

目 录

第 8 章 DWDM 网元类型、网络拓扑及保护.....	8-1
8.1 DWDM 网元类型	8-1
8.1.1 光终端复用设备	8-1
8.1.2 光线路放大设备	8-2
8.1.3 光分插复用设备	8-2
8.1.4 电中继设备	8-4
8.2 DWDM 网络的物理拓扑	8-5
8.2.1 点到点组网	8-5
8.2.2 链形组网	8-5
8.2.3 环形组网	8-5
8.3 DWDM 组网考虑的要素	8-7
8.3.1 色散	8-7
8.3.2 光功率.....	8-8
8.3.3 光信噪比	8-8
8.3.4 非线性效应	8-10
8.4 DWDM 网络保护	8-15
8.4.1 光通道保护	8-15
8.4.2 光线路保护	8-16
8.4.3 网络管理信息通道备份	8-16

插图目录

图 8-1 OTM 信号流向图8-1

图 8-2 OLA 信号流向图8-2

图 8-3 静态 OADM 信号流向图8-3

图 8-4 两个 OTM 背靠背组成的 OADM 信号流向图8-3

图 8-5 电中继设备 REG 的信号流向图8-4

图 8-6 DWDM 的点ToPoint组网示意图8-5

图 8-7 DWDM 的链形组网示意图8-5

图 8-8 DWDM 的环形网示意图8-6

图 8-9 中继距离示意图8-8

图 8-10 窄带光源的 SBS 门限8-10

图 8-11 自相位调制引起传输脉冲的压缩和谱展宽8-12

图 8-12 三光波互作用产生的混频产物8-13

图 8-13 1+1 光通道保护8-15

图 8-14 1: n 光通道保护8-16

图 8-15 光线路保护8-16

图 8-16 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）8-17

图 8-17 网络管理信息通道备份示意图（正常时）8-17

图 8-18 网络管理信息通道备份示意图（主信道失效时）8-18

第8章 DWDM 网元类型、网络拓扑及保护

8.1 DWDM 网元类型

DWDM 网元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。以下以 OptiX BWS 320G 设备为例分别讲述各种网络单元在网络中所起的作用。

8.1.1 光终端复用设备

在发送方向，光终端复用设备（OTM）把波长为 $\lambda_1 \sim \lambda_{32}$ 的 32 个信号经复用器复用成一个 DWDM 主信道信号，然后对其进行光放大，并附加上波长为 λ_s 的光监控通道（OSC）信号。

在接收方向，OTM 先把光监控通道信号取出，然后对 DWDM 主信道信号进行光放大，经解复用器解复用成 32 个波长的信号。

OTM 的信号流向如图 8-1 所示。

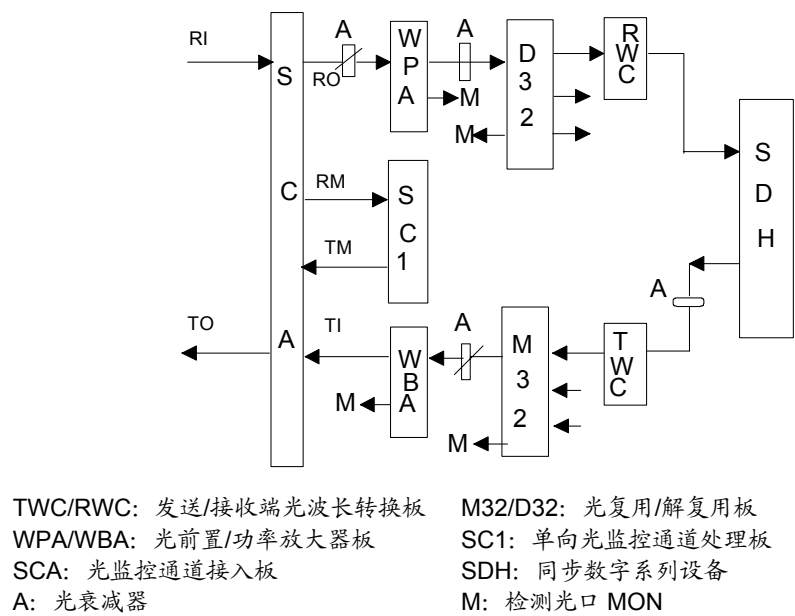
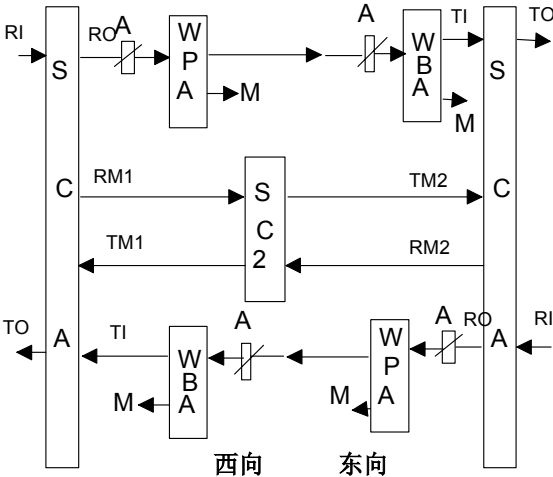


