

## 第一章 全光通信技术

关键词: DWDM, 全光通信, CDMA2000, TD-SCDMA, CDPD, GPRS,

摘要: 全光通信技术也是一种光纤通信技术,它是针对普通光纤系统中存在着较多的电子转换设备而进行改进的技术,该技术确保用户与用户之间的信号传输与交换全部采用光波技术,即数据从源节点到目的节点的传输过程都在光域内进行,而其在各网络节点的交换则采用全光网络交换技术。

20 世纪末出现的因特网标志着人类社会进入到一个崭新的时代——信息化时代,在这个时代人们对信息的需求急剧增加,信息量象原子裂变一样呈爆炸式增长,传统的通信技术已经很难满足不断增长的通信容量的要求。于是一些新兴的通信技术就应运而生了,例如 CDPD 技术、CDMA2000 技术、GPRS 技术以及光通信技术,在这些通信技术中,光通信技术凭借其巨大潜在带宽容量的特点,成为支撑通信业务量增长最重要的通信技术之一。但在目前的光纤通信系统中,存在着较多的光-电、电-光变换过程,而这些转换过程存在着时钟偏移、严重串话、高功耗等缺点,很容易产生通信中的“信息瓶颈”现象。为了解决这一问题,充分发挥光纤通信的极宽频带、抗电磁干扰、保密性强、传输损耗低等优点,于是全光通信技术就“隆重登场”了。

### 一、什么是全光通信

首先要声明一点的是,全光通信技术也是一种光纤通信技术,该技术是针对普通光纤系统中存在着较多的电子转换设备而进行改进的技术,该技术确保用户与用户之间的信号传输与交换全部采用光波技术,即数据从源节点到目的节点的传输过程都在光域内进行,而其在各网络节点的交换则采用全光网络交换技术。全光通信的实现,可以分为两个阶段来完成:首先是在点-点光纤传输系统中,整条线路中间不需要作任何光/电和电/光的转换,这样,网内光信号的流动就没有光电转换的障碍,信息传递过程无需面对电子器件速率难以提高的困难。这样的长距离传输完全靠光波沿光纤传播,称为发端与收端间点-点全光传输。那么整个光纤通信网任一用户地点应该可以设法做到与任一其它用户地点实现全光传输,这样就组成全光传送网;其次在完成上述用户间全程光传送网后,有不少的信号处理、储存、交换,以及多路复用/分接、进网/出网等功能都要由电子技术转变成光子技术完成,整个通信网将由光实现传输以外的许多重要功能,完成端到端的光传输、交换和处理等,这就形成了全光通信发展的第二阶段,将是更完整

的全光通信。

全光通信网由全光内部部分和通用网络控制部分组成，内部全光网是透明的，能容纳多种业务格式，网络节点可以通过选择合适的波长进行透明的发送或从别的节点处接收。通过对波长路由的光交叉设备进行适当配置，透明光传输可以扩展到更大的距离。外部控制部分可实现网络的重构，使得波长和容量在整个网络内动态分配以满足通信量、业务和性能需求的变化，并提供一个生存性好、容错能力强的网络。

## 二、全光通信的实现技术

实现透明的、具有高度生存性的全光通信网是宽带通信网未来发展目标，而要实现这样的目标需要有先进的技术来支撑，下面就是实现准确、有效、可靠的全光通信应采用的技术：

1、光层开销处理技术：该技术是用信道开销等额外比特数据从外面包裹 Och 客户信号的一种数字包封技术，它能在光层具有管理光信道（Och）的 OAM（操作、管理、维护）信息的能力和执行光信道性能监测的能力，该技术同时为光网络提供所有 SONET/SDH 网所具有的强大管理功能和高可靠性保证。

2、光监控技术：在全光通信系统中，必须对光放大器等器件进行监视和管理。一般技术采用额外波长监视技术，即在系统中再分插一个额外的信道传送监控信息。而光监控技术采用 1510nm 波长，并且对此监控信道提供 ECC 的保护路由，当光缆出现故障时，可继续通过数据通信网（DCN）传输监控信息。

