全光网络中，各种电信业务的上/下、交叉连接等都是在光上通过对光信号波长的改变和调整来实现的。因此，DWDM技术将是实现全光网的关键技术之一，而且DWDM系统能与未来的全光网兼容，

将来可能会在已经建成的DWDM系统的基础上实现透明的、具有高度生存性的全光网络。

第二节 DWDM传输媒质

目标：

掌握光纤的基本结构和种类。

了解光纤的基本特性。

2.1 光纤的结构

通信中使用的光纤，其核心部分是由圆柱形玻璃纤芯和玻璃包层构成，最外层是一种弹性耐磨的塑料护套，整根光纤呈圆柱形。光纤的典型结构如图2-1所示。

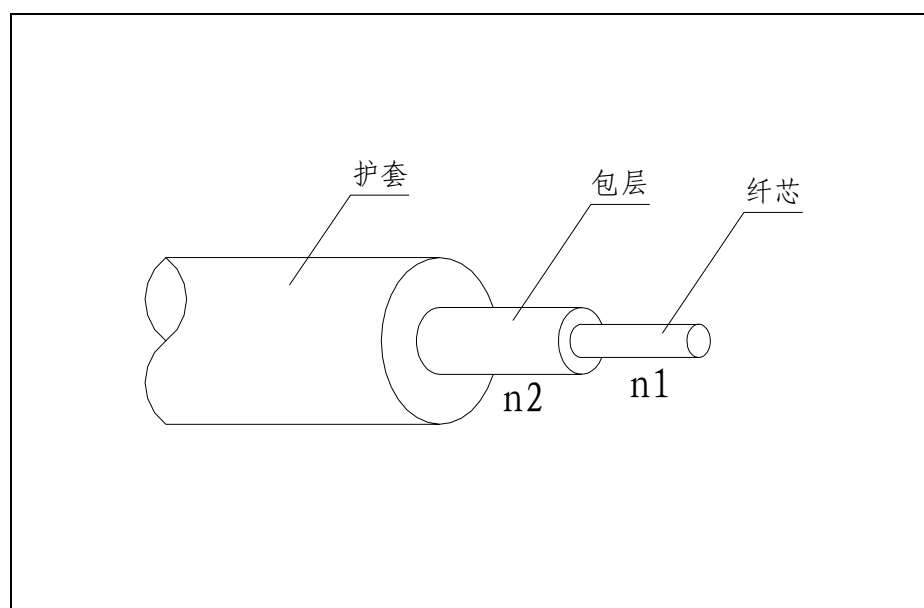


图2-1 光纤的典型结构

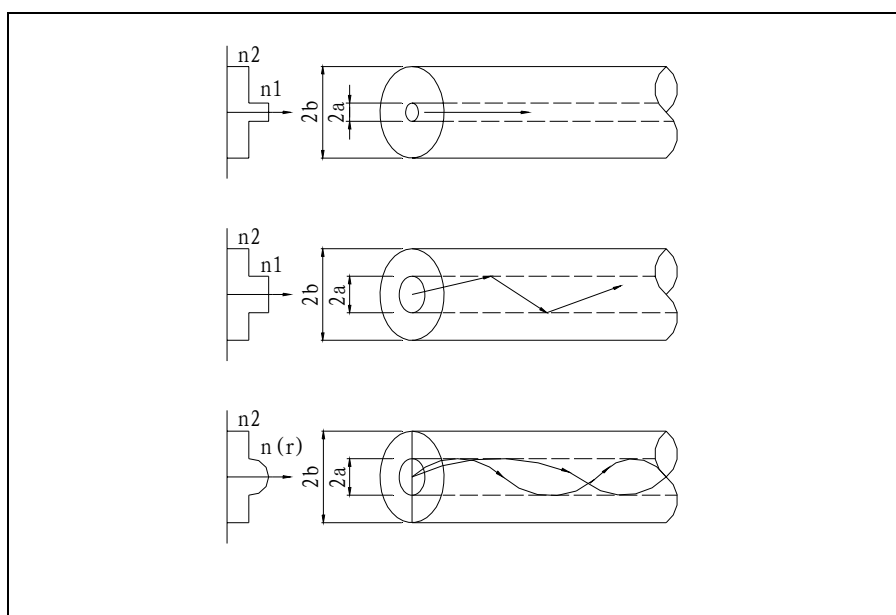


图2-2 三种典型光纤

纤芯的粗细、材料和包层材料的折射率，对光纤的特性起着决定性的影响。图2-2所示为三种典型光纤的情况。从图中可看出，纤芯和包层横截面上，折射率剖面有两种典型的分布。一种是纤芯和包层折射率沿光纤径向分布都是均匀的，而在纤芯和包层的交界面上，折射率呈阶梯形突变，这种光纤称为阶跃折射率光纤。另一种是，纤芯的折射率不是均匀常数，而是随纤芯径向坐标增加而逐渐减少，一直渐变到等于包层折射率值，因而将这种光纤称为渐变折射率光纤。这两种光纤剖面的共同特点是：纤芯的折射率 n_1 大于包层折射率 n_2 ，这也是光信号在光纤中传输的必要条件。对阶跃折射率光纤而言，它可以使光波在纤芯和包层的交界面形成全反射，引导光波沿纤芯向前传播；对于渐变折射率光纤而言，它可以使光波在纤芯中产生连续折射，形成穿过光纤轴线的类似于正弦波的光射线，引导光波沿纤芯向前传播，两种光射线轨迹如图2-2所示。阶跃折射率光纤和渐变折射率光纤，随着纤芯直径的粗细不同，光纤中传输模式的数量多少也不同。因此，阶跃折射率光纤或渐变折射率光纤又都可以按照传输模式的数量多少，分为单模光纤和多模光纤，这又是一种光纤的分类方法。单模光纤的纤芯直径极细，直径一般小于 $10\mu\text{m}$ ；多模光纤的纤芯直径较粗，通常直径等于 $50\mu\text{m}$ 左右。但从光纤的外观上来看，两种光纤区别不大，包括塑料护套的光纤直径都小于 1mm 。

2.2 光纤的种类

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。

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μm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。

? 想一想:

在我国，大面积敷设的是哪一种光纤?

2.3 光纤的基本特性

2.3.1 几何尺寸（模场直径）

单模光纤的纤径直径为8~9μm，与工作波长1.3~1.6μm处于同一量级，由于光衍射效应，不易测出纤芯直径的精确值。此外，由于基模LP₀₁场强的分布不只局限于纤芯之内，因而单模光纤纤芯直径的概念在物理上已没有什么意义，应改用模场直径的概念。模场直径是光纤内基模场强空间强度分布集中程度的度量。

G.652光纤在1310nm波长区的模场直径标称值应在8.6~9.5μm范围，偏差小于10%；G.655光纤在1550nm波长区的模场直径标称值应在8~11μm范围，偏差

小于10%。

上述两种单模光纤的包层径均为125 μm 。

2.3.2 模场同心度误差

模场同心度误差指互相连接的光纤模场中心与包层之间的距离。光纤的接头损耗大致与模场同心度误差的平方成正比，因此减少模场同心度误差是减低光纤连接损耗的关键因素之一，在工艺上应严格控制。G.652和G.655两种单模光纤的模场同心度误差均不应大于1，一般应小于0.5。

2.3.3 弯曲损耗

光纤的弯曲会引起辐射损耗。实际中，光纤可能出现两种情况的弯曲：一种是曲率半径比光纤直径大得多的弯曲。（例如，在敷设光缆时可能出现这种弯曲）；一种是微弯曲，产生微弯曲的原因很多，光纤和光缆的生产过程中，限于工艺条件，都可能产生微弯曲。不同曲率半径的微弯曲沿光纤随机分布。大曲率半径的弯曲光纤比直光纤中传输的模式数量要少，有一部分模式辐射到光纤外引起损耗；随机分布的光纤微弯曲，将使光纤中产生模式耦合，造成能量辐射损耗。光纤的弯曲损耗不可避免，因为不能保证光纤和光缆在生产过程中或是在使用过程中，不产生任何形式的弯曲。

弯曲损耗与模场直径有关。G.652光纤在1550nm波长区的弯曲损耗应不大于1dB，G.655光纤在1550nm波长区的弯曲损耗应不大于0.5dB。

2.3.4 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，弯曲损耗前面已经讲过，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。

2.3.5 色散系数

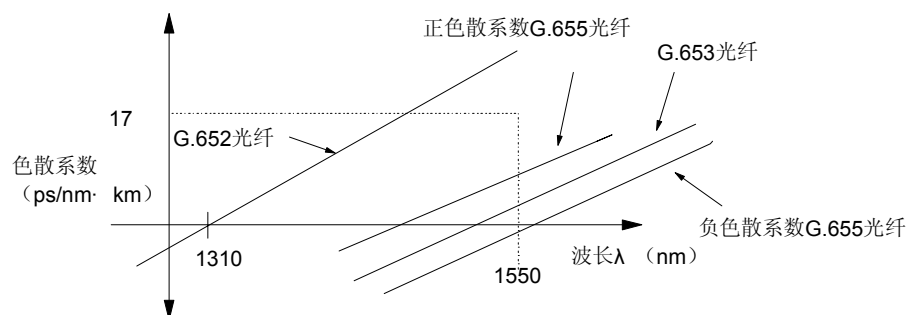
光纤的色散指光纤中携带信号能量的各种模式成分或信号自身的不同频率成分因群速度不同，在传播过程中互相散开，从而引起信号失真的物理现象。一般光纤存在三种色散：

- 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 $0.093\text{ps}/(\text{nm}^2\cdot\text{km})$ ，在1525~1575nm波长范围内的色散系数约为 $20\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。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 $0.085\text{ps}/(\text{nm}^2\cdot\text{km})$ 。在1525~1575nm波长范围内的最大色散系数为 $3.5\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。G.655光纤在1530~1565nm范围内的色散系数在绝对值应处于 $0.1\sim 6.0\text{ps}/(\text{nm}^2\cdot\text{km})$ 。

📖 技术细节:

几种光纤色散特性如下图:



2.3.6 截止波长

为避免模式噪声和色散代价，系统光缆中的最短光缆长度的截止波长应该小于系统的最低工作波长，截止波长条件可以保证在最短光缆长度上单模传输，并且可以抑制高阶模的产生或可以将产生的高阶模式噪声功率代价减小到完全可以忽略的地步。目前ITU-T定义了三种截止波长：

- 1) 短于2m长跳线光缆中的一次涂覆光纤的截止波长。
- 2) 22m长成缆光纤的截止波长。
- 3) 2~20m长跳线光缆的截止波长。

G.652光纤在22米长光缆上的截止波长 $\leq 1260\text{nm}$ ，在2~20米长的跳线光缆截止波长 $\leq 1260\text{nm}$ ，在短于2米长跳线光缆上的光纤的截止波长 $\leq 1250\text{nm}$ 。

G.655光纤在22米长光缆上的截止波长 $\leq 1480\text{nm}$ ，在短于2米长光缆上的一次涂敷光纤上的截止波长小于等于 1470nm ，2~20米长跳线光缆上的截止波长 $\leq 1480\text{nm}$ 。

2.4 光缆的种类及性能

2.4.1 光缆的种类

光缆以结构形式分，有松套层绞式、骨架式、中心束额定式和带状光缆等四种。

以敷设方式分，光缆有直埋、管道、架空、水底和局用光缆等。

依照应用场合，业务量需要和扩容需要，光缆芯数系列分为4、6、8、10、12、14、16、18、20、22、24、26、28、30、32、34、36芯，并可按需要依偶数递增。

2.4.2 光缆的性能

1. 机械性能：光缆的机械性能应能经受拉伸、压扁、冲击、反复弯曲、扭转、曲挠、钩挂、弯折、卷绕等项，并符合国家标准GB.7425对光缆机械性能试验的要求。

2. 防护性能：光缆应具备防潮、防水性能。此外，还应根据使用条件及安装环境的需要具备防白蚁、鼠、昆虫咬，以及防腐蚀、防雷等项，并符合国家标准GB.8405对光缆环境性能试验的防护性能要求。

第三节 DWDM关键技术

目标：

了解DWDM光源的要求及解决方法。

了解DWDM光放大技术。

了解DWDM复用和解复用技术。

3.1 光源

光源的作用是产生激光，它是组成DWDM系统的重要器件。目前应用于DWDM系统的光源是半导体激光器LD（Laser diode）。

DWDM系统的工作波长较为密集，一般波长间隔为几个纳米到零点几个纳米，这就要求激光器工作在一个标准波长上，并且具有很好的稳定性；另一方面，DWDM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DWDM系统的光源要使用技术更为先进、性能更为优越的激光器。

总之，DWDM系统的光源的两个突出的特点是：

1. 比较大的色散容纳值；
2. 标准而稳定的波长。

3.1.1 激光器的调制方式

目前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。

1. 直接调制

直接调制：又称为内调制，即直接对光源进行调制，通过控制半导体激光器

的注入电流的大小来改变激光器输出光波的强弱。传统的PDH和2.5Gbit/s速率以下的SDH系统使用的LED或LD光源基本上采用的都是这种调掉方式。

直接调制方式的特点是输出功率正比于调制电流，具有结构简单、损耗小、成本低的特点，但由于调制电流的变化将引起激光器发光谐振腔的长度发生变化，引起发射激光的波长随着调制电流线性变化，这种变化被称作调制啁啾，它实际上是一种直接调制光源无法克服的波长（频率）抖动。啁啾的存在展宽了激光器发射光谱的带宽，使光源的光谱特性变坏，限制了系统的传输速率和距离。一般情况下，在常规G.652光纤上使用时，传输距离 ≤ 100 公里，传输速率 ≤ 2.5 Gbit/s。

对于不采用光线路放大器的DWDM系统，从节省成本的角度出发，可以考虑使用直接调制激光器。

2. 间接调制

间接调制：这种调制方式又称做外调制。即不直接调制光源，而是在光源的输出通路上外加调制器对光波进行调制，此调制器实际上起到一个开关的作用。结构如图3-1所示。

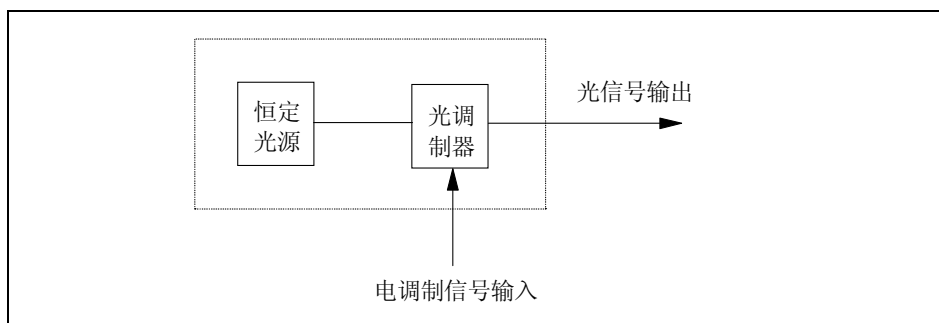


图3-1 外调制激光器的结构

恒定光源是一个连续发送固定波长和功率的高稳定光源，在发光的过程中，不受电调制信号的影响，因此不产生调制频率啁啾，光谱的谱线宽度维持在最小。光调制器对恒定光源发出的高稳定激光根据电调制信号以“允许”或者“禁止”通过的方式进行处理，而在调制的过程中，对光波的频谱特性不会产生任何影响，保证了光谱的质量。

间接调制方式的激光器比较复杂、损耗大、而且造价也高，但调制频率啁啾很小，可以应用于传输速率 ≥ 2.5 Gbit/s，传输距离超过300公里以上的系统。因此，一般来说，在使用光线路放大器的DWDM系统中，发射部分的激光器均为间接调制方式的激光器。

常用的外调制器有光电调制器、声光调制器和波导调制器等。

光电调制器基本工作原理是晶体的线性光电效应。光电效应是指电场引起晶

体折射率变化的现象，能够产生光电效应的晶体称为光电晶体。

声光调制器是利用介质的声光效应制成。所谓声光效应，是声波在介质中传播时，介质受声波压强的作用而产生变化，这种变化使得介质的折射率发生变化，从而影响光波传输特性。

波导调制器是将钛（Ti）扩散到铌酸锂（ LiNbO_2 ）基底材料上，用光刻法制出波导的具体尺寸。它具有体积小、重量轻、有利于光集成等优点。

根据光源与外调制器的集成和分离情况，又可以分为集成式外调制激光器和分离式外调制激光器两种方式。

集成外调制技术日益成熟，是DWDM光源的发展方向。常见的是更加紧凑小巧，与光源集成在一起，性能上也满足绝大多数应用要求的电吸收调制器。

电吸收调制器是一种损耗调制器，它工作在调制器材料吸收区边界波长处，当调制器无偏压时，光源发送波长在调制器材料的吸收范围之外，该波长的输出功率最大，调制器为导通状态；当调制器有偏压时，调制器材料的吸收区边界波长移动，光源发送波长在调制器材料的吸收范围内，输出功率最小，调制器为断开状态。如图3-2所示。