图8-1 OTM 信号流向图

8.1.2 光线路放大设备

DWDM 系统的光线路放大设备（OLA）在每个传输方向均配有一个光线路放大器。在每个传输方向先取出光监控通道信号并处理，再将主信道信号进行放大，然后将主信道信号与光监控通道信号合并送入光纤线路。OLA 的信号流向如图 8-2所示。



SC2: 双向光监控通道处理板

图8-2 OLA 信号流向图

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。

8.1.3 光分插复用设备

DWDM 系统的光分插复用设备（OADM）有两种类型，一种是采用静态上/下波长的 OADM 模块，另一种是两个 OTM 采用背靠背的方式组成一个可上/下波长的 OADM 设备。

1. DWDM 系统静态光分插复用设备

当 OADM 设备接收到线路的光信号后，先从中提取光监控通道信号，再用 WPA 将主光通道信号预放大，通过 ADD/DROP 单元从主光通道中按波长取下一定数量的波长通道后送出设备，要插入的波长经 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通道信号，向远端传输。在本站下业务的通道，需经 RWC 与 SDH 设备相连，在本站上业务的通道，需经 TWC 与 SDH 设备相连。

以 OADM（上/下四通道）为例，其信号流向如图 8-3所示。

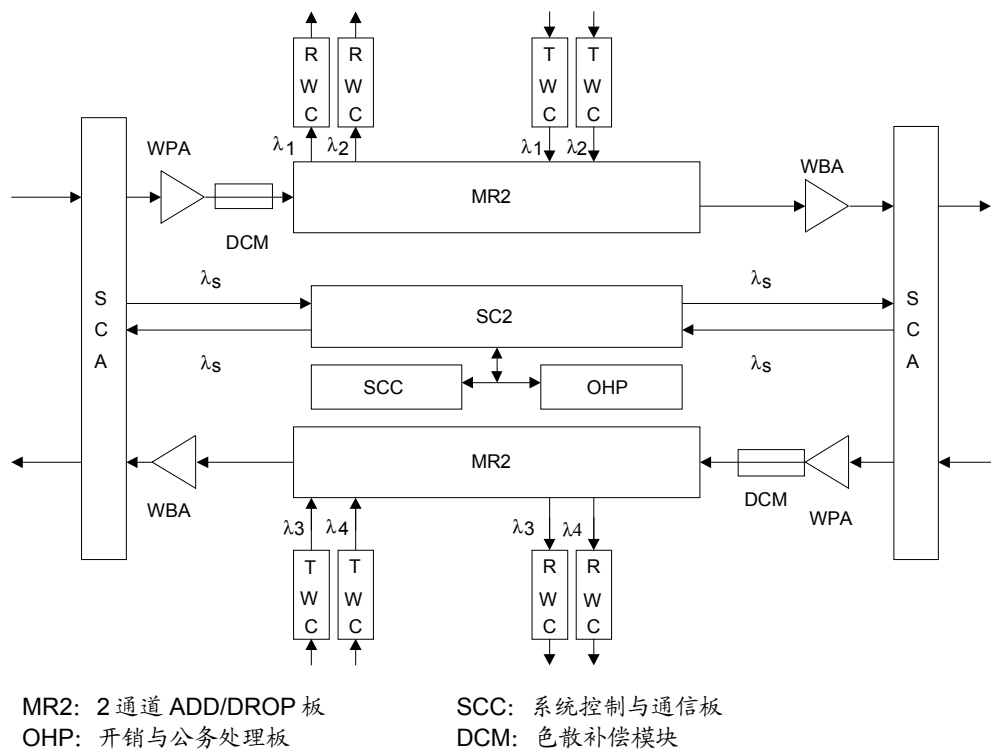


图8-3 静态 OADM 信号流向图

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。这种方式较之静态 OADM 要灵活，可任意上/下 1 到 32 个波长，更易于组网。如果某一路信号不在本站上下，可以从 D32 的输出口直接接入同一波长的 TWC 再进入另一方向的 M32 板。

两个 OTM 背靠背组成的 OADM 的信号流向如图 8-4 所示。

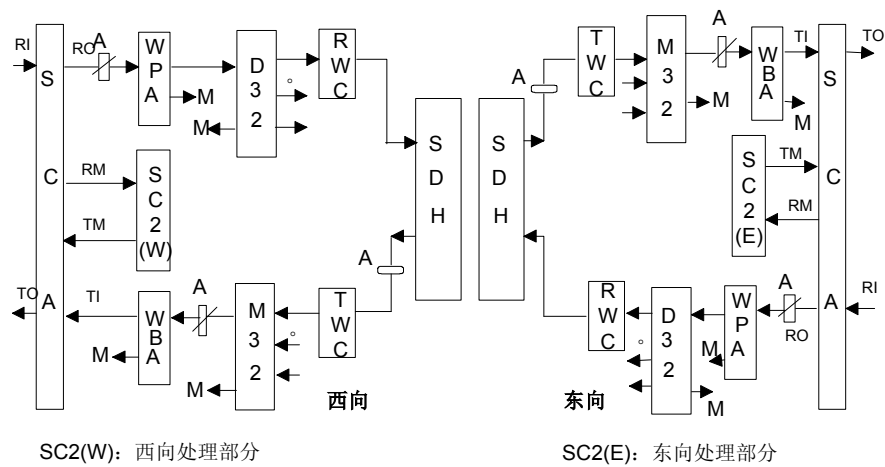


图8-4 两个 OTM 背靠背组成的 OADM 信号流向图

8.1.4 电中继设备

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8-5所示。

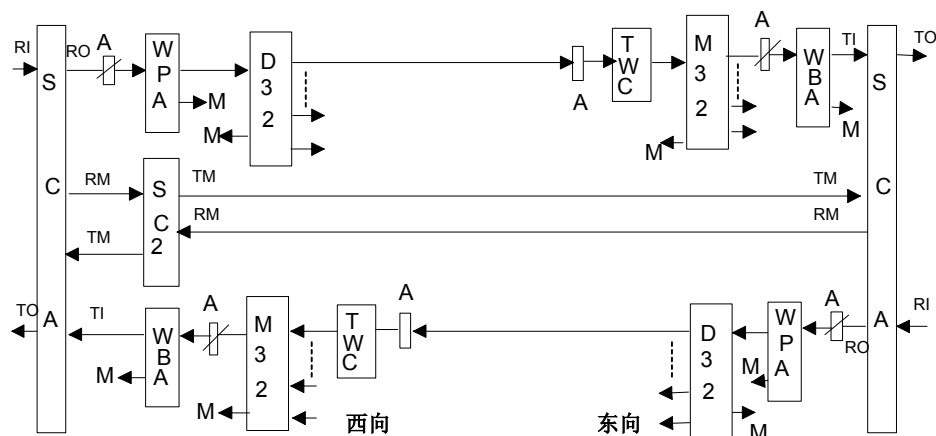


图8-5 电中继设备 REG 的信号流向图

8.2 DWDM 网络的物理拓扑

DWDM 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较复杂的网络形式。与 SDH 设备组合，可组成十分复杂的光传输网络。