3、信息再生技术：大家知道，信息在光纤通道中传输时，如果光纤损耗大和色散严重将会导致最后的通信质量很差，损耗导致光信号的幅度随传输距离按指数规律衰减，这可以通过全光放大器来提高光信号功率。色散会导致光脉冲发生展宽，发生码间干扰，使系统的误码率增大，严重影响了通信质量。因此，必须采取措施对光信号进行再生。目前，对光信号的再生都是利用光电中继器，即光信号首先由光电二极管转变为电信号，经电路整形放大后，再重新驱动一个光源，从而实现光信号的再生。这种光电中继器具有装置复杂、体积大、耗能多的缺点。而最近，出现了全光信息再生技术，即

在光纤链路上每隔几个放大器的距离接入一个光调制器和滤波器，从链路传输的光信号中提取同步时钟信号输入到光调制器中，对光信号进行周期性同步调制，使光脉冲变窄、频谱展宽、频率漂移和系统噪声降低，光脉冲位置得到校准和重新定时。全光信息再生技术不仅能从根本上消除色散等不利因素的影响，而且克服了光电中继器的缺点，成为全光信息处理的基础技术之一。

4、动态路由和波长分配技术：给定一个网络的物理拓扑和一套需要在网络上建立的端到端光信道，而为每一个带宽请求决定路由和分配波长以建立光信道的问题也就是波长选路由和波长分配问题（RWA）。目前较成熟的技术有最短路径法、最少负荷法和交替固定选路法等。根据节点是否提供波长转换功能，光通路可以分为波长通道（WP）和虚波长通道（VWP）。WP可看作VWP的特例，当整个光路都采用同一波长时就称其为波长通道反之是虚波长通道。在波长通道网络中，由于给信号分配的波长通道是端到端的，每个通路与一个固定的波长关联，因而在动态路由和分配波长时一般必须获得整个网络的状态，因此其控制系统通常必须采用集中控制方式，即在掌握了整个网络所有波长复用段的占用情况后，才可能为新呼叫选一条合适的路由。这时网络动态路由和波长分配所需时间相对较长。而在虚波长通道网络中，波长是逐个链路进行分配的，因此可以进行分布式控制，这样可以大大降低光通路层选路的复杂性和选路所需的时间但却增加了节点操作的复杂性。由于波长选路所需的时间较长，近期提出了一种基于波长作为标记的多协议波长标记交换（MPLS）的方案，它将光交叉互联设备视为标记交换路由器进行网络控制和管理。在基于MPLS的光波长标记交换网络中的光路由器有两种：边界路由器和核心路由器。边界路由器用于与速率较低的网络进行业务接入，同时电子处理功能模块完成MPLS中较复杂的标记处理功能，而核心路由器利用光互联和波长变换技术实现波长标记交换和上下路等比较简单的光信号处理功能。它可以更灵活地管理和分配网络资源，并能较有效地实现业务管理及网络的保护、恢复。

5、光时分多址（OTDMA）技术：该技术是在同一光载波波长上，把时间分割成周期性的帧，每一个帧再分割成若干个时隙（无论帧或时隙都是互不重叠的），然后根据一定的时隙分配原则，使每个光网络单元（ONU）在每帧内只按指定的时隙发送信号，然后利用全光时分复用方法在光功率分配器中合成一路光时分脉冲信号，再经全光放大器放大后送入光纤中传输。在交换局，利用全光时分分解复用。为了实现准确、可靠的光时分多址通信，避免各ONU向上游发送的码流在光功率分配器合路时可能发生碰撞，光交换局必须测定它与各ONU的距离，并在下行信号中规定光网络单元（ONU）的严格发

送定时。

6、光突发数据交换技术：该技术是针对目前光信号处理技术尚未足够成熟而提出的，在这种技术中有两种光分组技术：包含路由信息的控制分组技术和承载业务的数据分组技术。控制分组技术中的控制信息要通过路由器的电子处理，而数据分组技术不需光电/电光转换和电子路由器的转发，直接在端到端的透明传输信道中传输。

7、光波分多址（WDMA）技术：该技术是将多个不同波长且互不交叠的光载波分配给不同的光网络单元（ONU），用以实现上行信号的传输，即各 ONU 根据所分配的光载波对发送的信息脉冲进行调制，从而产生多路不同波长的光脉冲，然后利用波分复用方法经过合波器形成一路光脉冲信号来共享传输光纤并送入到光交换局。在 WDMA 系统中为了实现任何允许节点共享信道的多波长接入，必须建立一个防止或处理碰撞的协议，该协议包括固定分配协议、随机接入协议（包括预留机制、交换和碰撞预留技术）及仲裁规程和改装发送许可等。