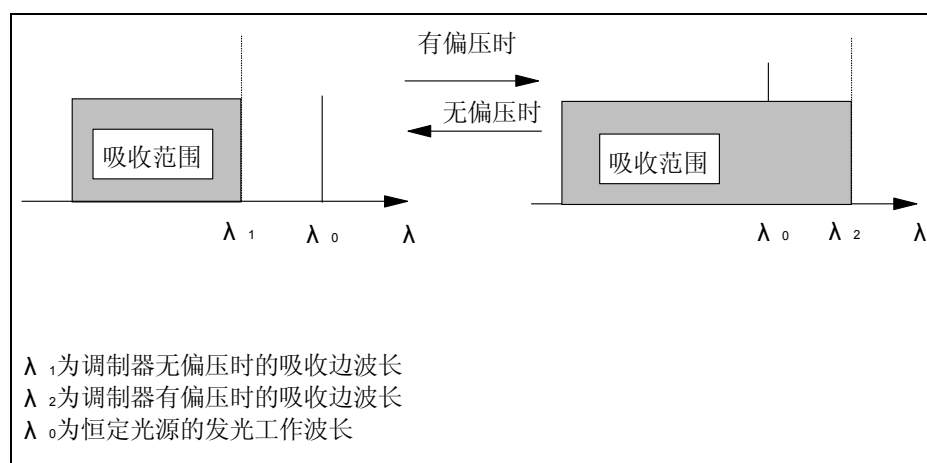


图3-2 电吸收调制器的吸收波长的改变示意图

电吸收调制器可以利用与半导体激光器相同的工艺过程制造，因此光源和调制器容易集成在一起，适合批量生产，因此发展速度很快。例如，铟镓砷磷（ InGaAsP ）光电集成电路，是将激光器和电吸收调制器集成在一块芯片上，该芯片再置于一热电制冷器（TEC）上。这种典型的光电集成电路，称为电吸收调制激光器（EML），可以支持2.5Gbit/s信号传输600km以上的距离，远远超过直接调制激光器所能传输的距离，其可靠性也与标准OFB激光器类似，平均寿命达140年。

分离式外调制激光器常用的是恒定光输出激光器（ $\text{CW}+\text{LiNbO}_3$ ）马赫-策恩德（Mach-Zehnder）外调制器。该调制器是将输入光分成两路相等的信号，

分别进入调制器的两个上光支路，这两个光支路采用的材料是电光材料，即其折射率会随着外部施加的电信号大小而变化，由于光支路的折射率变化将导致信号相位的变化，故两个支路的信号在调制器的输出端再次结合时，合成的光信号是一个强度大小变化的干涉信号，通过这种办法，将电信号的信息转换到了光信号上，实现了光强度调制。分离式外调制激光器的频率啁啾可以等于零，而且相对于电吸收集成式外调制光器，成本较低。

3.1.2 激光器的波长的稳定与控制

在DWDM系统中，激光器波长的稳定是一个十分关键的问题，根据ITU-T G.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（正负五分之一），即当光信道间隔为0.8nm的系统，中心波长的偏差不能大于±20GHz。

在DWDM系统中，由于各个光通路的间隔很小（可低至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。

集成式电吸收调制激光器的波长微调主要是靠改变温度来实现的，其波长的温度灵敏度为0.08nm/°C，正常工作温度为25°C，在15°C-35°C温度范围内调节芯片的温度，即可使EML调定在一个指定的波长上，调节范围为1.6nm。芯片温度的调节靠改变制冷器的驱动电流，再用热敏电阻作反馈便可使芯片温度稳定在一个基本恒定的温度上。

分布反馈式激光器（DFB）的波长稳定是利用波长和管芯温度对应的特性，通过控制激光器管芯处的温度来控制波长，以达到稳定波长的目的。对于1.5 μm DFB激光器，波长温度系数约为0.02nm/°C，它在15°C-35°C范围内中心波长符合要求。这种温度反馈控制的方法完全取决于DFB激光器的管芯温度。目前，MWQ-DFB激光器工艺可以在激光器的寿命时间（20年）内保证波长的偏移满足DWDM系统的要求。

除了温度外，激光器的驱动电流也能影响波长，其灵敏度为0.008nm/mA，比温度的影响约小一个数量级，在有些情况下，其影响可以忽略。此外，封装的温度也可能影响到器件的波长（例如从封装到激光器平台的连线带来的温度传导和从封装壳向内部的辐射，也会影响器件的波长）。在一个设计良好的封装中其影响可以控制在最小。

以上这些方法可以有效解决短期波长的稳定问题，对于激光器老化等原因引起的波长长期变化就显得无能为力了。直接使用波长敏感元件对光源进行波长反馈控制比较理想的，原理如图3-3所示，属于该类控制方案的标准波长控制和参考频率扰动波长控制，均正在研制中，很有前途。

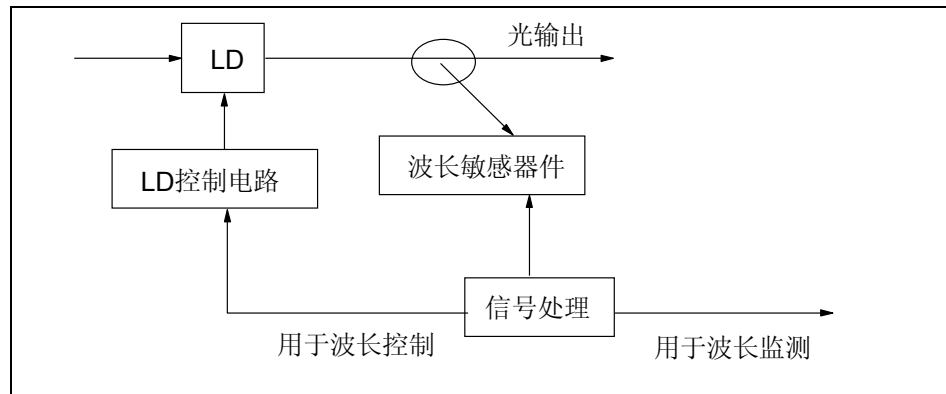


图3-3 波长控制原理

? 想一想:

DWDM系统中为何对波长的稳定性要求非常严格?

3.2 掺铒光纤光放大器 (EDFA)

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DWDM系统中必不可少的关键部件。

3.2.1 EDFA工作原理

为了实现光功率放大的目的, 将一些光无源器件、泵浦源和掺铒光纤以特定的光学结构组合在一起, 就构成了EDFA光放大器。图3-4是一种典型的双泵浦源的掺铒光纤放大器光学结构。

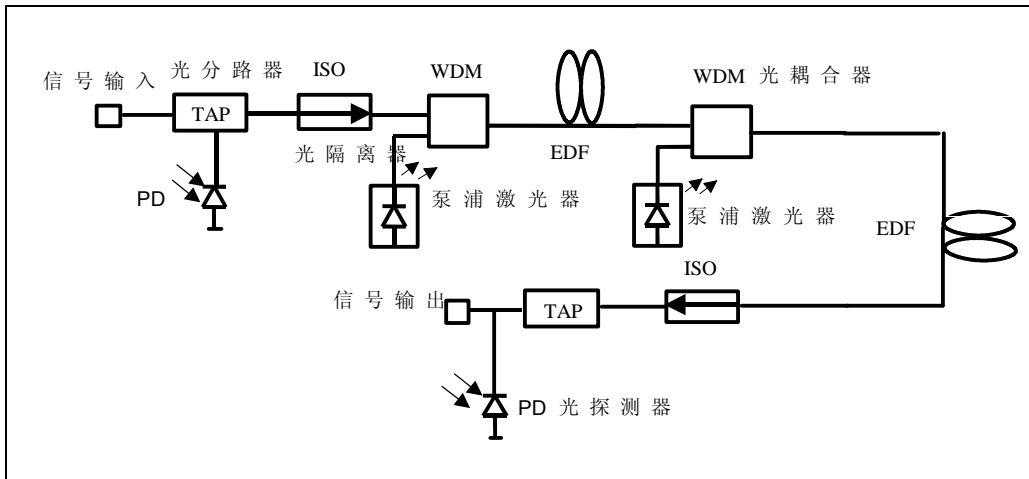


图3-4 EDFA光放大器内部典型光路图

如图3-4所示，信号光和泵浦激光器发出的泵浦光，经过DWDM器合波后进入掺铒光纤EDF，其中两只泵浦激光器构成两级泵浦，EDF在泵浦光的激励下可以产生放大作用，从而也就实现了放大光信号的功能。

1. 掺铒光纤（EDF）

掺铒光纤是光纤放大器的核心，它是一种内部掺有一定浓度 Er^{3+} 的光纤，为了阐明其放大原理，需要从铒离子的能级图讲起。铒离子的外层电子具有三能级结构（图3-5中E1、E2和E3），其中E1是基态能级，E2是亚稳态能级，E3是高能级，如图3-5所示。

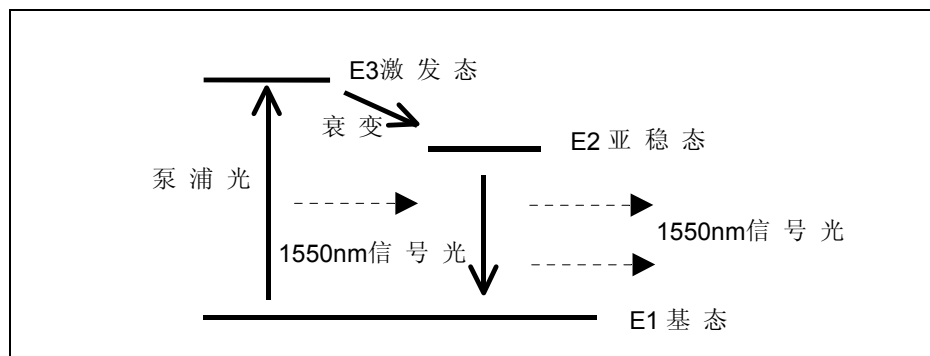


图3-5 EDFA能级图

当用高能量的泵浦激光器来激励掺铒光纤时，可以使铒离子的束缚电子从基态能级大量激发到高能级E3上。然而，高能级是不稳定的，因而铒离子很快会经历无辐射衰减（即不释放光子）落入亚稳态能级E2。而E2能级是一个亚稳态的能带，在该能级上，粒子的存活寿命较长，受到泵浦光激励的粒子，以非辐射跃迁的形式不断地向该能级汇集，从而实现粒子数反转分布。当具

有1550nm波长的光信号通过这段掺铒光纤时，亚稳态的粒子以受激辐射的形式跃迁到基态，并产生出和入射信号光中的光子一模一样的光子，从而大大增加了信号光中的光子数量，即实现了信号光在掺铒光纤传输过程中的不断被放大的功能。

2. 光耦合器（WDM）

光耦合器，顾名思义，就是具有耦合的功能，其作用是将信号光和泵浦光耦合。一起送入掺铒光纤，也称光合波器，通常使用光纤熔锥型合波器。

3. 光隔离器（ISO）

光隔离器（ISO）是一种利用法拉第旋光效应制成的，只能允许光单向传输的器件。光路中两只隔离器的作用分别是：输入光隔离器可以阻挡掺铒光纤中反向ASE对系统发射器件造成干扰，以及避免反向ASE在输入端发生反射后又进入掺铒光纤产生更大的噪声；输出光隔离器则可避免输出的放大光信号在输出端反射后进入掺铒光纤消耗粒子数从而影响掺铒光纤的放大特性。

4. 泵浦激光器（PUMP）

泵浦激光器是EDFA的能量源泉，它的作用是为光信号的放大提供能量。通常是一种半导体激光器，输出波长为980nm或1480nm，泵浦光经过掺铒光纤时，将铒离子从低能级泵浦到高能级，从而形成粒子数反转，而当信号光经过时，能量就会转移到光信号中，从而实现光放大的作用。

5. 光分路器（TAP）

EDFA中所用的光分路器为一分二器件，其作用是将主通道上的光信号分出一小部分光信号送入光探测器以实现主通道中光功率的监测功能。

6. 光探测器（PD）

光探测器是一种光强度检测器，它的作用是将接收的光功率通过光/电转换变成光电流，从而对EDFA模块的输入、输出光功率进行监测。

3.2.2 EDFA的应用

根据EDFA在DWDM光传输网络中的位置，可以分为功率放大器（Booster Amplifier），简称BA；线路放大器（Line Amplifier），简称LA；前置放大器（preamplifier），简称PA。

1. 功率放大器（BA）

功率放大器被放置于终端复用设备或中继设备的发射光源之后的位置，如图3-6所示。功率放大器的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，故有的资料上称为功

率助推放大器。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。功率放大器通常工作在增益或输入功率饱和区，以便提高泵浦源功率转化为光信号功率的效率。

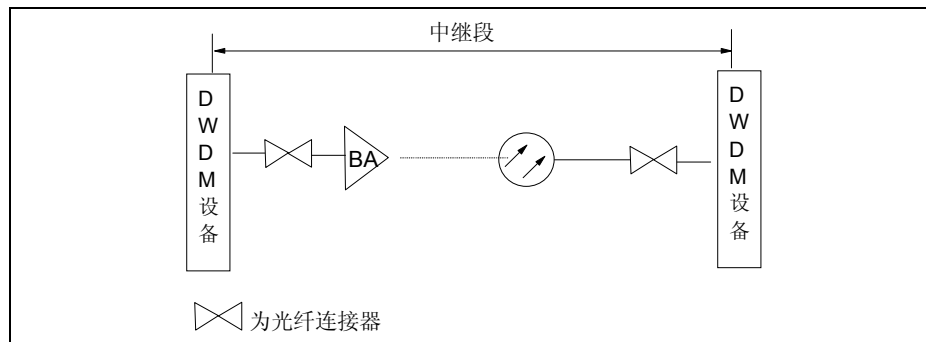


图3-6 放大器在中继段中的位置

2. 线路放大器 (LA)

线路放大器被放置于整个中继段的中间，如图3-7所示，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。一个中继段可以根据需要配置有多个线路放大器。线路放大器主要应用于长距离通信或CATV分配网，此时要求EDFA对小信号增益高，而且噪声系数小。

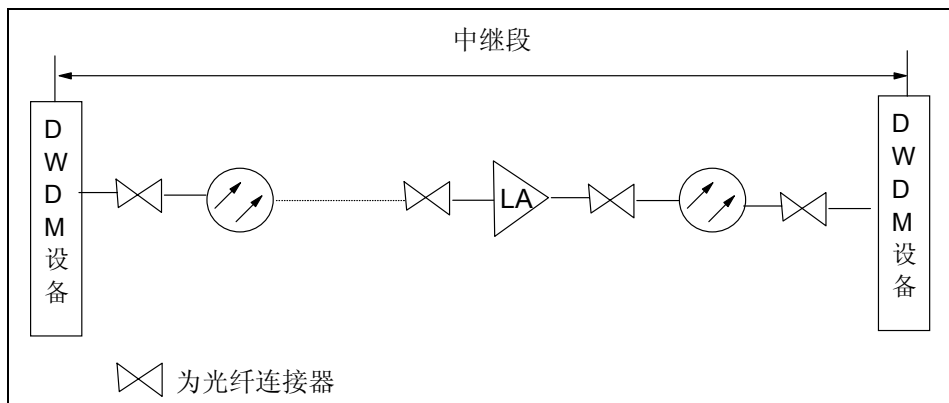


图3-7 线路放大器在中继中的位置

3. 前置放大器 (PA)

前置放大器被放置在中继段的末尾和光接收设备之前，如图3-8所示。该放大器的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。EDFA中的噪声主要是放大器的自发辐射噪声 (ASE)，该噪声将使光电检测器输出3个噪声分量，即由于光功率增加产生的额外散弹噪声、信号——自发辐射差拍噪声和自发辐射——

自发辐射差拍噪声，通过使用窄带光滤波器（1nm带宽）可以滤掉大部分自发辐射-自发辐射差拍噪声，同时减少额外散弹噪声，但无法滤除信号-自发辐射差拍噪声。尽管如此，采用光滤波器的EDFA噪声特性已经得到很大改善。使用前置放大器，极大地改善了直接检测式接收机的灵敏度，例如2.5Gbit/s速率的EDFA接收机灵敏度可以达到-43.3dBm，比没有使用EDFA的直接检测式接收机改进了约10dB。

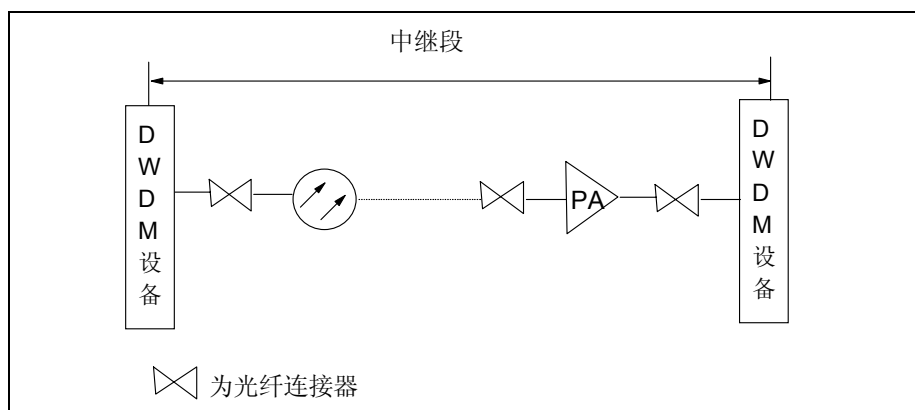



图3-8 前置放大器在光中继中的位置

 诀窍:

BA、PA、LA主要区别是在DWDM网络中处于不同的位置，而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相差不大;

LA: 输入光功率和PA相差不大，只是增益比BA大。

3.2.3 EDFA增益控制

1. EDFA增益平坦控制

在DWDM系统中，复用的光通路数越来越多，需要串接的光放大器数目也越来越多，因而要求单个光放大器占据的谱宽也越来越宽。

然而，普通的以纯硅光纤为基础的掺铒光纤放大器（EDFA）的增益平坦区很窄，仅在1549至1561nm之间，大约12nm的范围，在1530至1542nm之间的增益起伏很大，可高达8dB左右。这样，当DWDM系统的通路安排超出增益