8.2.1 点到点组网

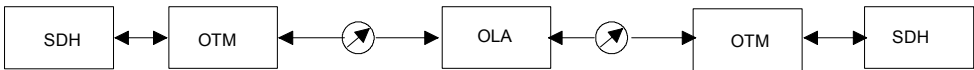


图8-6 DWDM 的点到点组网示意图

8.2.2 链形组网

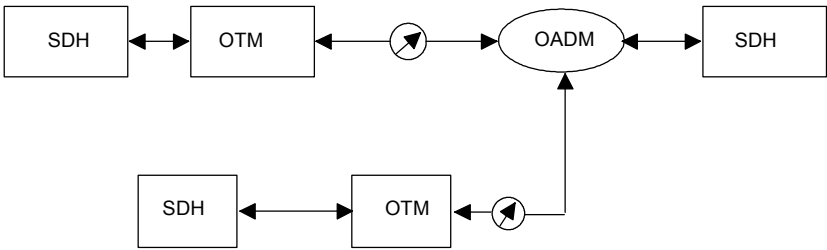


图8-7 DWDM 的链形组网示意图

8.2.3 环形组网

在本地网特别是城域网的应用中，用户根据需要可以由 DWDM 的光分插复用设备构成环形网。环形组网如图 8-8 所示。

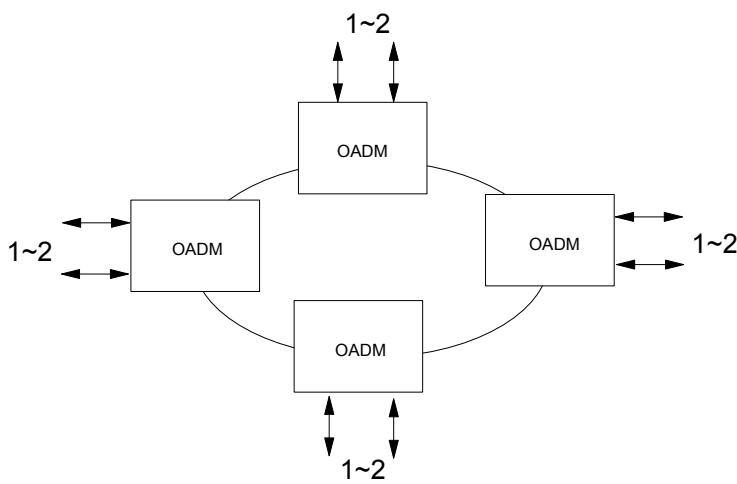


图8-8 DWDM 的环形网示意图

8.3 DWDM 组网考虑的因素

8.3.1 色散

1. 色散效应描述

色度色散是由发送光源光谱特性所导致的制约传输距离的一个支配性因素。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。

2. 传输距离的限制

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。虽然在光放大器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，但这些光纤长度仅在数十米至数百米数量级。由于掺稀土光纤的单位长度色度色散与 ITU-T 建议 G.652 所规范的光纤差别不大，因此相对几十至数百公里长的线路光纤来说，光放大器引入的色散影响可忽略不计。但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信号传输距离，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。

3. 减小影响的方法

无源色散补偿器件可同光放大器组合在一起，构成一个光放大子系统，光放大器可以弥补无源色散补偿器件的插入损耗。该子系统会给系统附加有限的色度色散，但其色散系数与系统光纤相反，这就会使系统总的色度色散减小。另外，采用 G.655 光纤和 G.653 光纤对减小色度色散是有利的。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，整个网络的性能可以容忍色散的影响。