8、光转发技术：在全光通信系统中，对光信号的波长、色散和功率等都有特殊的要求，为了满足 ITU-T 标准规范，必须采用光-电-光的光转发技术对输入的信号光进行规范，同时采用外调制技术克服长途传输系统中色散的影响。光纤传输系统所用的光转发模块主要有直接调制的光转发模块和外调制的光转发模块两种。外调制的光转发模块包括电吸收（EA）调制和 LiNbO<sub>3</sub> 调制等。在光纤传输系统中，选用那种光发模块要根据实际传输距离和光纤的色散情况而定。在全光通信系统中，可以采用多种调制类型的光转发模块，色散容限有 1800/4000/7200/12800ps/nm 等诸多选择，满足不同的传输距离的需求，为用户提供从 1km 至 640km 各种传输距离的最佳性能价格比解决方案，并且光转发单元发射部分的波长稳定度在 0~60° C 范围内小于 ±3GHz。

9、副载波多址（SCMA）技术：该技术的基本原理是将多路基带控制信号调制到不同频率的射频（超短波到微波频率）波上，然后将多路射频信号复用后再去调制一个光载波。在 ONU 端进行二次解调，首先利用光探测器从光信号中得到多路射频信号，并从中选出该单元需要接收的控制信号，再用电子学的方法从射频波中恢复出基带控制信号。在控制信道上使用 SCMA 接入，不仅可降低网络成本，还可解决控制信道的竞争。

10、空分光交换技术：该技术的基本原理是将光交换元件组成门阵列开关，并适当控制门阵列开关，即可在任一路输入光纤和任一输出光纤之间构成通路。因其交换元件的不同可分为机械型、光电转换型、复合波导型、全反射型和激光二极管门开关等，如耦合波导型交换元件铌酸钾，它是一种电光材料，具有折射率随外界电场的变化而发生变化的光学特性。以铌酸钾为基片，在基片上进行钛扩散，以形成折射率逐渐增加的光波导，即光通路，再焊上电极后即可将它作为光交换元件使用。当将两条很接近的波导进行适当的复合，通过这两条波导的光束将发生能量交换。能量交换的强弱随复合系数。平行波导的长度和两波导之间的相位差变化，只要所选取的参数适当，光束就在波导上完全交错，如果在电极上施加一定的电压，可改变折射率及相位差。由此可见，通过控制电极上的电压，可以得到平行和交叉两种交换状态。

11、光放大技术：为了克服光纤传输中的损耗，每传输一段距离，都要对信号进行电的“再生”。随着传输码率的提高，“再生”的难度也随之提高，成了信号传输容量扩大的“瓶颈”。于是一种新型的光放大技术就出现了，例如掺铒光纤放大器的实用化实现了直接光放大，节省了大量的再生中继器，使得传输中的光纤损耗不再成为主要问题，同时使传输链路“透明化”，简化了系统，成几倍或几十倍地扩大了传输容量，促进了真正意义上的密集波分复用技术的飞速发展，是光纤通讯领域上的一次革命。

12、时分光交换技术：该技术的原理与现行的电子程控交换中的时分交换系统完全相同，因此它能与采用全光时分多路复用方法的光传输系统匹配。在这种技术下，可以时分复用各个光器件，能够减少硬件设备，构成大容量的光交换机。该技术组成的通信技术网由时分型交换模块和空分型交换模块构成。它所采用的空分交换模块与上述的空分光交换功能块完全相同，而在时分型光交换模块中则需要有光存储器（如光纤延迟存储器、双稳态激光二极管存储器）、光选通器（如定向复合型阵列开关）以进行相应的交换。

13、无源光网技术（PON）：无源光网技术多用于接入网部分。它以点对多点方式为光线路终端（OLT）和光网络单元（ONU）之间提供光传输媒质，而这又必须使用多址接入技术。目前使用中的有时分多址接入（TDMA）、波分复用（WDM）、副载波多址接入（SCMA）3种方式。PON中使用的无源光器件有光纤光缆、光纤接头、光连接器、光分路器、波分复用器和光衰减器。拓扑结构可采用总线形、星形、树形等多种结构。