平坦区时，在1540nm附近的通路会遭受严重的信噪比劣化，无法保证正常的信号输出。

为了解决上述问题，更好地适应DWDM系统的发展，人们开发出以掺铝的硅光纤为基础的增益平坦型EDFA放大器，大大地改善了EDFA的工作波长带宽，平抑了增益的波动。目前的成熟技术已经能够做到1dB增益平坦区并且几乎扩展到整个铒通带（1525nm~1560nm），基本解决了普通EDFA的增益不平坦问题。未掺铝的EDFA和掺铝的EDFA的增益曲线对比如图3-9所示。

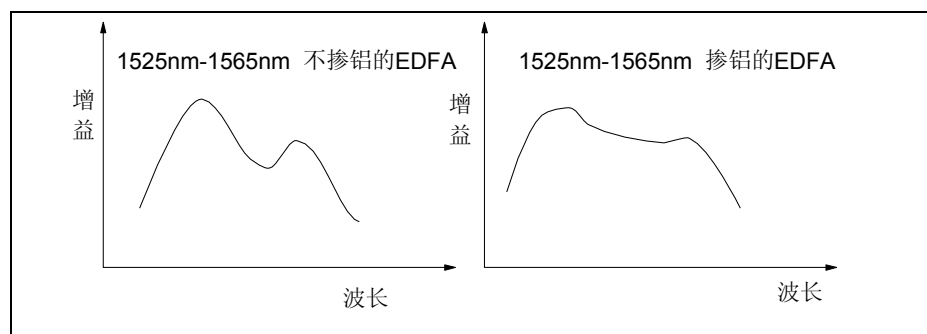



图3-9 EDFA增益曲线平坦性的改进

技术上，将EDFA光放大器增益曲线中1525nm~1540nm范围称做蓝带区，将1540nm~1565nm范围称做红带区，一般来说，当传输的容量小于40Gbit/s时，优先使用红带区。

 技术细节:

EDFA增益不平坦和平坦性能比较如图3-10所示。

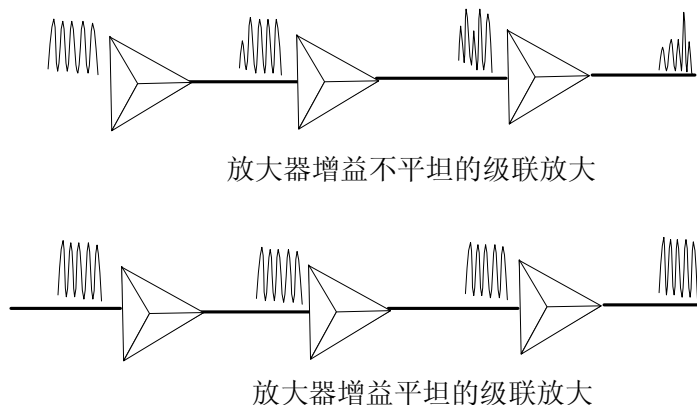


图3-10 EDFA增益平坦示意图

2. EDFA的增益锁定

EDFA的增益锁定是一个重要问题，因为WDM系统是一个多波长的工作系统，当某些波长信号失去时，由于增益竞争，其能量会转移到那些未丢失的信号上，使其它波长的功率变高。在接收端，由于电平的突然提高可能引起误码，而且在极限情况下，如果8路波长中7路丢失时，所有的功率都集中到所剩的一路波长上，功率可能会达到17dBm左右，这将带来强烈的非线性或接收机接收功率过载，也会带来大量误码。

EDFA的增益锁定有许多种技术，典型的有控制泵浦光源增益的方法。EDFA内部的监测电路通过监测输入和输出功率的比值来控制泵浦源的输出，当输入波长某些信号丢失时，输入功率会减小，输出功率和输入功率的比值会增加，通过反馈电路，降低泵浦源的输出功率，保持EDFA增益（输出/输入）不变，从而使EDFA的总输出功率减少，保持输出信号电平的稳定。如图3-11所示。

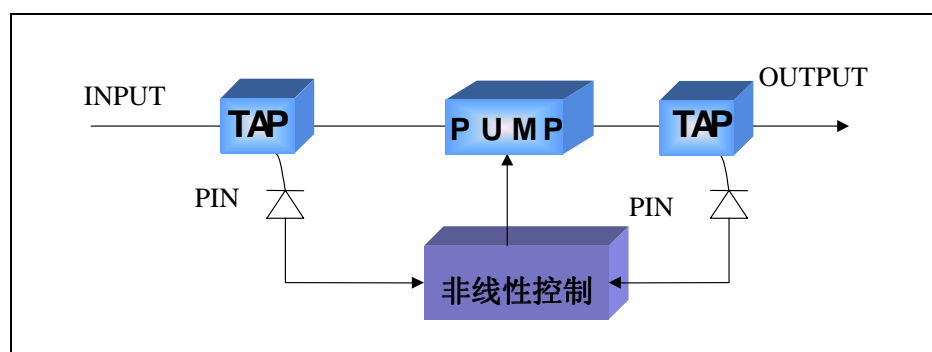


图3-11 控制泵浦光源增益锁定技术

另外还有饱和波长的方法。在发送端，除了8路工作波长外，系统还发送另一个波长作为饱和波长，在正常情况下，该波长的输出功率很小，当线路的某些信号丢失时，饱和波长的输出功率会自动增加，用以补偿丢失的各波长信号的能量，从而保持EDFA输出功率和增益保持恒定，当线路的多波长信号恢复时，饱和波长的输出功率会相应减少，这种方法直接控制饱和和波长激光器的输出，速度较控制泵浦源要快一些。

📖 技术细节:

EDFA增益不锁定和锁定性能比较:

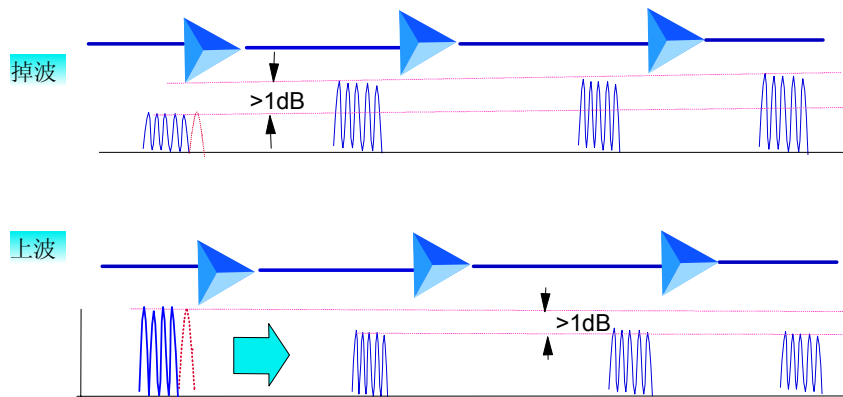


图3-12 增益不锁定EDFA掉波、上波增益变化图

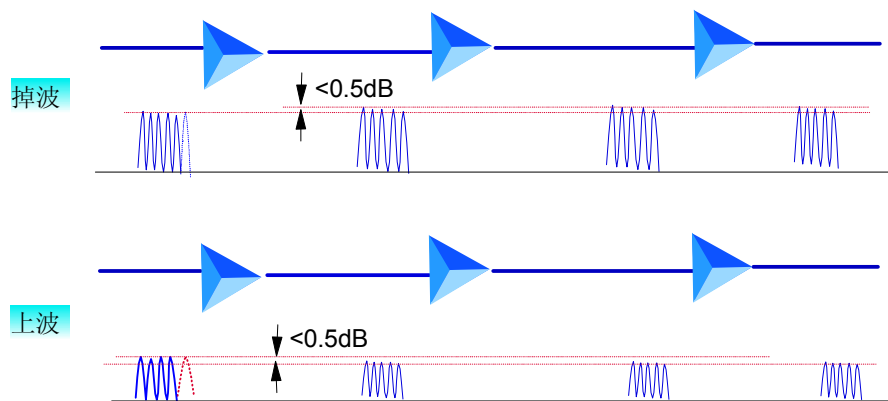


图3-13 增益锁定EDFA掉波、上波增益变化图

3.2.4 EDFA的局限性

EDFA解决了DWDM系统中的线路衰耗问题，但同时也带来了一些新的问题:

1. 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。

2. 光浪涌问题

采用EDFA可使输入光功率迅速增大，但由于EDFA的动态增益变化较慢，在输入信号能量跳变的瞬间，将产生光浪涌，即输出光功率出现尖峰，尤其是当EDFA级联时，光浪涌现象更为明显。峰值光功率可以达到几瓦，有可能造成O/E变换器和光连接器端面的损坏。

3. 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。

3.3 DWDM器件

在DWDM系统中，DWDM器件分为合波器和分波器两种，如图3-14所示。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在一根光纤中传输的多个波长信号分离。DWDM系统性能好坏的关键是DWDM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。DWDM系统中使用的DWDM器件的性能满足ITU-T G.671及相关建议的要求。

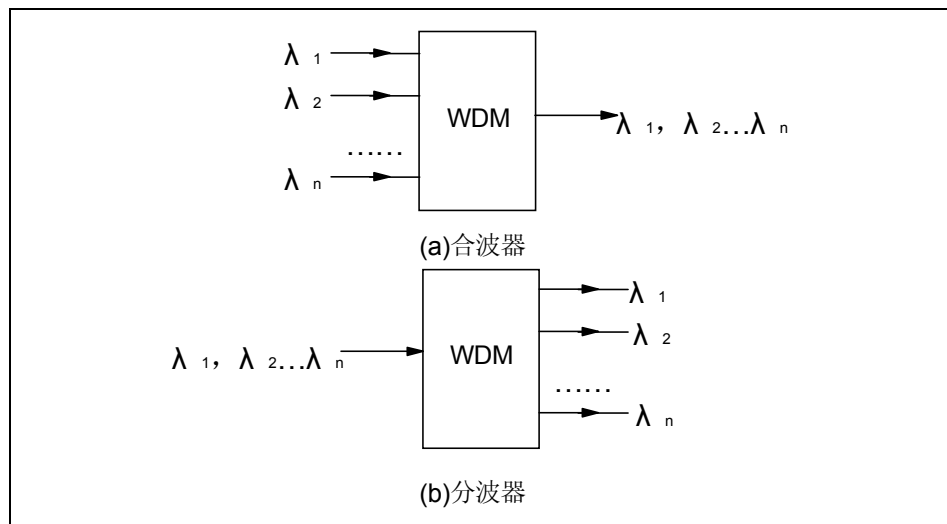


图3-14 DWDM器件

DWDM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DWDM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

(AWG)型。

3.3.1 光栅型DWDM器件

光栅型DWDM器属于角色散型器件，是利用角色散元件来分离和合并不同波长的光信号。最流行的衍射光栅是在玻璃衬底上沉积环氧树脂，然后再在环氧树脂上制造光栅线，构成所谓反射型闪烁光栅。入射光照射到光栅上后，由于光栅的角色散作用，不同波长的光信号以不同的角度反射，然后经透镜会聚到不同的输出光纤，从而完成波长选择功能；逆过程也成立，如图3-15所示。闪烁光栅的优点是高分辨的波长选择作用，可以将特定波长的绝大部分能量与其他波长进行分离且方向集中。

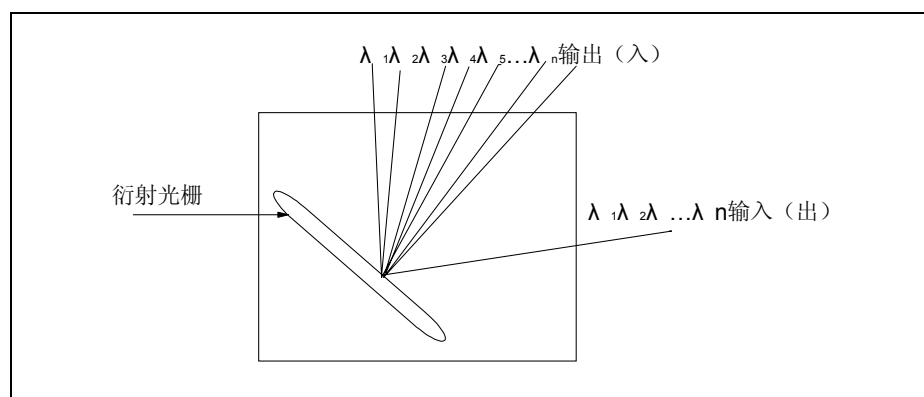


图3-15 闪烁光栅DWDM器件原理

闪烁光栅型滤波器具有优良的波长选择性，可以使波长的间隔缩小到0.5nm左右。另外，光栅型器件是并联工作的，插入损耗不会随复用通路波长数的增加而增加，因而可以获得较多的复用通路数，已能实现131个波长间隔为0.5nm的复用，其隔离度也较好。当波长间隔为1nm时隔离度可以高达5dB。闪烁光栅的缺点是插入损耗较大，通常有3~8dB，对极化很敏感，光通路带宽/通路间隔比尚不很理想，使光谱利用率不够高，对光源和DWDM器件的波长容错性要求较高。此外，其温度漂移随所用材料的热膨胀系数和折射率变化而变化，典型器件的温度漂移大约为0.012nm/°C，比较大。若采用温度控制措施，则温度漂移可以减少至0.0004nm/°C。因此，对于DWDM器件采用温控措施是可行和必要的。

这类光栅在制造上要求较精密，不适合于大批量生产，因此往往在实验室的科学研究中应用较多。

除上述传统的光纤器件外，布拉格光纤光栅滤波器的制造技术也逐渐成熟起来，它的制造方法是利用高功率紫外光波束干涉，从而在光纤纤芯区形成周期性的折射率变化，精度可达每厘米10000线，如图3-16所示。布拉格光纤光栅的设计和制造比较快捷方便，成本较低，插入损耗很小，温度特性稳定，其滤波特性带内平坦，而带外十分陡峭（滚降斜率优于150dB/nm，带外抑制

比高达50dB），整个器件可以直接与系统中光纤熔为一体，因此可以制作成信道间隔非常小的带通或带阻滤波器，目前在DWDM系统中得到了广泛的应用。然而这类光纤光栅滤波器的波长适用范围较窄，只适用于单个波长，带来的好处是可以随着使用的波长数而增减滤波器，应用比较灵活。

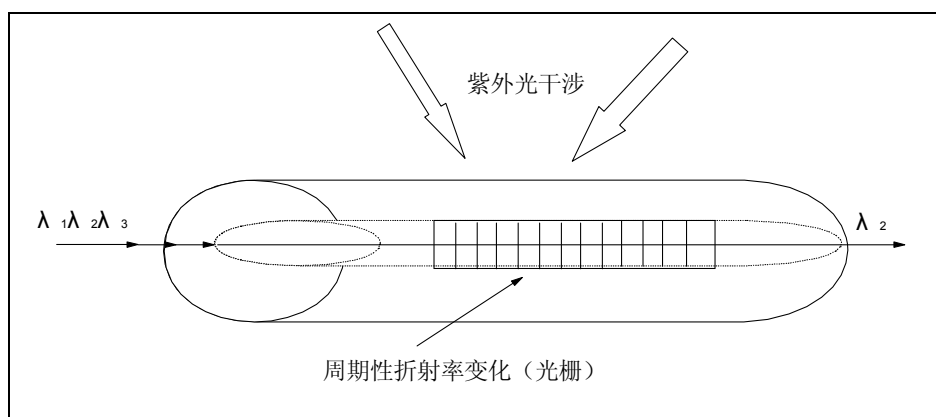


图3-16 光导纤维中布拉格光栅滤波器

3.3.2 介质薄膜型DWDM器

介质薄膜滤波器型DWDM器是由介质薄膜（DTF）构成的一类芯交互型DWDM器件。DTF干涉滤波器是由几十层不同材料、不同折射率和不同厚度的介质膜，按照设计要求组合起来，每层的厚度为1/4波长，一层为高折射率，一层为低折射率，交替叠合而成。当光入射到高折射层时，反射光没有相移；当光入射到低折射层时，反射光经历180°相移。由于层厚1/4波长（90°），因而经低折射率层反射的光经历360°相移后与经高折射率层的反射光同相叠加。这样在中心波长附近各层反射光叠加，在滤波器前端面形成很强的反射光。在这高反向射区之外，反射光突然降低，大部分光成为透射光。据此可以使薄膜干涉型滤波器对一定波长范围呈通带，而对另外波长范围呈阻带，形成所要求的滤波特性。薄膜干涉型滤波器的结构原理如图3-17所示。

介质薄膜滤波器DWDM器的主要特点是，设计上可以实现结构稳定的小型化器件，信号通带平坦且与极化无关，插入损耗低，通路间隔度好。缺点是通路数不会很多。具体特点还与结构有关，例如薄膜滤波器型DWDM器在采用软型材料的时候，由于滤波器容易吸潮，受环境的影响而改变波长；采用硬介质薄膜时材料的温度稳定性优于0.0005nm/°C。另外，这种器件的设计和制造过程较长，产量较低，光路中使用环氧树脂时隔离度不易很高，带宽不易很窄。