8.3.2 光功率

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

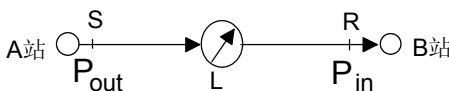


图8-9 中继距离示意图

如上图所示，A 站点为发送参考点 S，B 站点为接收参考点 R，S 点与 R 点间的距离为 L，则：

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

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

P_{in} ：为 R 点的单通道最小允许输入功率（单位为 dBm）。

a ：为光缆每公里损耗（dB/km）（根据 ITU-T 建议，取 0.275dB/km，0.275dB/km 已包含光纤接头、冗余度等各种因素的影响）。

8.3.3 光信噪比

1. 噪声产生原理

光放大器会在几十纳米宽的光谱区内产生所谓放大的自发辐射（ASE），这个 ASE 对信号光来说就是一个噪声。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周期性的衰减和放大。因为输入光放大器的 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加而大致按比例增大，而信号功率则随之减小，最后，噪声功率可能超过信号功率。

ASE 噪声频谱分布也是沿系统纵向展开的。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：

$$\text{OSNR} = \text{单位带宽内每通道的信号光功率} / \text{单位带宽内每通道的噪声光功率}$$

2. 传输限制

ASE 噪声积累对系统的 OSNR 有影响，因为接收信号 OSNR 劣化的主要原因是与 ASE 有关的差拍噪声，这种差拍噪声随级联光放大器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，OSNR 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。下面的滤波技术可进一步减小 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，这种方法是最有效的。

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。

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通带）。

8.3.4 非线性效应

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。在 1550nm 处散射光频率大约向下移动 11GHz。

SBS 效应具有一个最低门限功率。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，但与通道数无关。

(2) 传输限制

SBS 极大地限制了光纤中可以传输的光功率。图 8-10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。

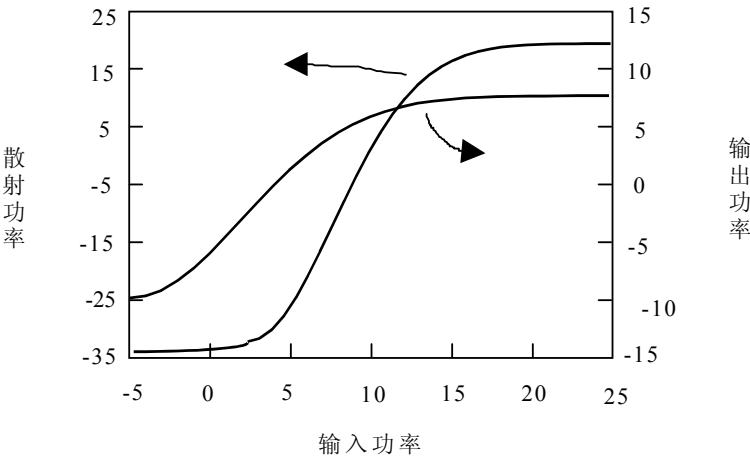


图8-10 窄带光源的 SBS 门限

(3) 减小影响的方法

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

受激拉曼散射是和光与二氧化硅分子振动模式间相互作用有关的宽带效应。受激拉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拉曼位移光的一个拉曼泵。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

在单通道和多通道系统中都可能发生受激拉曼散射。仅有一个单通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。然而在光谱范围较宽的多通道系统中，波长较短的信号通道由于受激拉曼散射影响使得一部分功率转移到波长较长的信号通道中，从而可能引起信噪比性能的劣化。在 G.653 光纤上，系统的受激拉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 对单通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) 减小影响的方法

在单通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，还没有报道在多通道系统中用来消除 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拉曼射效应的影响。不过在目前实施的经过认真设计的 DWDM 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相位调制，这种效应叫做自相位调制。在单通道系统中，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 8-11 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更大的时域展宽。不过在反常色散区，光纤的色度色散效应和自相位调制效应能够互相补偿，使信号展宽变小。