## 第二章 WDM 波分复用技术讲座

### 第一讲 WDM 技术的基本原理

目前，WDM（波分复用）技术发展十分迅速，已展现出巨大的生命力和光明的发展前景，我国的光缆干线和一些省内干线已开始采用 WDM 系统，并且国内一些厂商也正在开发这项技术。为帮助读者了解和熟悉这一新技术，我们组织了该系列讲座。第一讲是 WDM 技术的基本原理；第二讲介绍 WDM 系统中应用的光电器件的种类及其主要原理，以及它们的应用情况；第三讲介绍 WDM 系统的技术规范，特别是信息产业部刚刚制定发布的  $16(8) \times 2.5\text{Gb/s}$  WDM 系统规范，并予以较详细的说明；第四讲主要是关于 WDM 系统管理方面的要求，以及 WDM 和 SDH 网管系统的关系；第五讲是关于 WDM 系统测试方法和相关仪表；第六讲主要探讨采用 OADM 组环的技术，另外还将讨论基于 OXC 和 OADM 的全光网技术。

#### 1 概述

在过去 20 年里，光纤通信的发展超乎了人们的想象，光通信网络也成为现代通信网的基础平台。就我国长途传输网而言，截止到 1998 年底，省际干线光缆长度已接近 20 万 km。光纤通信系统经历了几个发展阶段，从 80 年代末的 PDH 系统，90 年代中期的 SDH 系统，以及近来风起云涌的 WDM 系统，光纤通信系统自身在快速地更新换代。

波分复用技术从光纤通信出现伊始就出现了，两波长 WDM（1310 / 1550nm）系统 80 年代就在美国 AT&T 网中使用，速率为  $2 \times 1.7\text{Gb/s}$ 。但是到 90 年代中期，WDM 系统发展速度并不快，主要原因在于：（1）TDM（时分复用）技术的发展， $155\text{Mb/s}$ — $622\text{Mb/s}$ — $2.5\text{Gb/s}$  TDM 技术相对简单。据统计，在  $2.5\text{Gb/s}$  系统以下（含  $2.5\text{Gb/s}$  系统），系统每升级一次，每比特的传输成本下降 30% 左右。正由于此，在过去的系统升级中，人们首先想到并采用的是 TDM 技术。（2）波分复用器件还没有完全成熟，波分复用器 / 解复用器和光放大器在 90 年代初才开始商用化。

1995 年开始，WDM 技术的发展进入了快车道，特别是基于掺铒光纤放大器 EDFA 的 1550nm 窗口密集波分复用（DWDM）系统。Lucent 率先推出  $8 \times 2.5\text{Gb/s}$  系统，Ciena 推出了  $16 \times 2.5\text{Gb/s}$  系统，试验室目前已达  $\text{Tb/s}$  速率，世界上各大设备生产厂商和运营公司都对这一技术的商用化表现出极大的兴趣，WDM 系统在全球范围内有了较广泛

的应用。发展迅速的主要原因在于：（1）光电器件的迅速发展，特别是 EDFA 的成熟和商用化，使在光放大器（1530~1565nm）区域采用 WDM 技术成为可能。（2）TDM10Gb / s 面临着电子元器件的挑战，利用 TDM 方式已日益接近硅和砷镓技术的极限，TDM 已没有太多的潜力可挖，并且传输设备的价格也很高。（3）已敷设 G. 652 光纤 1550nm 窗口的高色散限制了 TDM10Gb / s 系统的传输，光纤色度色散和极化模色散的影响日益加重。人们正越来越多地把兴趣从电复用转移到光复用，即从光域上用各种复用方式来改进传输效率，提高复用速率，而 WDM 技术是目前能够商用化最简单的光复用技术。

从光纤通信发展的几个阶段看，所应用的技术都与光纤密切相关。80 年代初期的多模光纤通信，所应用的是多模光纤的 850nm 窗口；80 年代末、90 年代初期的 PDH 系统，所应用的是单模光纤 1310nm 窗口；1993 年开始的 SDH 系统开始转向 1550nm 窗口；WDM 是在光纤上实行的频分复用技术，更是与光纤有着不可分割的联系。目前的 WDM 系统是在 1550nm 窗口实施的多波长复用技术，因而在深入讨论 WDM 技术以前，有必要讨论一下光纤的特性，特别是光纤的带宽和损耗特性。