在DWDM系统中，当只有4至16个波长DWDM时，使用该型DWDM器件，是比较理想的。

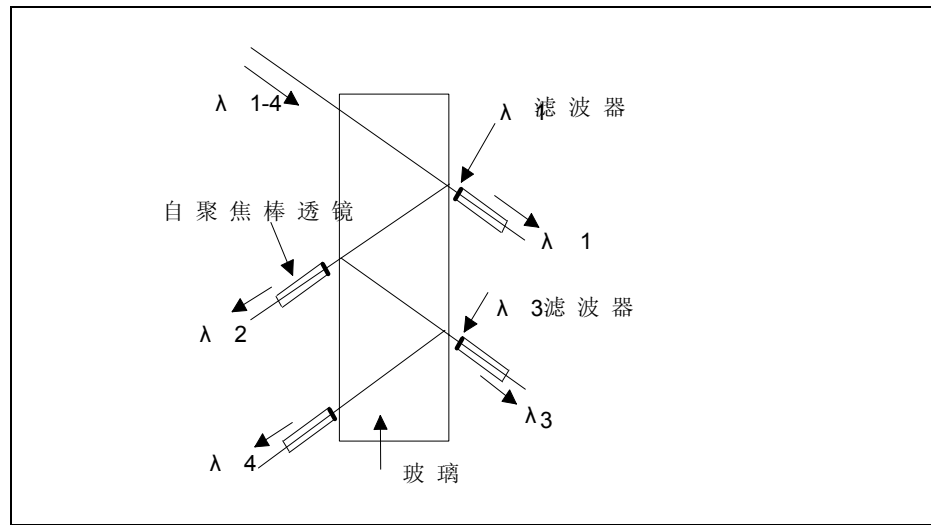


图3-17 薄膜干涉滤光器型分波器原理

3.3.3 熔锥型DWDM器

光纤耦合器有两类，应用较广泛的是熔拉双锥（熔锥）式光纤耦合器，即将多根光纤在热熔融条件下拉成锥形，并稍加扭曲，使其熔接在一起。由于不同的光纤的纤芯十分靠近，因而可以通过锥形区的消逝波耦合来达到的需要的耦合功率。第二种是采用研磨和抛光的方法去掉光纤的部分包层，只留下很薄的一层包层，再将两根经同样方法加工的光纤对接在一起，中间涂有一层的折射率匹配液，于是两根光纤可以通过包层里的消逝波发生耦合，得到所需要的耦合功率。熔锥式DWDM器件制造简单，应用广泛。

3.3.4 集成光波导型DWDM器

集成光波导型DWDM器是以光集成技术为基础的平面波导型器件，典型制造过程是在硅片上沉积一层薄薄的二氧化硅玻璃，并利用光刻技术形成所需要的图案并腐蚀成型。该器件可以集成生产，在今后的接入网中有很大的应用前景，而且，除了DWDM器之外，还可以作成矩阵结构，对光信道进行上/下分插（OADM），是今后光传送网络中实现光交换的优选方案。

使用集成光波导DWDM器较有代表性的是日本NTT公司制作的阵列波导光栅（Arrayed Waveguide Grating）光合波分波器，它具有波长间隔小、信道数多、通带平坦等优点，非常适合于超高速、大容量DWDM系统使用。其结构示意图如图3-18所示。

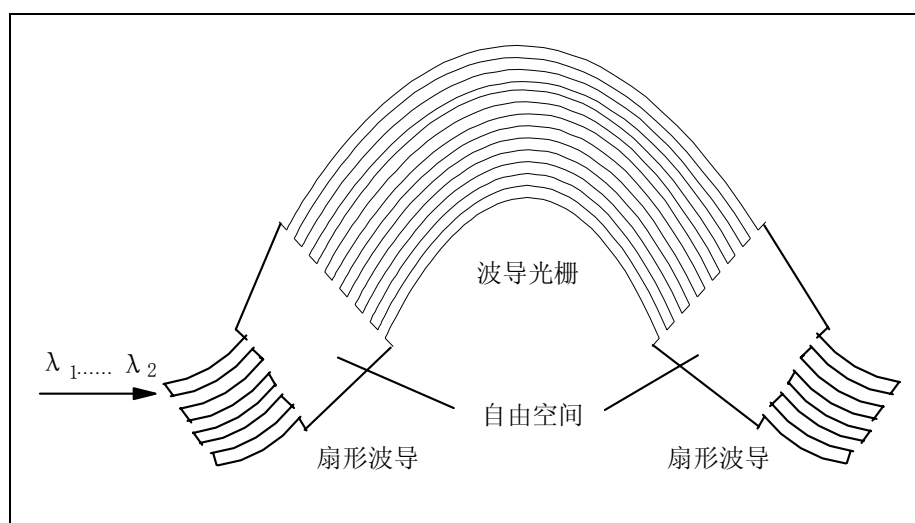


图3-18 AWG DWDM器原理

3.3.5 DWDM器件性能

表3-1 各种DWDM器件性能的比较

| 器件类型 | 机理 | 批量生产 | 通道间隔 (nm) | 通道数 | 串音 (dB) | 插入损耗 (dB) | 主要缺点 |
|--------|-------|------|-----------|------|------------|-----------|-------|
| 衍射光栅型 | 角色散 | 一般 | 0.5~10 | 131 | ≤-30 | 3~6 | 温度敏感 |
| 介质薄膜型 | 干涉/吸收 | 一般 | 1~100 | 2~32 | ≤-25 | 2~6 | 通路数较少 |
| 熔锥型 | 波长依赖型 | 较容易 | 10~100 | 2~6 | ≤- (10~45) | 0.2~1.5 | 通路数少 |
| 集成光波导型 | 平面波导 | 容易 | 1~5 | 4~32 | ≤-25 | 6~11 | 插入损耗大 |

第四节 DWDM组网设计

目标：

掌握DWDM组网的基本概念。

掌握DWDM不同网络单元的配置。

掌握DWDM网络设计时应考虑的几个要素

了解DWDM网络的一般保护机理

4.1 DWDM的几种网络单元类型

DWDM设备一般按用途可分为光终端复用设备、光线路放大设备、光分插复用设备、电中继设备几种类型。现以SBS W32系统的16波设备为例，分别讲述各种网络单元类型在网络中所起的作用。

4.1.1 光终端单元（OTM）

在发送方向，OTM把波长为 $\lambda_1 \sim \lambda_{16}$ 的STM-16信号经合波器复用成一个40Gbit/s的DWDM主信道，然后对其进行光放大，并附加上波长为 λ_s 的光监控信道。

在接收方向，OTM先把光监控信道取出，然后对DWDM主信道进行光放大，经分波器解复用成16个波长的STM-16信号。

OTM的信号流向如图4-1所示。

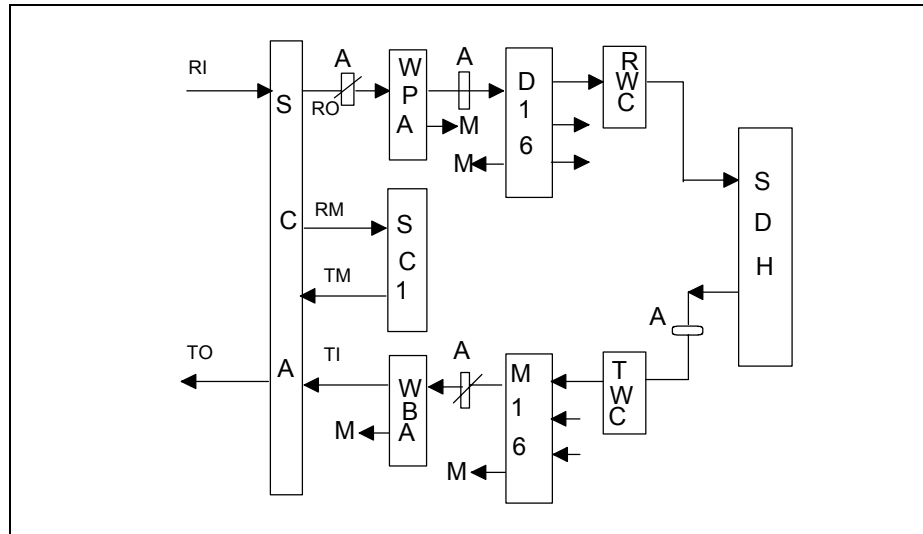


图4-1 OTM信号流向图

4.1.2 光放大单元（OLA）

SBS W32系统的光中继设备在每个传输方向配有一个光线路放大器。每个传输方向的OLA先取出光监控信道（OSC）并处理，再将主信道进行放大，然后将主信道与光监控信道合路并送入光纤线路。OLA的信号流向如图4-2所示。

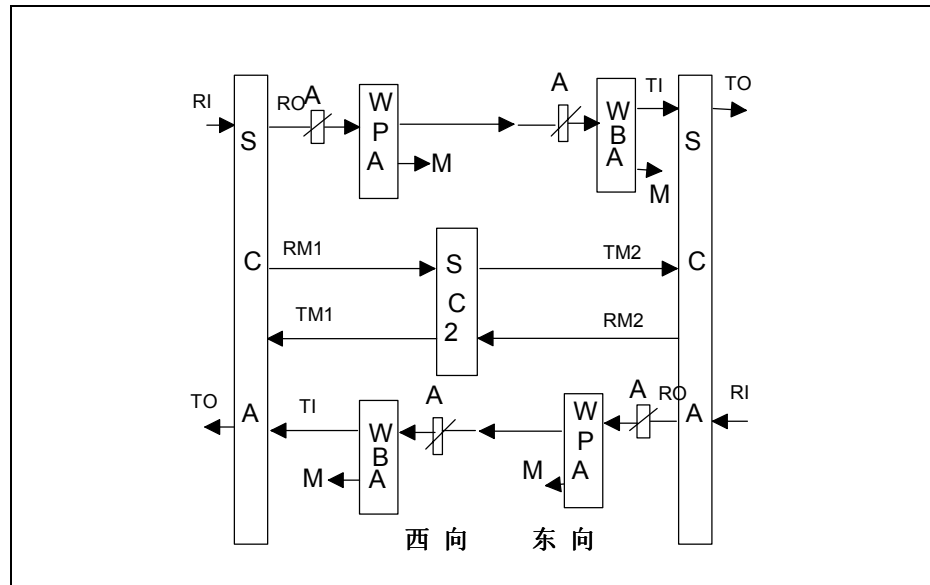


图4-2 OLA信号流向图

整个设备安装在一个子架内。图中每个方向都采用一对WPA+WBA的方式来

进行光线路放大，也可用单一WLA或WBA的方式来进行单向的光线路放大。

4.1.3 光分插复用单元（OADM）

SBS W32系统的光分插复用（OADM）可采用两种方式，即一块单板采用静态上/下波长的OADM和两个OTM采用背靠背的方式组成一个可上/下波长的OADM设备。

1. SBS W32系统静态光分插复用设备

SBS W32系统的光分插复用设备可采用一块单板实行静态上/下波长，每个OADM设备可进行1个到8个波长的分插复用，以适合于各种工程的实际需要。

OADM设备接收线路的光信号后，先提取监控信道，再用WPA将其预放大，通过ADD/DROP单元把含有16路STM-16的光信号按波长取下一定数量后送出设备，其余的经ADD/DROP单元直接插入主信道，再经功率放大后插入本地光监控信道，向远端传输。在ADD/DROP单元之间的主信道有一个可变衰减器，以调节直通信道和ADD信道之间的光功率平衡。在本站下业务的信道，需经RWC与SDH设备相连，在本站上业务的信道，需经TWC与SDH设备相连。

以OADM（上/下四波）为例，其信号流向如图4-3所示。

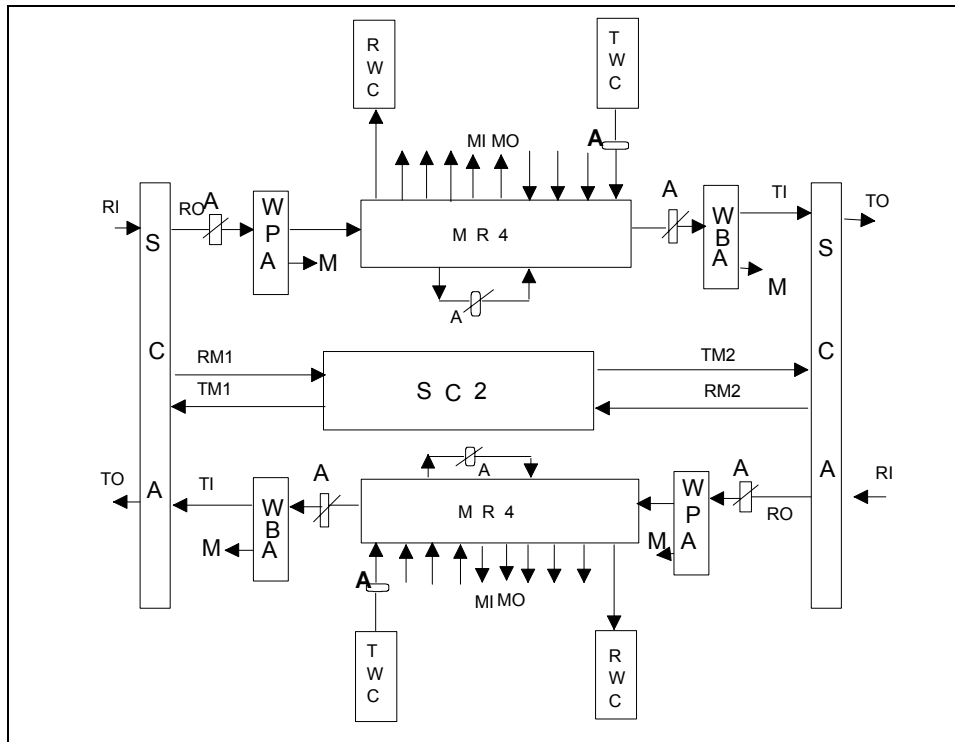


图4-3 静态OADM（16/4）信号流向图

2. 两个OTM背靠背组成的光分插复用设备

用两个OTM背靠背的方式组成一个可上/下波长的OADM设备。这种方式较之用一块单板进行波长转换的静态OADM要灵活,可任意上/下1到16个波长。更易于组网。如果某一路信号不在本站上下,可以从D16的输出口直接接入同一波长的TWC再进入另一方向的M16板。

双OTM背靠背组成的OADM的信号流向如图4-4所示。

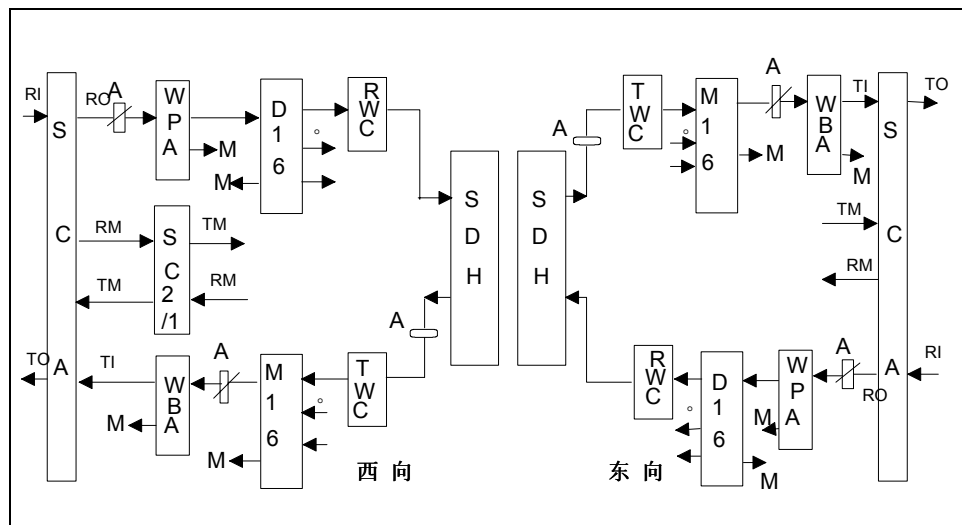


图4-4 两个OTM背靠背组成的OADM信号流向图

4.1.4 电中继单元（REG）

对于需要进行再生段级联的工程，要用到电中继设备（REG）。电中继设备无业务上下，只是为了延伸色散受限传输距离。电中继设备的信号流向如图4-5所示。

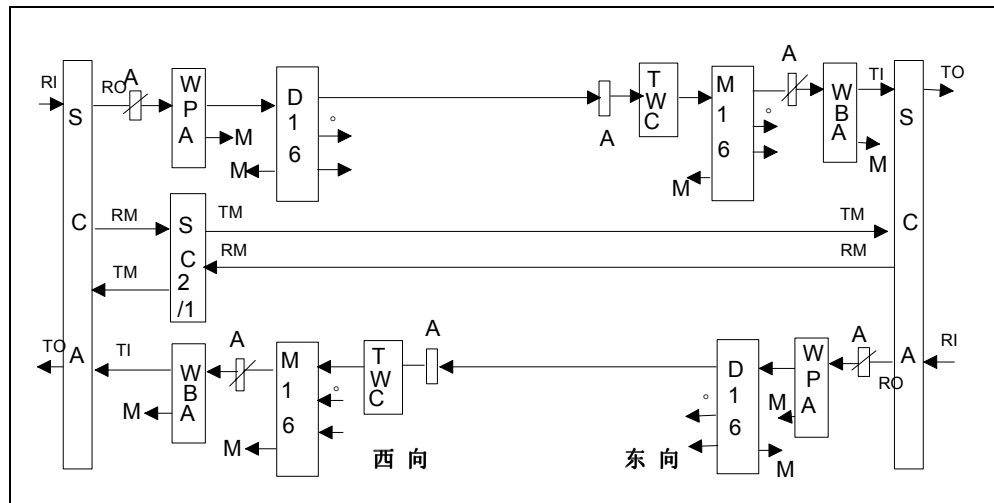


图4-5 电中继设备REG的信号流向图

⚠ 注意:

其他DWDM设备网络基本单元种类不外乎这几种，功能是类似的，在网络中的地位也是相同的，只是在名称上存在区别。在以下内容中涉及网元或单板均以SBS W32的配置、和单板来说明。

4.2 DWDM网络的一般组成

SBS W32系统最基本的组网方式为点到点方式、链形组网方式、环形组网方式，由这三种方式可组合出其它等较复杂的网络形式。与STM-16设备组合，可组成十分复杂的光传输网络。