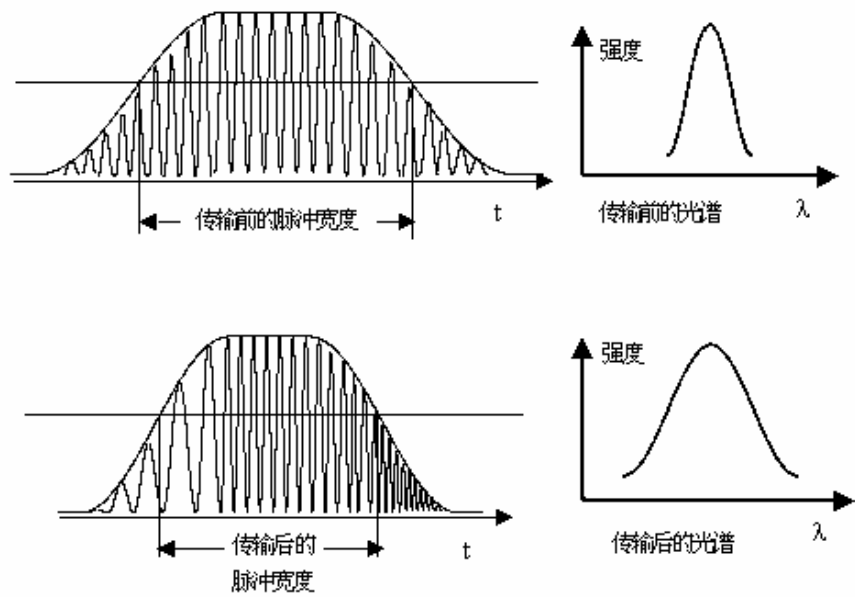


图8-11 自相位调制引起传输脉冲的压缩和谱展宽

(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。工作在正常色散区的色散受限系统可能不能容忍自相位调制效应。在通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通道间产生干扰。

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 8-11 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；同时也可以说明频谱展宽。

(3) 减小影响的方法

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小自相位调制效应的影响。对于使用 G.652 光纤且长度小于 1000km 的系统，可以在适当的间隔处进行色散补偿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

在多通道系统中，当光强度的变化导致相位变化时，由于相邻通道间的相互作用，互相位调制一般会展宽信号频谱。XPM 引起的频谱展宽度与通道间隔及光纤色散有关，因为色散引起的差分群速会导致沿光纤传播的相互作用的

脉冲分离。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 引起的展宽会导致多通道系统中相邻通道间的干扰。

(3) 减小影响的方法

XPM 可通过选择适当的通道间隔的方法加以控制。研究表明，XPM 引起的多通道系统信号失真只发生于相邻通道。因此，信号因通道之间有适当的间隔而使 XPM 影响可忽略不计。在对每通道功率为 5mW 的系统进行的模拟试验中，已证实 100GHz 的通道间隔足以减小 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现象。这种相互作用可能发生于多通道系统的各信号之间、EDFA 的自发辐射噪声与信号通道之间或单通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 8-12 所示。

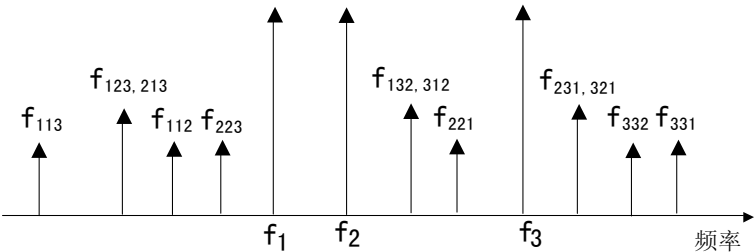


图8-12 三光波相互作用产生的混频产物

当通道间隔相等时，这些产物会恰恰落入相邻的信号通道之中。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会产生参量干扰，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。

参量干扰导致接收机输出眼图的闭合，致使比特差错率（BER）性能劣化。依靠频率间隔和色度色散对互作用光波之间相位匹配的破坏作用可减小 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，若信号通道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。