## 2 光纤的基本特性

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，因而得到了广泛应用。从 80 年代末起，我国在国家干线上敷设的都是常规单模光纤。常规石英单模光纤同时具有 1550nm 和 1310nm 两个窗口，最小衰减窗口位于 1550nm 窗口。多数国际商用光纤在这两个窗口的典型数值为：1310nm 窗口的衰减在 (0.3~0.4) dB / km；1550nm 窗口的衰减在 (0.19~0.25) dB / km。

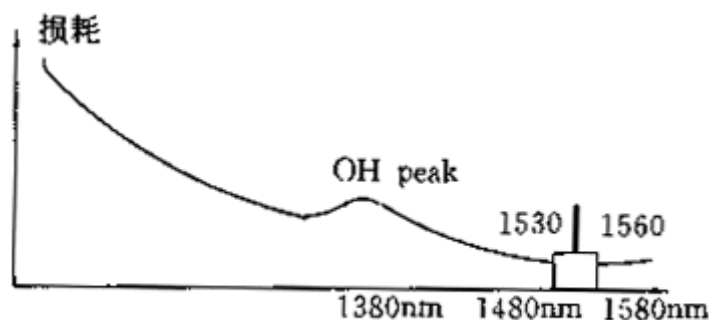


图 1 光纤损耗的频谱

从上图可以看出，除了在 1380nm 有一个 OH-根离子吸收峰导致损耗比较大外，其它区域光纤损耗都小于 0.5dB / km（据报道已有公司推出了 ALLWAVE 全波光纤，消除了这

一损耗峰峰值,使整个频带更加平坦)。现在人们所利用的只是光纤低损耗频谱(1310~1550nm)极少的一部分。以常规 SDH 2.5Gb/s 系统为例,在光纤的带宽中只占很小一部分,大约只有 0.02nm 左右;全部利用掺铒光纤放大器 EDFA 的放大区域带宽(1530~1565)nm 的 35nm 带宽,也只是占用光纤全部带宽(1310~1570nm)的 1/6 左右。

理论上,WDM 技术可以利用的单模光纤带宽达到 200nm,即 25THz 带宽,即使按照波长间隔为 0.8nm(100GHz)计算,理论上也可以开通 200 多个波长的 WDM 系统,因而目前光纤的带宽远远没有利用。WDM 技术的出现正是为了充分利用这一带宽,而光纤本身的宽带宽、低损耗特性也为 WDM 系统的应用和发展提供了可能。

### 3 WDM 技术原理

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,利用带通滤波器就可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,在接收端采用解复用器(等效于光带通滤波器)将各信号光载波分开。由于在光的频域上信号频率差别比较大,人们更喜欢采用波长来定义频率上的差别,因而这样的复用方法称为波分复用。所谓 WDM 技术就是为了充分利用单模光纤低损耗区带来的巨大带宽资源,根据每一信道光波的频率(或波长)不同可以将光纤的低损耗窗口划分成若干个信道,把光波作为信号的载波,在发送端采用波分复用器(合波器)将不同规定波长的信号光载波合并起来送入一根光纤进行传输。在接收端,再由一波分复用器(分波器)将这些不同波长承载不同信号的光载波分开的复用方式。由于不同波长的光载波信号可以看作互相独立(不考虑光纤非线性时),从而在一根光纤中可实现多路光信号的复用传输。双向传输的问题也很容易解决,只需将两个方向的信号分别安排在不同波长传输即可。根据波分复用器的不同,可以复用的波长数也不同,从 2 个至几十个不等,现在商用化的一般是 8 波长和 16 波长系统,这取决于所允许的光载波波长的间隔大小,图 2 给出了其系统组成。