4.2.1 点到点组网

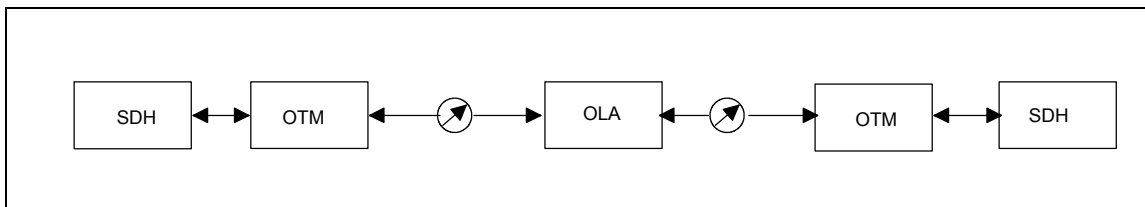


图4-6 WDM的点到点组网示意图

4.2.2 链形组网

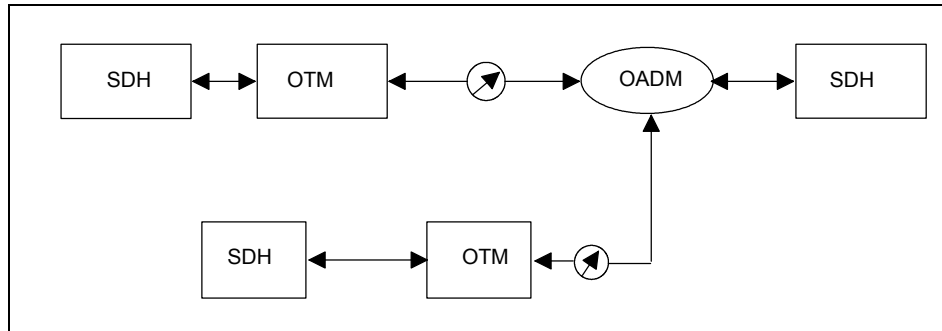


图4-7 WDM的链形组网示意图

4.2.3 环形组网

在本地网特别是都市网的应用中，用户根据需要可以由DWDM的光分插复用设备构成环形网。环形网一般都是由SDH自己进行通道环或复用段保护，DWDM设备没有必要提供另外的保护，但也可以根据用户需要进行波长保护。环形组网如图4-8所示。

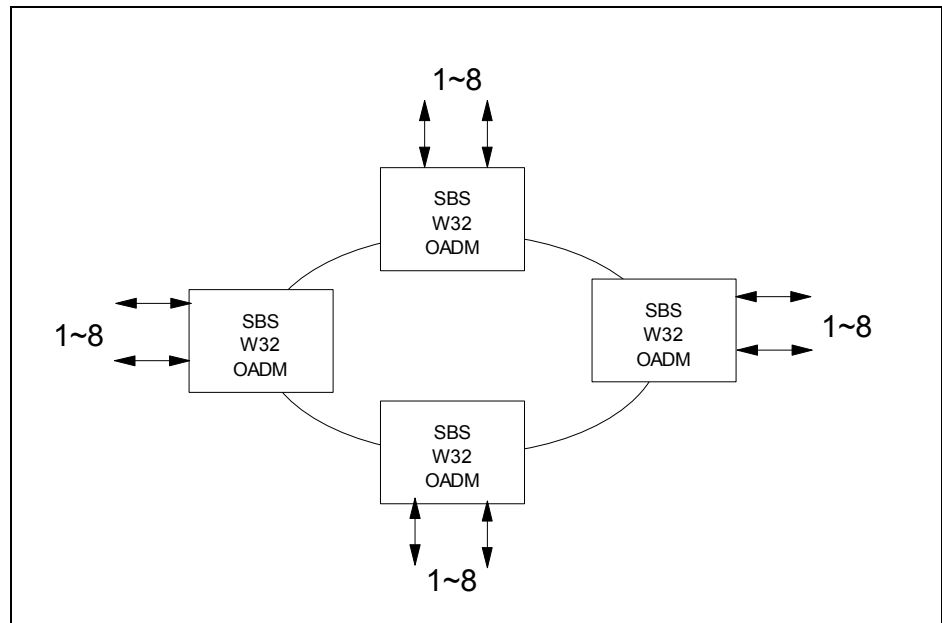


图4-8 DWDM的环形网示意图

4.2.4 网络管理信息通道备份和互联能力

采用DWDM的光传输网络要求具有高可靠性。在传输网中，网络管理信息是通过监控信道传送的，通常监控信道与主信道采用统一物理通道，这样在主信道失效时，监控信道也往往同时失效，所以必须提供网络管理信息的备份通道。

在环形组网中，当某段传输失效（如光缆损坏等）时，网络管理信息可以自动改由环形另一方向的监控信道传送，这时不影响对整个网络的管理，如图4-9所示为环形组网时网络管理信息通道的自动备份方式。

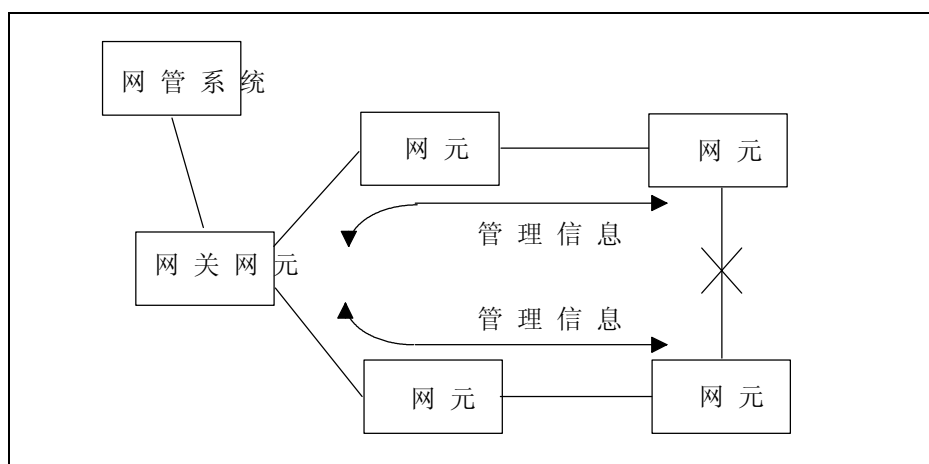


图4-9 环形组网时网络管理信息通道备份示意图（某段传输失效时）

但是，当某光纤段中某站点两端都失效时，或者是在点对点 and 链形组网中某段传输失效时，网络管理信息通道将失效。这样网络管理者就不能获取失效站点的监控信息，也不能对失效站点进行操作。为防止这种情况出现，网络管理信息应该选择使用备份通道。SBS网元可以通过数据通信网，提供备份网络管理信息通道。

在需要进行保护的两个网元之间，通过路由器接入数据通信网，建立网络管理信息备份通道。在网络正常时，网络管理信息通过主管理信道传送，如图4-10所示。

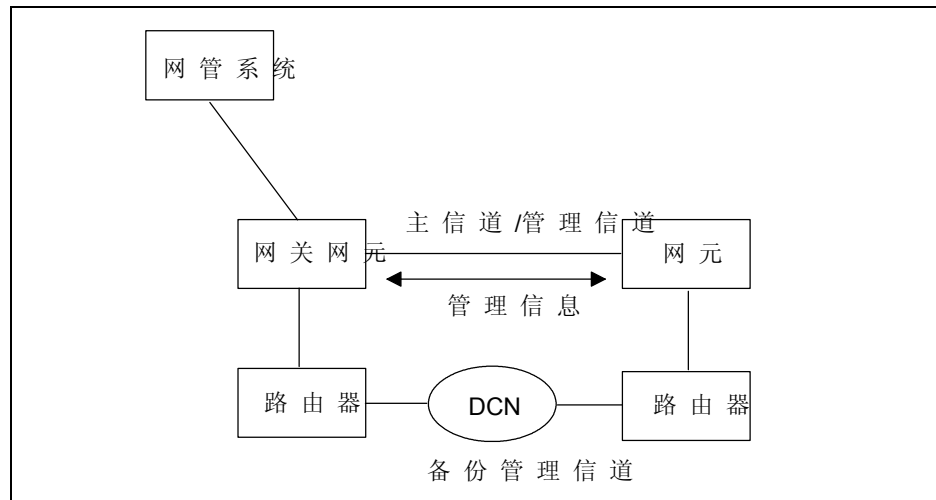


图4-10 网络管理信息通道备份示意图（正常时）

当主信道发生故障时，网元自动切换到备份通道上传送管理信息，保证网络管理系统对整个网络的监控和操作。整个切换过程是不需要人工干预自动进行的。网络管理信道备份示意如图4-11所示。

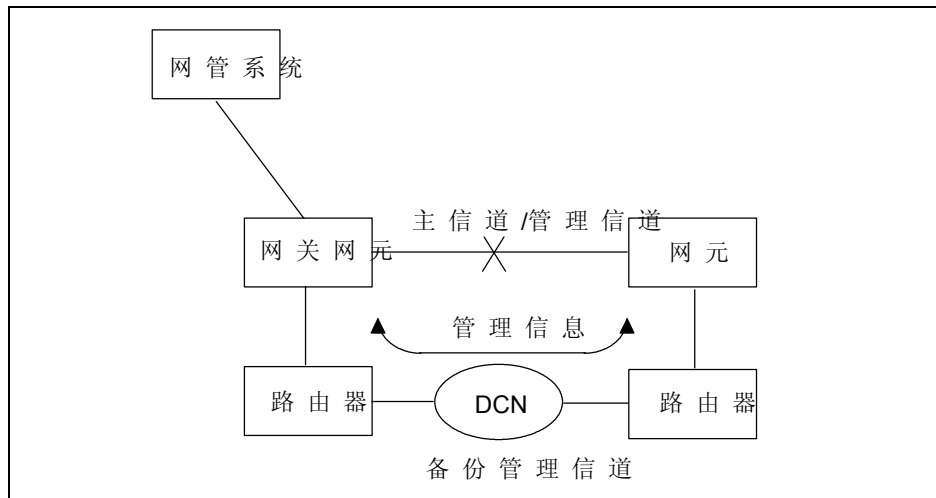


图4-11 网络管理信息通道备份示意图（主信道失效时）

值得注意的是：在网络规划中，备份管理信道和主信道应选择不同的路径，这样才能起到备份的作用。

SBS W32系统为不同的DWDM网络之间、DWDM和SDH之间的管理信息通道互连提供多种数据接口支持（如：RS-232、以太网口），使不同的传输设备实现统一的网管。图4-12所示的是不同传输设备之间管理信息通道互通示意图。

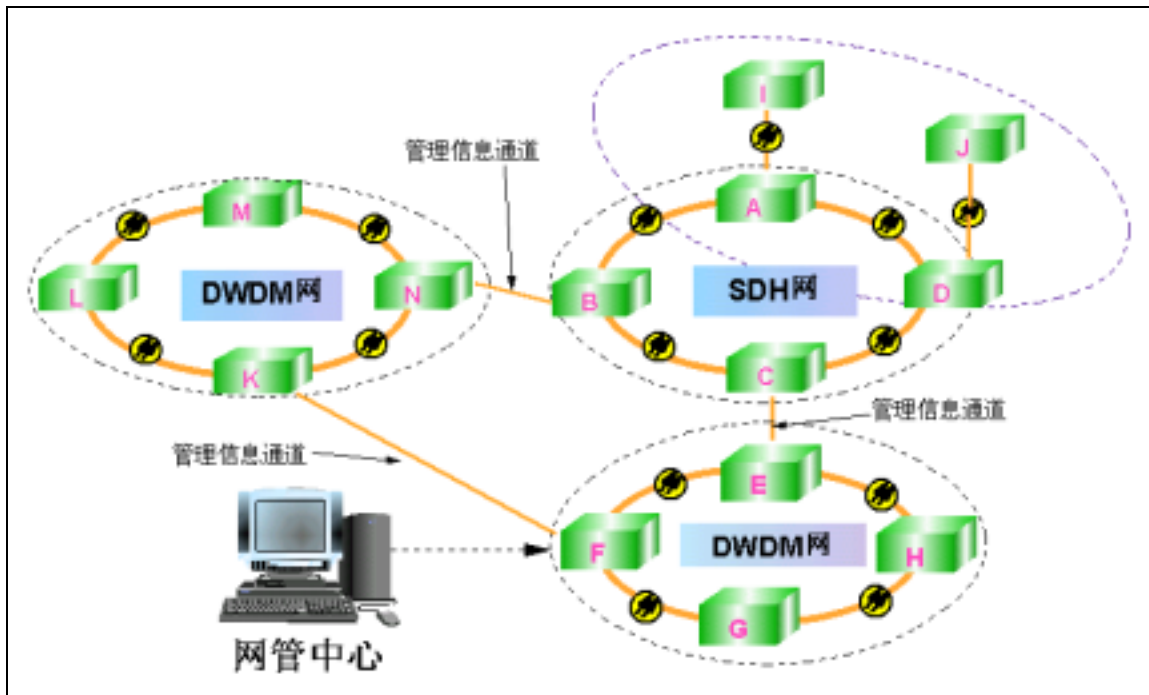


图4-12 不同传输设备之间的网络互通

4.3 DWDM组网考虑的要素

4.3.1 色散受限距离

1. 色散效应描述

色度色散是由发送光源光谱特性和光纤色度色散所导致的制约传输容量的一个支配性因素。

一般把光放大器加在一个系统上并不会明显地改变总色度色散。在EDFA中作为有源增益媒质的掺稀土光纤会导致少量的色度色散，而这些光纤长度仅在数十米乃至几百米数量级。掺稀土光纤的色度色散与ITU-T建议G.652、G.653 和G.655建议所规范的光纤差别不大。对于几十至数百公里长的系统来说，该色散影响可忽略不计。

2. 传输限制

随着光纤通信系统中传输速率的不断提高和由于光放大器极大地延长了无电中继的光传输距离，因而整个传输链路的总色散及其相应色散代价将可能变得很大而必须认真对待，色散限制已经成为目前决定许多系统再生中继距离的决定因素。在单模光纤中，色散以材料色散和波导色散为主，使信号中不

同频率分量经光纤传输后到达光接收机的时延不同。在时域上造成光脉冲的展宽，引起光脉冲相互间的串扰，使得眼图恶化，最终导致系统误码性能下降。

信号中不同频率分量来源于激光器的光谱特性，它们包括波长、光谱宽度、激光器啁啾声等。目前对1550nm区域的SLM激光器的-20dB光谱宽度已可达到0.05nm，这种情况下，限制再生中继距离的决定因素的是激光器啁啾声。

3. 减少影响的方法

光纤放大器的存在并不影响系统中的色度色散效应，因而不要求规范把这些效应减小到最低限度的特定方法。然而，使长距离无再生中继系统成为可能的EDFA却会使这种系统中的色度色散导致的系统损伤变得很严重。

在一些光放大的子系统中，一种无源色散补偿装置可同光放大器组合在一起，构成一个放大子系统，该子系统会给系统附加有限的色度色散，其色散系数与系统光纤相反。这就会使系统的色度色散减小。该装置可同EDFA装设在一起，用以弥补与无源色散补偿功能相关的损耗。另外，采用G.655光纤和G.653光纤对减少色度色散是有利的。如全面考虑非线性损伤，则长途传输中G.655光纤的综合性能是最佳的。

4. 网络设计时的考虑

在进行DWDM网络设计时，一般先将整个网络划分为若干个再生中继距离段，使每个再生中继段距离都小于光源的色散受限距离，这样，整个网络的性能基本可以容忍色散的影响。

诀窍：

在DWDM组网设计中计算色散时，由于我国采用的尾纤基本都是G.652尾纤，在1550nm窗口中典型色散系数为17ps/nm.km，但工程设计时按照20ps/nm.km来预算。

4.3.2 功率

光信号的长距离传输要求信号功率足以抵消光纤的衰耗，G.652光纤在1550nm窗口的衰耗系数一般为0.25dB/km左右，考虑到光接头、光纤冗余度等因素，综合的光纤衰耗系数一般小于0.275dB/km。

具体计算时，一般只对传输网络中相邻的两个设备作功率预算，而不对整个网络进行统一的功率预算。将传输网络中相邻的两个设备间的距离（衰耗）

称作中继距离（衰耗）。

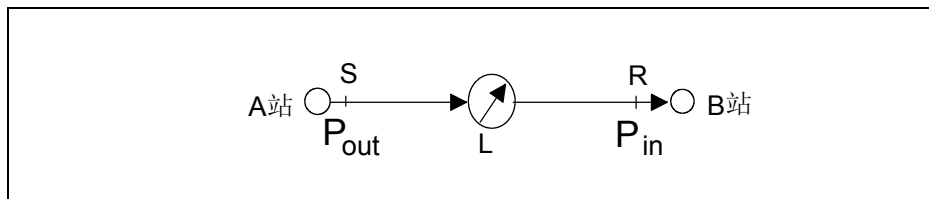


图4-13 中继衰耗原理图

如上图所示，A站点发送参考点为S，B站点接收参考点为R，S点与R点间传输距离为L，则：

$$\text{中继距离} = (P_{\text{out}} - P_{\text{in}}) / a$$

P_{out} ：为S点单信道的输出功率（单位为dBm），S点的光功率与A站点的配置相关，

P_{in} ：为R点的单信道最小允许输入功率（单位为dBm）。

a ：为光缆每公里衰耗（dB/km）（根据ITU-T建议，取0.275dB/km，0.275dB/km已包含接头、富裕度等各种因素的影响）。

4.3.3 光信噪比

1. 噪声产生原理

光放大器围绕着信号波长产生光，即所谓放大的自发射（ASE）。在具有若干级联EDFA的传输系统中，光放大器的ASE噪声将同信号光一样重复一个衰减和放大周期。因为进来的ASE噪声在每个光放大器中均经过放大，并且叠加在那个光放大器所产生的ASE上，所以总ASE噪声功率就随光放大器数目的增多而大致按比例增大，而信号功率则随之减小。噪声功率可能超过信号功率。