四波混频可能对使用 G.653 光纤的多通道系统造成严重的系统损伤，因为信号只经历一个很小的色度色散。在单通道系统中，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机的主模与边模之间。积累的 ASE 通过非线性折射率效应将相位噪声叠加在信号载波上，从而使信号频谱尾部变宽。

(3) 减小影响的方法

如前面指出的那样，G.655 或 G.652 光纤的色散可用于抑制 FWM 边带的产生。还可安排不均匀的通道间隔，以缓解 FWM 损伤的严重程度。降低 G.653 光纤系统的功率电平，可允许多通道运行，但这会削弱光放大的优势。

为了适当抑制混频产物，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。还证实了一些采用较小有限色散的长光纤段和色散相反且较大的短段光纤（提供补偿）的类似方法。

8.4 DWDM 网络保护

由于 DWDM 系统承载的业务量很大，因此安全性特别重要。

DWDM 网络主要有两种保护方式：一种是基于光通道的 1+1 或 1:n 的保护。另一种是基于光线路的保护。

8.4.1 光通道保护

1. 1+1 光通道保护

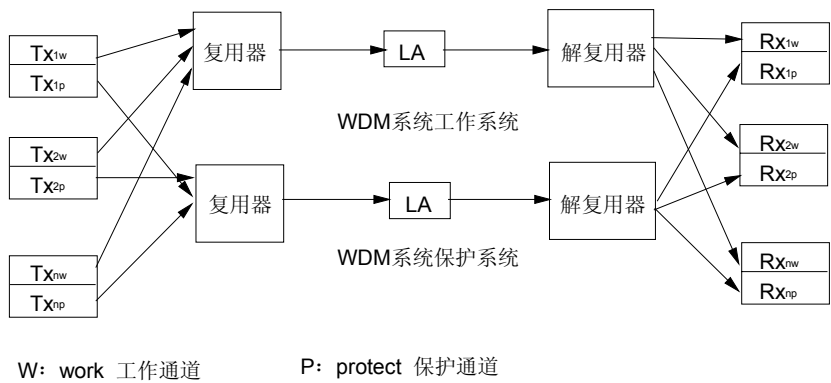


图8-13 1+1 光通道保护

如图 8-13所示。这种保护机制与 SDH 系统的 1+1 复用段保护类似，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，但是成本也比较高。

在一个 DWDM 系统内，每一个光通道的倒换与其它通道的倒换没有关系，即工作系统里的 Tx_1 出现故障倒换至保护系统时， Tx_2 可继续工作在工作系统上。

2. 1:n 光通道保护

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 系统内的空闲波长通道作为保护通路。

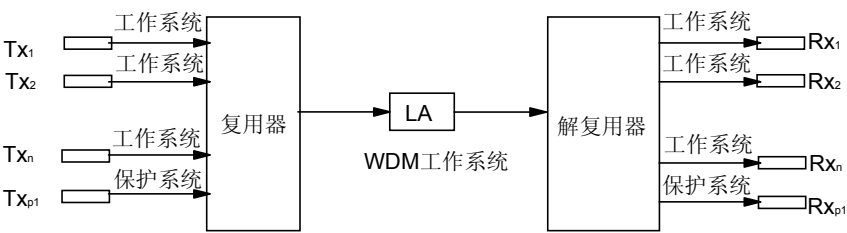


图8-14 1: n 光通道保护

如图 8-14所示为 $n+1$ 路的 DWDM 系统，其中 n 个波长通道作为工作波长，一个波长通道作为保护系统。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。

8.4.2 光线路保护

如图 8-15所示。在发射端和接收端分别使用 1: 2 光分路器和光开关，或采用其它手段，在发送端对合路的光信号进行功率分配，在接收端，对两路输入光信号进行优选。