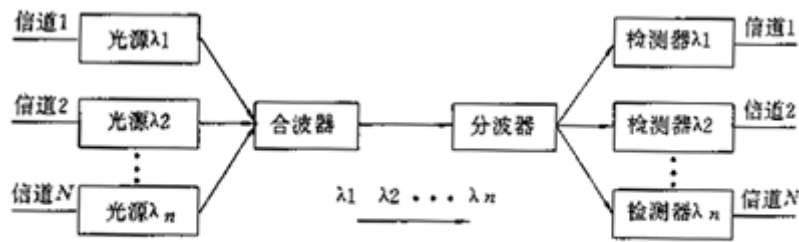


图2 波分复用系统原理

WDM 本质上是光域上的频分复用 (FDM) 技术。要想深刻理解 WDM 系统的本质, 有必要对传输技术的发展进行一下总结。从我国几十年应用的传输技术来看, 走的是 FDM-TDM-TDM+FDM 的路线。开始的明线、中同轴电缆采用的都是 FDM 模拟技术, 即电域上的频分复用技术, 每路语音的带宽为 4kHz, 每路语音占据传输媒质 (如同轴电缆) 一段带宽; PDH、SDH 系统则是在光纤上传输的 TDM 基带数字信号, 每路语音速率为 64kb / s; 而 WDM 技术是光纤上频分复用技术, 16 (8) × 2.5Gb / s 的 WDM 系统则是光域上的 FDM 模拟技术和电域上 TDM 数字技术的结合。

下面列出了几种传输技术实现方式:

- . 明线技术, FDM 模拟技术, 每路电话 4kHz;
- . 小同轴电缆 60 路 FDM 模拟技术, 每路电话 4kHz;
- . 中同轴电缆 1800 路 FDM 模拟技术, 每路电话 4kHz;
- . 光纤通信 140Mb / s PDH 系统, TDM 数字技术, 每路电话 64kb / s ;
- . 光纤通信 2.5Gb / s SDH 系统, TDM 数字技术, 每路电话 64kb / s;
- . 光纤通信  $N \times 2.5\text{Gb} / \text{s}$  WDM 系统, TDM 数字技术+光频域 FDM 模拟技术, 每路电话 64kb / s。

WDM 本质上是光域上的频分复用 FDM 技术, 每个波长通路通过频域的分割实现, 如图 3 所示。每个波长通路占用一段光纤的带宽, 与过去同轴电缆 FDM 技术不同的是: (1) 传输媒质不同, WDM 系统是光信号上的频率分割, 同轴系统是电信号上的频率分割利用。

(2) 在每个通路上, 同轴电缆系统传输的是模拟信号 4kHz 语音信号, 而 WDM 系统目前每个波长通路上是数字信号 SDH 2.5Gb / s 或更高速率的数字系统。

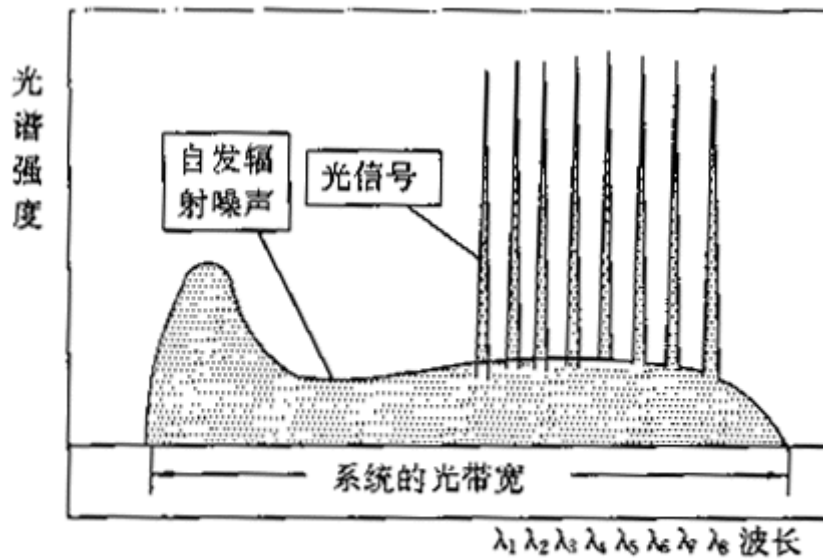


图3 WDM系统的频谱分布

#### 4 WDM技术的主要特点

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比单波长传输增加几倍至几十倍。

使N个波长复用起来在单模光纤中传输，在大容量长途传输时可以大量节约光纤。另外，对于早期安装的芯数不多的电缆，芯数较少，利用波分复用不必对原有系统作较大的改动即可比较方便地进行扩容。