ASE噪声频谱分布也是沿系统长度展开的。当来自第一个光放大器的ASE噪声被送入第二个光放大器时，第二个光放大器的增益分布就会因增益饱和效应导致ASE噪声而发生变化，同样，第三个光放大器的有效增益分布也会发生变化。这种效应会向下游传递给下一个光放大器。即使在每个光放大器处使用窄带滤波器，ASE噪声也会积累起来，这是因为噪声存在于包含着信号频段之内的缘故。

光信噪比（OSNR）定义为：

$$\text{OSNR} = \text{每信道的信号光功率} / \text{每信道的噪声光功率}$$

2. 传输限制

ASE噪声积累对系统的SNR有影响，因为接收信号SNR劣化主要是与ASE有关的差拍噪声。这种差拍噪声随光放大器的数目的增加而线性增加。因此，误码率随光放大器数目的增加而劣化。此外，噪声是随放大器的增益幅度以指数形式积累的。

作为光放大器增益的一个结果，积累了许多个光放大器之后的ASE噪声频谱会有一个自发射效应导致的波长尖峰。特别要指出的是，如果考虑采用闭合全光环路的网络体制，那么若级联数目无限的光放大器，则ASE噪声就会无限积累起来。虽然有滤波器的系统中的ASE积累会因有滤波器而明显减小，但带内ASE仍会随光放大器的增多而增大。因此，SNR会随光放大器的增多而劣化。

3. 减小ASE噪声的方法

ASE噪声积累可能因光放大器间隔的缩小而减小（当保持总增益等于总传输通道损耗时），因为ASE是随放大器增益幅度的增大而以指数形式积累的。下面滤波技术中的一种可进一步减小非期待ASE噪声：即采用ASE噪声滤波器或利用自滤波效应（自滤波方法）。

自滤波方法适用于装设几十或更多个光放大器的系统。这种方法是把信号波长调整到自滤波波长上，从而使检测器接收到的ASE噪声减小，如同使用窄带滤波器一样。当采取缩短光放大器间隔和低增益光放大器的手段来减小初始ASE噪声时，这是最有效的。

如果考虑采用全光DWDM闭合环路网，那么自滤波方法就不适用。事实上，在光放大器整个增益频谱中形成的峰值可能对系统性能造成严重影响。在这种情况下，采用ASE滤波法可最大限度减小ASE噪声的积累。这是通过对未送往网络节点的DWDM信道在倒换出节点之前进行滤波的手段达到的。

对于装有很少几个光放大器的系统，自滤波法不如ASE滤波法有效。ASE滤波法可灵活地选择信号波长，并具有其它的优点。必须谨慎地选择滤波器的特性，因为级联滤波器的通带比信号滤波器的通带窄（除非是有一个矩形的频带）。

4. DWDM网络设计时对光信噪比的考虑(注：这一部分内容如果你觉得比较深奥的话，完全可以跳过阅读后面的章节)

对不同的网络应用，OSNR的要求大致相同，有细微的区别。如表4-1所示。

表4-1 OSNR对比

| 放大器级连类型 | 最小光信噪比 (dB) |
|----------------------|-------------|
| 16波8×22dB系统 (8*80km) | 22 |
| 16波5×30dB系统(5*100km) | 20 |
| 16波3×33dB系统(3*120km) | 22 |

光信噪比是影响DWDM系统误码性能最重要因素之一。对于多个级联线路光放大器的DWDM系统，噪声的光功率主要由放大的自发辐射噪声所支配。

1) 级联线路光放大器自发辐射噪声累积

多个级联线路光放大器自发辐射噪声累积的数学模型可由图4-14说明。

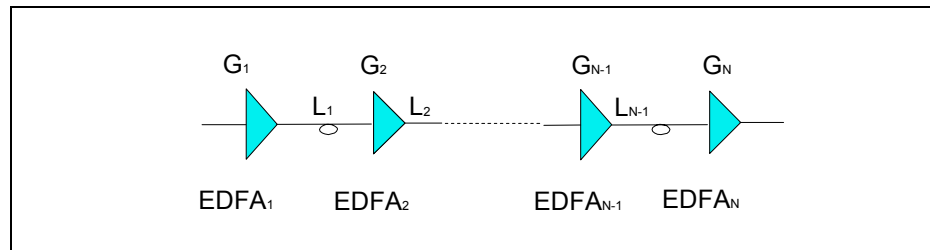


图4-14 自发辐射噪声累积的数学模型

图4-14中G_N为EDFA_N的增益（以线性单位表示）；L_N为第N中继段光缆衰耗（以线性单位表示）。

$$\begin{aligned}
 & \text{则总的自发辐射噪声功率} = \text{EDFA}_N \text{产生的自发辐射噪声功率} \\
 & + (\text{EDFA}_{N-1} \text{产生的自发辐射噪声功率} \times L_{N-1} \times G_N) \\
 & + \dots\dots \\
 & + (\text{EDFA}_2 \text{产生的自发辐射噪声功率} \times L_2 \times G_3 \times \dots\dots \times G_{N-1} \times L_{N-1} \times G_N) \\
 & + (\text{EDFA}_1 \text{产生的自发辐射噪声功率} \times L_1 \times G_2 \times \dots\dots \times G_{N-1} \times L_{N-1} \times G_N)
 \end{aligned}
 \tag{式4-1}$$

2) 单个EDFA产生的噪声

一个光放大器在单位频率间隔内产生的放大的自发辐射噪声功率P_{ASE}：

$$P_{ASE} = 2N_{SP} (G-1) h \nu
 \tag{式4-2}$$

式中：N_{SP}是EDFA的自发噪声系数；

G是EDFA的内部增益；

h是普朗克常数；

ν 是光频率。

放大器的外部噪声系数 N_F ：

$$N_F = 10 \log [2N_{SP} - (2N_{SP} - 1) / G] + \eta_{IN} \quad (\text{式4-3})$$

η_{IN} 是放大器输入衰耗（以dB为单位）。

3) 中继段衰耗相同时网络光信噪比的简化计算

如果假设所有EDFA特性和各中继段衰耗相同；每个放大器后总功率（包括累积的ASE功率）是相等的；并且 $G \gg 1$ ； $G=L$ ，则根据式(4-1)、式(4-2)、式(4-3)经一系列处理，光信噪比（OSNR）由下式给出：

$$OSNR = P_{OUT} - L - N_F - 10 \log N - 10 \log [h \nu \Delta \nu_o] \quad (\text{式4-4})$$

式中： P_{OUT} 是每信道输出功率（以dBm为单位）；

L是放大器间的衰耗（以dB为单位）；

N_F 是外部噪声系数（以dB为单位）；

N是链路中的间隔数目；

$\Delta \nu_o$ 是光带宽；

$10 \log [h \nu \Delta \nu_o] = -58 \text{ dBm}$ （1.55 μm 带域、0.1nm带宽内）。

这一计算方法可满足于一般工程设计需要。但是除满足前面的假设外，还必须满足如下条件：

- 光分用器无周期特性；
- 光发送机有足够高的消光比。

在实际的DWDM系统中，由于EDFA增益不均衡可能会导致每信道输出功率不等和EDFA噪声系数不同。因此设计必须考虑最坏信道的光信噪比满足需要，并有足够的富裕量。

4.3.4 其它因素

1. 受激布里渊散射（SBS）

1) 产生原理

在使用窄谱线宽度光源的强度调制系统中，一旦信号光功率超过受激布里渊散射（SBS）门限，将有很强的前向传输信号光转化为后向传输。在受激布

里渊散射中，前向传输的光以声子的形式散射，只有后向散射的光是在单模光纤内。散射光波长大概在 1550nm处向下移动11GHz。

SBS效应具有一个最低门限功率。然而研究表明，不同类型的光纤甚至同种类型的不同光纤之间的受激布里渊散射门限功率都不同。对于窄谱线光源的外调制系统，其典型值在5~10mw 量级，但对直接调制激光器可能会达到20~30mw之间。由于G.653 光纤的有效芯径面积较小，因此采用 G.653 光纤的系统的SBS门限功率比采用G.652 光纤的系统的 SBS 门限功率略低一些。对于所有的非线性效应都是这样。SBS门限功率对光源谱线宽度和功率电平很敏感，但与信道数无关。

2) 传输限制

SBS 极大地限制了光纤中可以传输的光功率。图4-15描述了对于窄带光源的这种效应，这里所有的信号功率都落入了布里渊带宽内。前向传输功率逐渐饱和，而后向散射功率急剧增加。

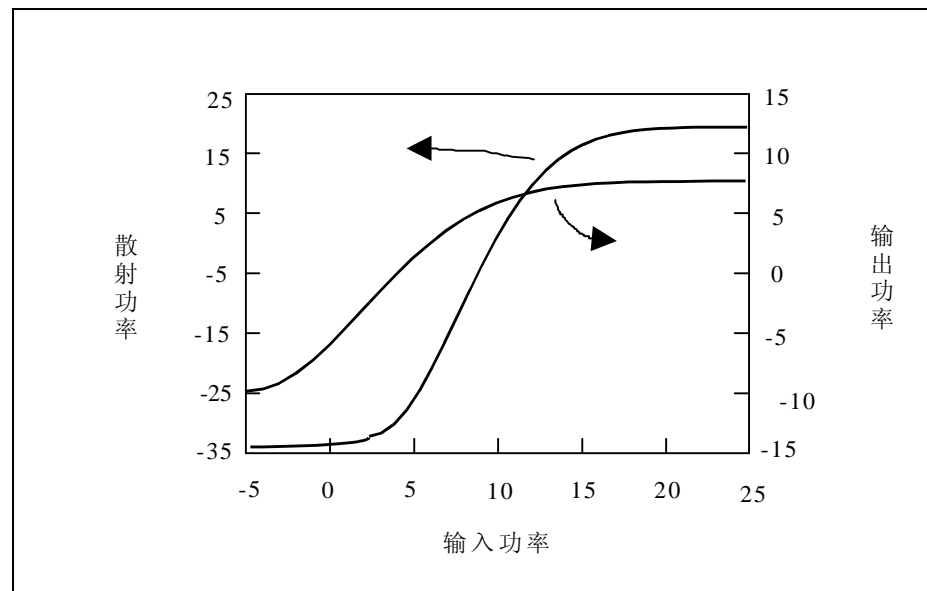


图4-15 窄带光源的SBS门限

3) 减少影响的方法

在光源线宽明显大于布里渊带宽或者信号功率低于门限功率的系统中，SBS损伤不会出现。

2. 受激拉曼散射 (SRS)

1) 产生原理

受激喇曼散射是和光与硅原子振动模式间相互作用有关的宽带效应。受激喇

曼散射使得信号波长就象是更长波长信号通道或者自发散射的喇曼位移光的一个喇曼泵。在任何情况下，短波长的信号总是被这种过程所衰减，同时长波长信号得到增强。

2) 传输限制

在单信道和多信道系统中都可能发生受激喇曼散射。仅有一个单信道且没有线路放大器的系统中，信号功率大于1W时可能会受到这种现象的损伤。然而在信道间隔较宽的多信道系统中，波长较短的信号通道由于受激喇曼散射影响使得一部分功率转移到波长较长的信号信道中，从而可能引起信噪比性能的劣化。这可能引起总信道数、信道间隔、平均输入光功率及总系统长度固定的系统的总容量受到限制。在G.653光纤上，系统的受激喇曼色散门限稍低于采用G.652光纤的系统，其原因是G.653光纤的等效芯径面积小。SRS对单信道系统不会产生实际的劣化影响，而对DWDM系统则可能会限制其系统的容量。

3) 减少影响的方法

在单信道系统中可以使用滤光器来滤除不需要的频率分量，然而迄今为止，还没有报道在多信道系统中用来消除SRS影响的可实用的技术；也可以通过减小信号功率来减轻受激喇曼射效应的影响。不过在目前实施的经过认真设计的DDWDM系统中没有出现明显的SRS限制。

3. 自相位调制 (SPM)

1) 产生原理

由于克尔效应，信号光强度的瞬时变化引起其自身的调制。这种效应叫做自相位调制。在单波长系统中当强度变化导致相位变化时自相位调制效应将逐渐展宽信号的频谱，如图4-16所示。在光纤的正常色散区中，由于色度色散效应，一旦自相位调制效应引起频谱展宽，沿着光纤传输的信号将经历暂时间较大的展宽。不过在异常色散区，光纤的色度色散效应和自相位调制效应可能会互相补偿，从而信号的展宽也会小一些。

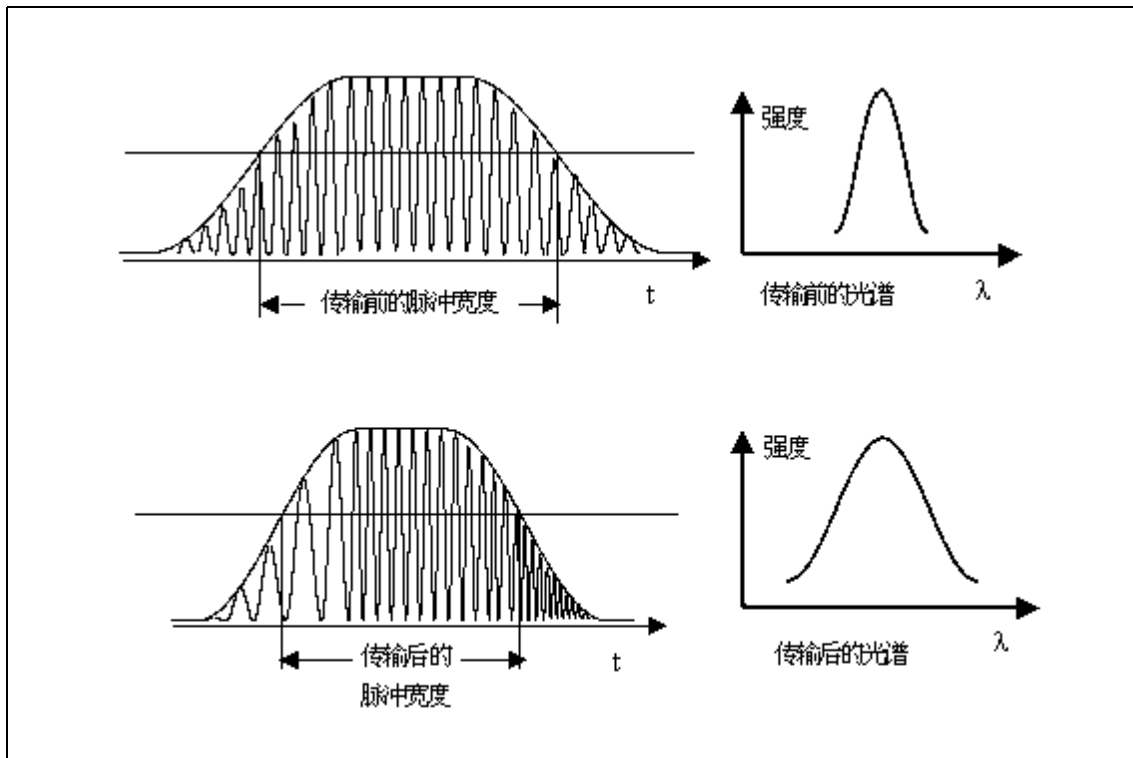


图4-16 自相位调制引起传输脉冲的压缩和谱展宽

2) 传输限制

一般情况下，SPM效应只在高累积色散或超长系统中比较明显。色散受限系统可能不能容忍自相位调制效应。在信道间隔很窄的多通道系统中，由自相位调制引起的频谱展宽可能在相邻信道间产生干扰。

在G.652光纤中的低啁啾强度调制信号的自相位调制将引起脉冲的压缩，而对于具有异常色散特性的G.655光纤，这种信号的自相位调制效应是发射机功率的函数。脉冲压缩能抑制色度色散并提供一定的色散补偿。然而，最大色散限制和相应的传输距离限制仍然存在。

图4-16说明了在G.652光纤中的低啁啾强度调制信号的自相位调制引起传输脉冲的压缩；同时也可以说成是频谱展宽。

3) 减少影响的方法

采用G.653光纤且将信号通道设置在零色散区附近将有利于减少自相位调制效应的影响。对于使用G.652光纤且长度小于100km的系统，可以在用适当的间隔处进行色散补偿的方法来控制自相位调制效应的影响。也可以通过减小输入光功率或者是将系统工作波长设置在G.655光纤的零色散波长以上来削弱自相位调制效应的影响。

4. 互相位调制 (XPM)

1) 产生原理

在多波长系统中，当光强度的变化导致相位变化时，由于相邻信道间的相互作用，互相位调制一般会展宽信号频谱。XPM引起的频谱展宽度与信道间隔有关，因为不同的群速引起的色散会导致沿光纤传播的要分离的脉冲的互作用。一旦XPM引起频谱展宽，信号在沿光纤长度传播时就会因色度色散效应而经受一次较大的瞬时展宽。

2) 传输限制

XPM导致的损伤在G.652光纤系统中比在G.653光纤和G.655光纤系统中更为明显。XPM引起的展宽导致多信道系统中相邻信道间的干扰。

3) 减小影响的方法

XPM可通过选择适当的信道间隔的手段加以控制。研究表明，XPM引起的多信道系统信号失真只发生于相邻信道。3信道系统的中心信道的信噪比(SNR)将接近于单信道的信噪比，这是因为信道的间隔增大了缘故，因此，信号因信道之间有适当的间隔而使XPM影响可忽略不计。在对每信道功耗为5mw的系统进行的模拟试验中，已证实100GHz的信道间隔足以减小XPM的影响。XPM导致的色散代价也可采取在系统沿线按适当间隔进行色散补偿的办法加以控制。