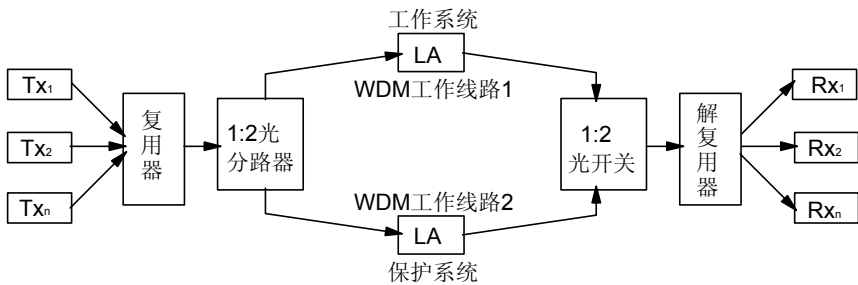


图8-15 光线路保护

这种技术只在线路上进行 1+1 保护，而不对终端设备进行保护，只有光缆和 DWDM 的线路系统（如光线路放大器）是备份的，而 DWDM 系统终端站的 SDH 终端和复用器等则是没有备份的。相对于 1+1 光通道保护，光线路保护降低了成本。

光线路保护只有在具有不同路由的两条光缆中实施时才有实际意义。

8.4.3 网络管理信息通道备份

在 DWDM 传输网中，网络管理信息一般是通过光监控通道传送的，若光监控通道与主信道采用同一物理通道，这样在主信道失效时，光监控通道也往往同时失效，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通道传送，这时不影响对整个网络的管理。如图 8-16所示为环形组网时网络管理信息通道的自动备份方式。

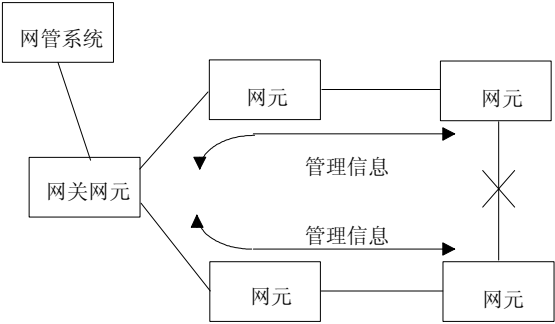


图8-16 环形组网时网络管理信息通道备份示意图（某段传输失效时）

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，例如，通过数据通信网。

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 8-17所示。

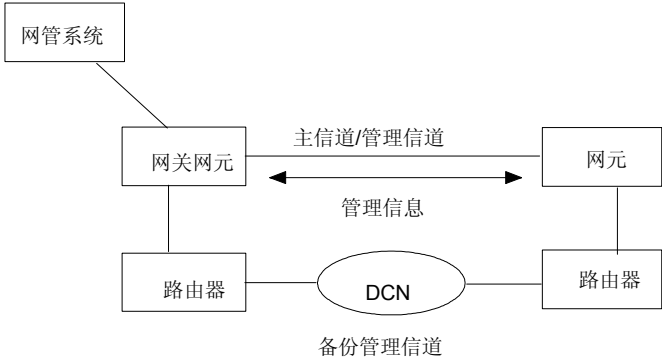


图8-17 网络管理信息通道备份示意图（正常时）

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图如图 8-18所示。

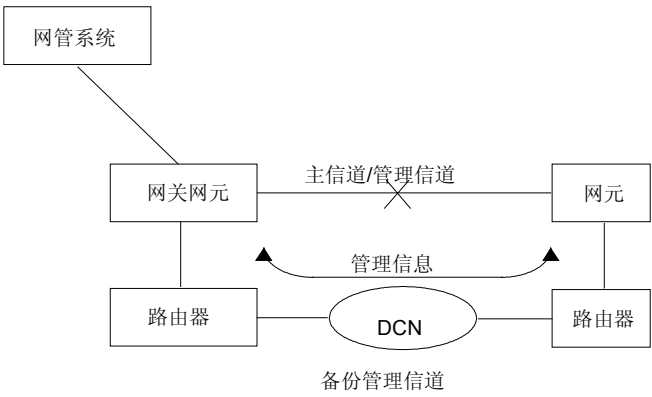


图8-18 网络管理信息通道备份示意图（主信道失效时）

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。