5. 四波混频 (FWM)

1) 产生原理

四波混频(FWM)亦称四声子混合，是在因不同波长的两、三个光波相互作用而导致在其它波长上产生所谓混频产物或边带的新光波的情况下发生的。这种相互作用可能发生于多信道系统的信号之间，EDFA的自发辐射噪声之间以及单信道的主模与边模之间。

3个信号的情况下，产生的混频产物如图4-17所示。

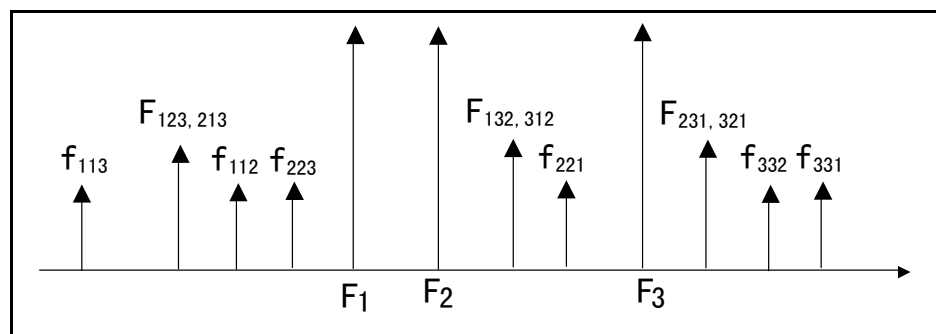


图4-17 三光波互作用产生的混频产物

当信道间隔相等时，这些产物会恰恰落入相邻的信号信道之中。如果边带与初始信号之间的相位匹配条件达到了，那么沿着光纤传播的两个光波就会产生高效率的FWM。

2) 传输限制

FWM边带的产生可能造成信号功率明显减小。更严重的是，当混频产物直接落入信号通道时产生寄生干扰，这种干扰决定于信号与边带的相位的相互作用，表现为信号脉冲幅度的增减。

寄生损耗导致接收器输出眼图的闭合，致使比特差错率（BER）性能劣化。依靠频率间隔和色度色散破坏作用以及光波之间的相位匹配可减小FWM产生的影响。在G.652光纤上的系统所受的FWM损伤比G.653光纤上的系统小。相反，若信号通路恰巧位于零色散点或邻近该点处，就可能导致在相对较短（即数十公里）的光纤长度上FWM产生激增。FWM对信道间隔也是敏感的。

四波混频可能对ITU-T 建议的G.652光纤上的多波长系统造成严重的系统损伤，因为信号只能承受一个很小的色度色散值。在单信道系统中，FWM的相互作用可能出现在信号与ASE噪声之间，也可能出现在光发送器的主模与边模之间。由光克尔效应积累的ASE相位噪声被叠加在信号载波上，从而使信号频谱尾部变宽。

3) 减少影响的方法

如前面指出的那样，可利用G.655那样的光纤色散来抑制FWM带的产生。还可安排不均匀的信道间隔，以缓解FWM损伤的严重程度。降低G.653光纤系统的功率电平，可允许多路运行，但这会削弱光放大的优势。

为了适当抑制混频产物的发生，已提出了（现有或正在研究的新建议）在EDFA放大带宽范围内有一个最小允许色散（即非零色散）的光纤的方案。用色散特性相反的非零色散光纤作替换段也可作为一种可能采用的方案，然而，这种替换可能因要把另一种光纤引入外部环境而在安装、运行和维护上遇到困难。还发现了一些采用色散稍有限的长光纤段和色散相反且较大的短段光纤（加以补偿）的类似方法。

已有方案提出采取不均匀信道间隔和较大信道间隔减小非线性效应和允许在G.653光纤上安排DWDM系统的手段减少四波混频影响。采取不均匀信道间隔，可保证由3个或更多个信道产生的混频产物不致于恰巧跌落在其它信道波长上，然而由信号向混频产物的功率传递（即信号功率损耗）却会因造成信道间隔不均匀的配置而保持不变，仍会导致明显的眼图闭合现象。信道间隔的增大也可减小四波混频影响。这种缓解技术的使用可能因串接光放大器使增益谱宽变窄而受到制约，因为光放大器的接入会使可用的放大谱宽变窄。

? 想一想:

G.652、G.655、G.653三种光纤在1550nm窗口中，四波混频效应最强烈的是哪一种光纤？为什么？

6. 偏振模色散 (PMD)

1) 产生原理

众所周知，圆形对称电介质波导的基模是双简并的。在一根实际光纤中，这种简并是通过双折射分离的，对于保偏光纤双折射是有意引入的，对一般通信光纤双折射是非期待产物，它是由于光纤受到应力扰动以随机方式引入。

双折射光纤的情况是，一次项产生一个称为偏振色散的群时延。这种偏振色散导致偏振正交状态之间的群时延有差别，如图4-18所示。

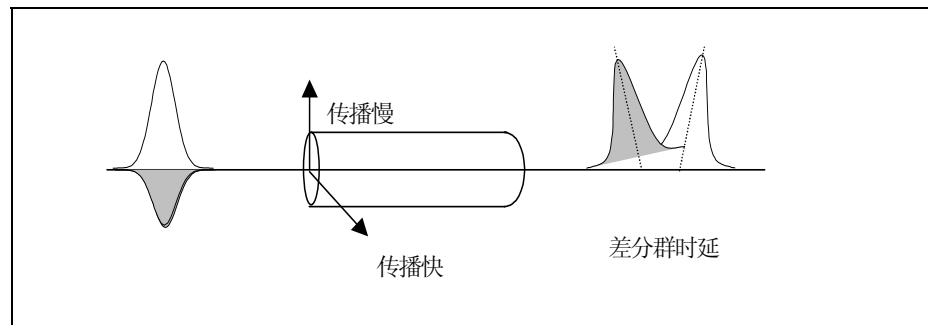


图4-18 偏振正交状态之间的群时延产生

虽然偏振模色散效应会随机改变光纤中脉冲传播的偏振状态，但是能够确定一对正交状态或主状态,即在输入端入射进光纤的信号在输出端保持偏振状态不变。就一次项而言，这些状态与波长无关。然而在某些情况下，主状态可能呈现出与波长有关。和光纤的色度色散一起会导致的进一步劣化。

光纤的双折射是由诸如应力、弯曲、扭绞、温度等随机引入的，随机的双折射机制重新确定局部的、沿光纤长度方向的双折射轴线，从而导致长度方向偏振模之间的耦合。这种变化之间的光纤长度称为耦合长度。一根光纤的耦合长度是指全部局部耦合长度平均值总和。

2) 传输限制

在数字传输系统中，偏振模色散产生符号间干涉。当总色散等于 $0.4T$ (T 为比特周期) 时，大约引入1dB的光功率代价。目前研究表明，光纤或光缆倾向于按平均偏振模色散来规范；数字传输系统也是如此。通过计算机模拟预计，若平均偏振模色散不超过 $0.1T$ ，则系统光功率代价超过 1dB 的概率会小于 10^{-9} 。

在采用偏振扰码器（一种有意调制激光器偏振状态使之表现为无偏振状态的器件）的长距离放大系统中，偏振模色散导致信号偏振程度增大。偏振相关损耗与偏振烧孔的相互作用而使系统性能劣化。当系统中出现附加偏振相关损耗时，会招致更大的二次损失。

二次效应可能产生偏振模色散与色度色散之间的耦合，从而增加色散的统计分量。这一领域尚在研究之中。

3) 减少影响的方法

既然问题是由双折射引起的，因此在减小偏振模色散影响方面所作的努力都与减小光缆制造引入的双折射有关。诸如优化光纤生产、保证光纤的同心度、减小纤芯的残余应力、采用精密的光缆结构等。典型的光缆平均偏振模色散处于如下范围：

$$0 < (\Delta\Gamma) < 0.5ps/\sqrt{km}$$

另一方法是在系统输入、输出端插入偏振控制器。一个偏振分束器接在输出偏振控制器之后，用来产生误差信号。输出偏振控制器搜索该误差信号，再调整输入偏振控制器，使误差信号最小。在无误差信号点，输入偏振状态是系统的主状态。这种技术已经用于一个 5Gbit/s 系统的补偿。相干频分复用系统也采用了类似的技术。

7. 偏振相关损耗 (PDL)

1) 产生原理

偏振相关损耗是由诸如隔离器、耦合器等光无源器件的二色性引起的。当信号通过二色性器件时，其电场平行于损耗轴线的部分就有衰减。与偏振模色散的情况一样，决定偏振相关损耗的轴线方向是随机变化的。

2) 传输限制

在有放大器的系统中，放大器是按功率守恒模式工作的。信号和噪声均受偏振相关损耗的影响。但是，因为噪声是非偏振的，所以信号和噪声所受的影响是不同的。噪声可分解为一个与信号平行的成分和一个与信号正交的成分。光放大可能增大与信号正交的成分。此外，信号偏振变化导致模色散，所以噪声正交成分的大小随时波动。这会降低接收端信噪比，从而造成系统损伤。

3) 减少影响的方法

就偏振模色散情况而言，重要的是尽量减少组件的偏振模相关损耗。应当指出偏振模相关损耗对系统的影响是随放大器数量的增加而增大的。例如，在长途海缆系统中，要求是极其苛刻的。在只有几个放大器的短途系统中偏振模相关损耗对系统的影响尚在研究之中。

8. 偏振烧孔 (PHB)

1) 产生原理

偏振烧孔 (PHB) 是偏振饱和和信号入射进掺铒光纤而产生的各向异性饱和所导致的结果。这会使利用偏振场定位的受激状态选择减少。因此, 正交方向的可用增益较大。虽然铒离子在玻璃纤维线材中是随机分布的, 但是在微观水平上, 与铒离子相关的偶极子是各向异性的。当线性偏振饱和信号同向于偶极子主轴时, 偏振烧孔影响最大; 而当饱和信号的偏振状态呈椭圆形或圆形时, 该影响减小。因为总差分增益是这两种效应的矢量和, 所以信号激光器和泵浦激光器均将影响总效应。烧孔程度与饱和信号的偏振度成正比。非偏振饱和和信号不存在烧孔问题。从总体上看, 这种情况类似于圆形偏振信号的情况。

2) 传输限制

因为偏振烧孔会使沿链路形成的噪声大于按简单的线性理论预算的噪声, 所以偏振烧孔会影响系统性能。造成的影响是信噪比因偏振烧孔而降低以及在偏振模色散和偏振相关损耗的情况下最终测定的Q值发生波动。由于有两种影响偏振烧孔的因素, 影响系统性能的形式也就有两种。总效应与增益饱和成正比, 随饱和度的增大而增大。

我们首先考虑偏振泵浦激光器的影响。为达到讨论的目的, 可认为泵浦偏振是固定不变的。泵浦导致正交偏振轴方向的差分增益。正交于泵浦的噪声大于同向于泵浦的噪声。然而, 沿途各放大器中的泵浦激光器的偏振轴是互不相干的。积累效应似类于一种随机游动, 可以认为引起偏振烧孔的泵浦是放大器偏振相关损耗的一个有关因素。因此, 把放大器的数目加以平均而获得的噪声应是线性的, 正如简单的线性理论所预算的那样。

引起偏振烧孔的信号激光器略有差别。因为信号激光器是在系统上传播信号的, 所以平行于信号激光器的偏振噪声将有同信号一样的增益。然而, 正交于信号激光器的噪声却总是正交于信号偏振轴线的。因此, 噪声以非线性形式沿放大链路增加。

偏振烧孔导致的总差分增益将随着放大链路沿途 (由偏振模色散导致的) 信号偏振状态的变化而变化。它之所以变化是因为信号烧孔效应与泵浦效应有关。当处于相应的偏振状态时, 信号激光器和泵浦激光器会改变差分增益变化的幅度。因此, 这样做虽然会使总噪声以非线性形式增大, 但噪声可能随时波动。如上所述, 信噪比将下降, 并随时波动。

3) 减小影响的方法

在几种减小偏振烧孔效应的手段。在小信号区进行放大是一种可行的办法, 但这并不总是可能的, 在许多情况下是不满足需要的。实际上, 最简单的办法是采用无偏振信号。无偏振信号可用许多手段产生, 但采取偏振扰码来产

生信号的方法最为普遍。若使用相位调制器，则偏振状态会随时在两种正交状态之间同时变化。这样，信号就似乎无偏振了。

这表明最好是按双倍的比特率安排偏振调制。这是因为放大器中的偏振相关损耗会从偏振调制变换为幅度调制的缘故。采取双倍比特偏振调制，幅度波动就处于检测器带宽以上的速率上，从而不被接收器感知。若采用这种技术，则很长的系统的性能就得到改善，达到预期的符合高可信度要求的目的。偏振调制已成为跨洋大系统的标准实现手段。

然而，在长距离放大系统中，偏振模色散会引信号的再次偏振，致使偏振烧孔造成系统性能劣化。这种效应证实了放大链路偏振现象的相互作用的复杂性。

4.4 DWDM网络的保护

由于DWDM系统的负载很大，安全性特别重要。

点到点线路保护主要有两种保护方式：一种是基于单个波长、在SDH层实施的1+1或1:N的保护。另一种是基于光复用段上保护，在光路上同时对合路信号进行保护，这种保护也称光复用段保护OMSP。另外还有基于环网的保护。

4.4.1 基于单个波长的保护

1. 基于单个波长，在SDH层实施的1+1保护

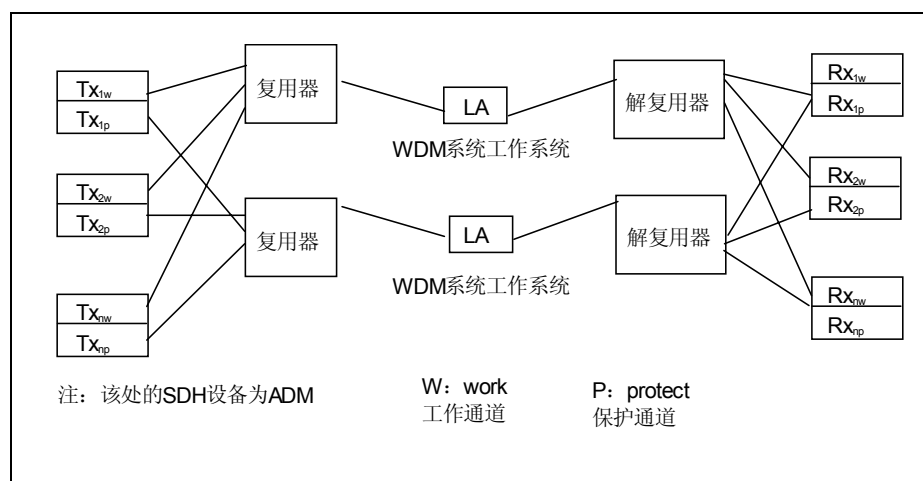


图4-19 基于单个波长，在SDH层实施的1+1保护

这种保护系统机制与SDH系统的1+1MSP类似，所有的系统设备都需要有备份，SDH终端、复用器/解复用器、线路光放大器、光缆线路等，SDH信号在发送端被永久桥接在工作系统和保护系统，在接收端监视从这两个

DWDM系统收到的SDH信号状态，并选择更合适的信号，这种方式的可靠性比较高，但是成本比较高。

在一个DWDM系统内，每一个SDH通道的倒换与其它通道的倒换没有关系，即DWDM系统里的Tx_i出现故障倒换至DWDM系统2时，Tx₂可继续工作在DWDM系统1上。一旦监测到启动倒换的条件，保护倒换应在50ms完成。

2. 基于单个波长，在SDH层实施的1:n保护

DWDM系统可实行基于单个波长，在SDH层实施的1:N保护，如图4-20所示，Tx₁₁、Tx₂₁、Tx_{n1}共用一个保护段，与Tx_{p1}构成1:n的关系保护关系，Tx₁₂、Tx₂₂、Tx_{n2}共用一个保持段，与Tx_{p2}构成1:n的关系保护关系，依此类推，Tx_{1m}、Tx_{2m}、Tx_{nm}共用一个保护段，与Tx_{pm}构成1:n的关系保护关系。SDH复用段保护（MSP）监视和判断接收到的信号状态，并执行来自保护段合适的SDH信号的桥接和选择。

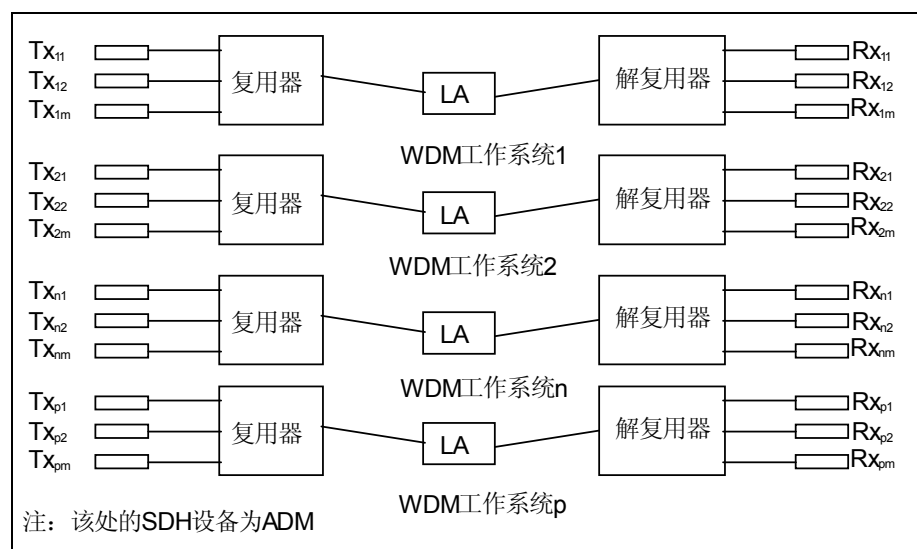


图4-20 基于单个波长，在SDH层实施的1:n保护

在一个DWDM系统内，每一个SDH通道的倒换与其它通道的倒换没有关系，即DWDM系统1里的Tx₁₁倒换到DWDM保护系统1时，Tx₁₂、Tx₁₃...Tx_{1m}可继续工作在DWDM工作系统1上。一旦监测到启动倒换条件，保护倒换应在50ms内完成。

3. 基于单个波长，同一DWDM系统内1:n保护

考虑到一条DWDM线路可以承载多条SDH通路，因而也可以使用同一DWDM系统内的空闲波长作为保护通路。

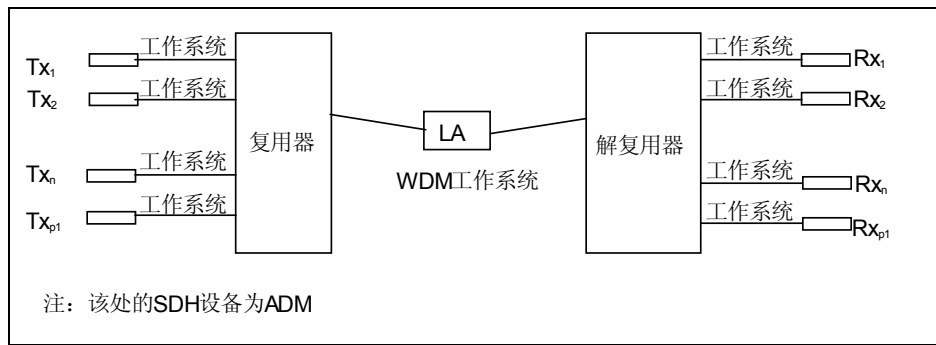


图4-21 基于SDH层的同一DWDM系统内1: n保护

图4-21所示为n+1路的DWDM系统，其中n个波长通道作为工作波长，一个波长通路作为保护系统。但是考虑到实际系统中，光纤、光缆的可靠性比设备的可靠性要差，只对系统保护，而不对线路保护实际意义不是太大。

一旦监测到启动倒换时间条件，保护倒换应在50ms内完成。

4.4.2 光复用段（OMSP）保护

这种技术只在光路上进行1+1保护，而不对终端线路进行保护。在发端和收端分别使用1×2光分路器和开关，或采用其它手段（如glowing状态，指光放大器处于一种低偏置电流，泵浦源工作在低输出情况下，输出信号很小，只能供监测得到，判断是否处于正常工作状态），在发送端对合路的光信号进行分离，在接收端，对光信号进行选路。光开关的特点是插入损耗低，对光纤波长放大区域透明，并且速度快，可以实现高集成和小型化。

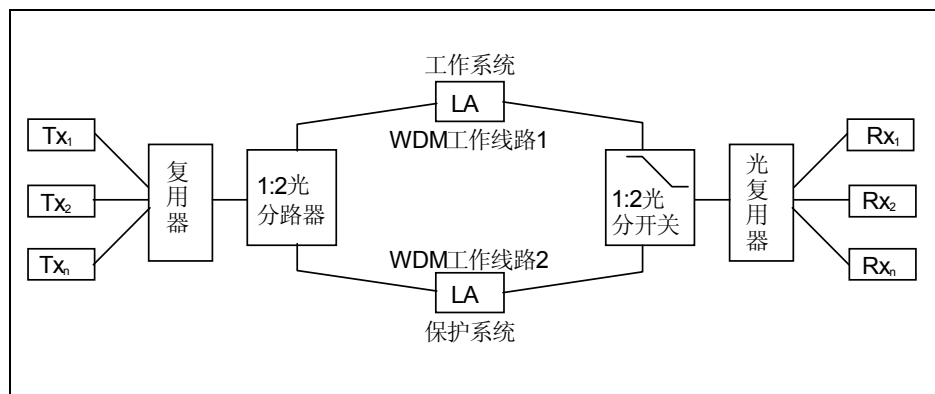


图4-22 光复用段（OMSP）保护

图4-22是采用光分路和光开关的光复用段保护方案。在这种保护系统，只有光缆和DWDM的线路系统是备份的，而DWDM系统终端站的SDH终端和复用器则是没有备用的，在实际系统中，人们也可以用N: 2的耦合器来代替复用器和1: 2分路器。相对于1+1保护，减少了成本，光复用段OMSP保护只

有在独立的两条光缆中实施才有真正的实际意义。

4.4.3 环网的应用

采用DWDM系统同样可以组成环网，一种是将基于单个波的点到点DWDM系统连成环，如图4-23所示。在SDH层实施1:n保护，SDH系统必须采用ADM设备。

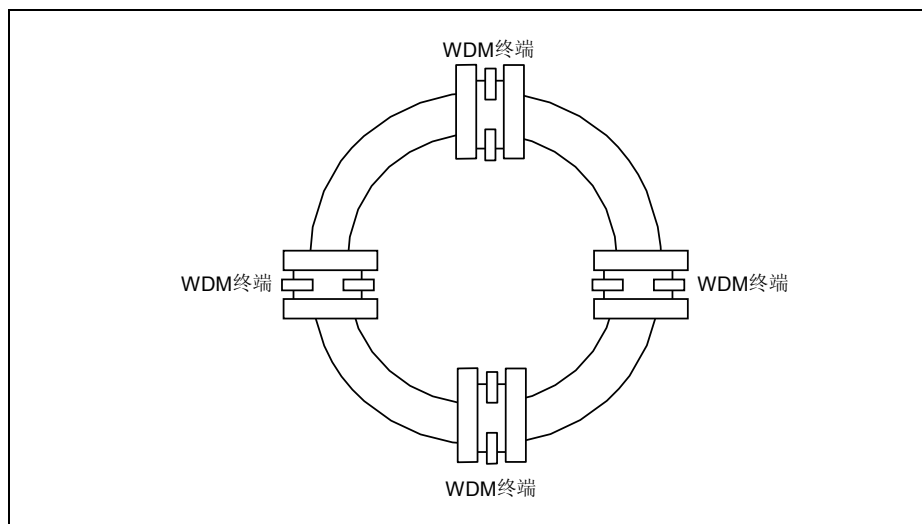


图4-23 利用点到点DWDM系统组成的环

在图4-24所示的保护系统中，可以实施SDH系统的通道保护环和MSP保护环，DWDM系统只是提供“虚拟”的光纤，每个波长实施的SDH层保护与其它波长的保护方式无关，该环可以为2纤或4纤。

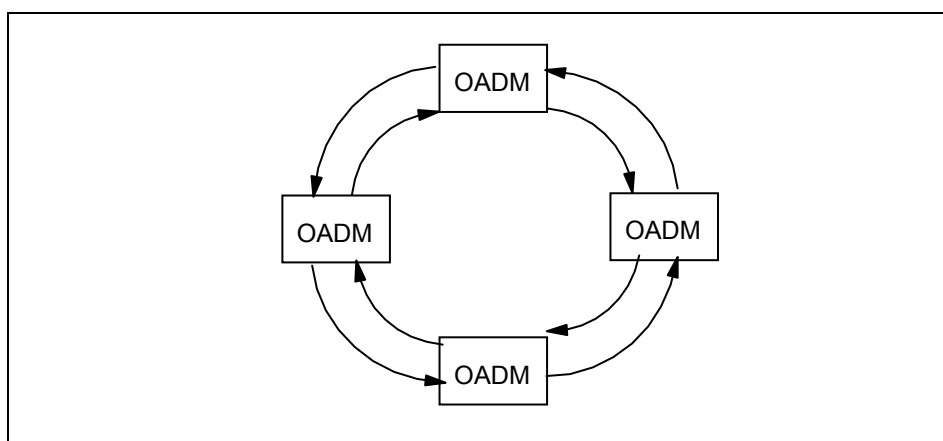


图4-24 利用OADM组成的环

采用有分插复用能力的OADM组环是DWDM技术在环网中应用的另一种形

式。现在，OADM组成的环网可以分成2种形式。

一种是基于单个波长保护的波长通道保护，即单个波长的1+1保护，类似于SDH系统中的通道保护。

另一种是线路保护环，对合路波长的信号进行保护，在光纤切断时，可以在断纤临近的2个节点完成“环回”功能，从而使所有的业务得到保护，与SDH的MSP相类似。从表现形式上讲，可以分双向线路2纤环和单向线路2纤环，也可以构成双向线路4纤环。在双向2纤线路环时，一半波长作为工作波长，另一半作为保护。

4.5 实例分析

4.5.1 组网图（实际网络站点）

有一实际网络如图所示，共有A、B、C、D、E、F、G、H、I、J、K、L、M、N等14个站点，其中A、E、N三点有业务上下，其它站点无业务上下。各站点间的距离如图4-25所示。

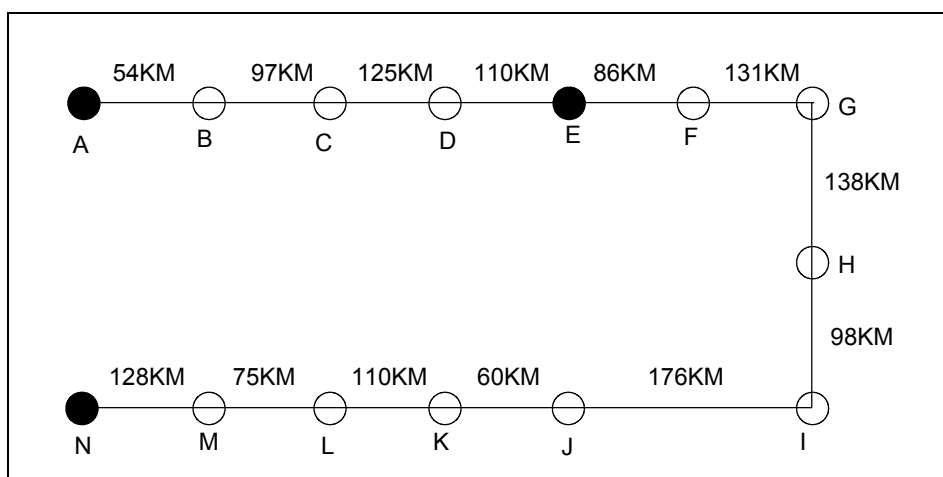


图4-25 某网络实际组网图

4.5.2 组网图（考虑光源的色散受限距离，划分网络的再生段）

光源的色散受限距离与光源的调制方式有关，一般EA光源的色散受限距离最大可达到640km，M-Z外调制光源的色散受限距离最大可达到1000km（M-Z光源的线宽太窄，不利于克服光纤的非线性效应）。现以实际工程中最常用的EA光源为例来划分网络的再生段。

将图4-26中相邻的有业务上下的两站点间的距离进行分析，A--E之间距离为386km,满足EA光源色散受限距离要求；E---N间的距离为1002km，不满足

EA光源色散受限距离小于等于640km的要求，必须对E---N两站点的距离进行划分，将该段距离分为两到三段距离较小的再生段距离。现将E---N间的I站点由光放大站改为电中继站，使E---N间由一个再生段划分为E---I、I---N两个再生段。其中E---I再生段的距离为453km，I---N站D的再生段距离为549km，划分后的距离满足EA光源色散距离小于等于640km的要求。组网如图4-26所示。

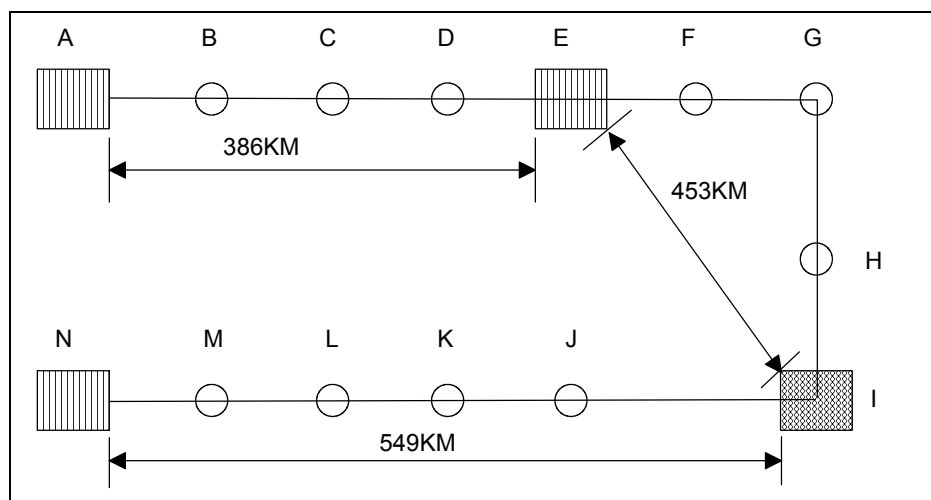


图4-26 考虑光源色散受限距离的组网图

4.5.3 组网图（考虑光放大器功率，划分网络的光中继段）

根据ITU-T和国家相关建议，DWDM相邻两站间的中继距离可规定到80km、100km、120km、160km4种，160km规格只应用于无线路放大器（光中继站）的情况。对于有线路放大器的情况，虽一般建议不超出120km（33dB），但只要光放大器功率和OSNR等指标满足要求，仍可应用大于120km（33dB）的组网方式。在有线路放大器的应用中，一般光放大器的总发送功率不大于+20dBm（16波长系统的单波长光功率为+8dBm），前置放大器的单波长接收光功率不小于-30dBm，（16波系统）两站点间的距离一般应小于139km（38dB/0.275DB/km）。

图4-26中I---J两站点间的距离为176km，超出光放大器的要求；其它两相邻站点间的距离基本符合光放大器的要求。因此要在I---J两相邻站点间添加光中继站，将I---J划分为两段中继段。如图4-27所示，添加X站点后可满足光放大器的要求。

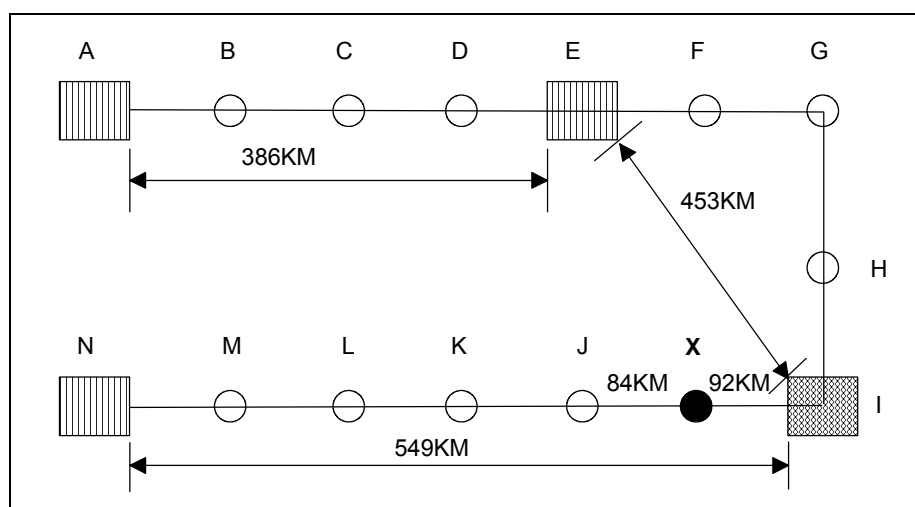


图4-27 考虑光放大器功率的组网图

4.5.4 组网图（考虑OSNR）

网络对OSNR要求与组网方式有关。对按图4-26组网后的各再生段的接收端的OSNR计算可得：从A---E----I----N方向，OSNR值分别为

E点：OSNR=21.8dB

I点：OSNR=20.4dB

N点：OSNR=20.7dB

满足网络对OSNR的要求。因此网络结构保持不变，如图4-28所示。

（当OSNR满足不了网络要求时，应参考光源色散受限距离将再生段重新划分，最终使网络满足色散受限距离、OSNR、光功率预算三方面的要求。光纤非线性虽然也是光传输的受限因素之一，但在满足建议规格的应用条件下，可完全忽略这方面的限制）。

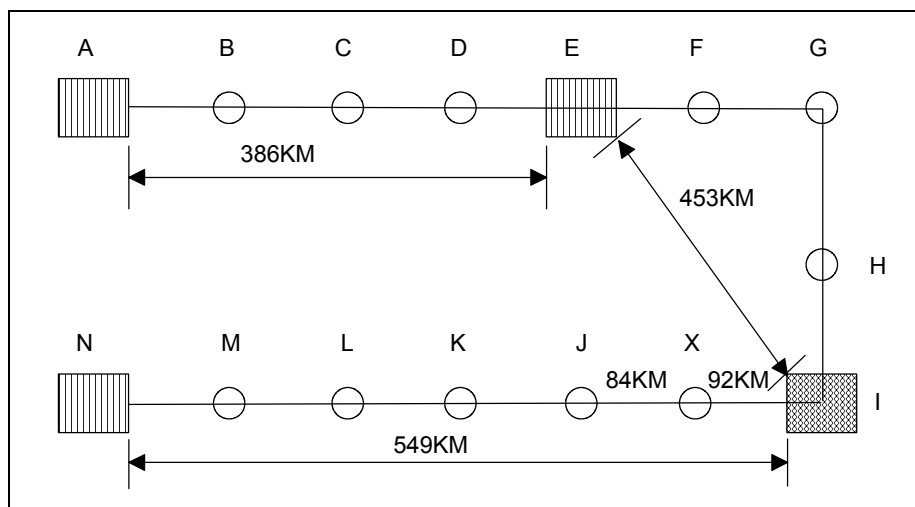


图4-28 考虑OSNR的组网图