由于同一光纤中传输的信号波长彼此独立，因而可以传输特性完全不同的信号，完成各种电信业务信号的综合和分离，包括数字信号和模拟信号，以及PDH信号和SDH信号的综合与分离。

波分复用通道对数据格式是透明的，即与信号速率及电调制方式无关。一个WDM系统可以承载多种格式的“业务”信号，ATM、IP或者将来有可能出现的信号。WDM系统完成的是透明传输，对于“业务”层信号来说，WDM的每个波长就像“虚拟”的光纤一样。

在网络扩充和发展中，是理想的扩容手段，也是引入宽带新业务（例如CATV、HDTV和B-ISDN等）的方便手段，增加一个附加波长即可引入任意想要的新业务或新容量。

利用 WDM 技术选路来实现网络交换和恢复，从而可能实现未来透明的、具有高度生存性的光网络。

在国家骨干网的传输时，EDFA 的应用可以大大减少长途干线系统 SDH 中继器的数目，从而减少成本。距离越长，节省成本就越多。

## 5 WDM 和 DWDM

人们在谈论 WDM 系统时，有时会谈到 DWDM（密集波分复用系统）。WDM 和 DWDM 是同一回事吗？它们之间到底有那些差别呢？其实，WDM 和 DWDM 应用的是同一种技术，它们是在不同发展时期对 WDM 系统的称呼，它们与 WDM 技术的发展历史有着紧密的关系。

在 80 年代初，光纤通信兴起之初，人们想到并首先采用的是在光纤的两个低损耗窗口 1310nm 和 1550nm 窗口各传送 1 路光波长信号，也就是 1310nm / 1550nm 两波分的 WDM 系统，这种系统在我国也有实际的应用。该系统比较简单，一般采用熔融的波分复用器件，插入损耗小；没有光放大器，在每个中继站上，两个波长都进行解复用和光 / 电 / 光再生中继，然后再复用在一起传向下一站。很长一段时间内在人们的理解中，WDM 系统就是指波长间隔为数十 nm 的系统，例如 1310nm / 1550nm 两波长系统（间隔达 200 多 nm）。因为在当时的条件下，实现几个 nm 波长间隔是不大可能的。

随着 1550nm 窗口 EDFA 的商用化，WDM 系统的应用进入了一个新时期。人们不再利用 1310nm 窗口，而只在 1550nm 窗口传送多路光载波信号。由于这些 WDM 系统的相邻波长间隔比较窄（一般（1.6nm），且工作在一个窗口内共享 EDFA 光放大器，为了区别于传统的 WDM 系统，人们称这种波长间隔更紧密的 WDM 系统为密集波分复用系统。所谓密集，是指相邻波长间隔而言。过去 WDM 系统是几十 nm 的波长间隔，现在的波长间隔小多了，只有（0.8~2）nm，甚至 <0.8nm。密集波分复用技术其实是波分复用的一种具体表现形式。由于 DWDM 光载波的间隔很密，因而必须采用高分辨率波分复用器件来选取，例如平面波导型或光纤光栅型等新型光器件，而不能再利用熔融的波分复用器件。

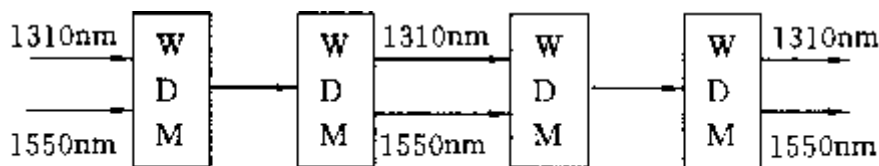


图 4 1310/1550WDM 系统

在 DWDM 长途光缆系统中，波长间隔较小的多路光信号可以共用 EDFA 光放大器。在两个波分复用终端之间，采用一个 EDFA 代替多个传统的电再生中继器，同时放大多路光信号，延长光传输距离。在 DWDM 系统中，EDFA 光放大器和普通的光 / 电 / 光再生中继器将共同存在，EDFA 用来补偿光纤的损耗，而常规的光 / 电 / 光再生中继器用来补偿色散、噪声积累带来的信号失真。

现在，人们都喜欢用 WDM 来称呼 DWDM 系统。从本质上讲，DWDM 只是 WDM 的一种形式，WDM 更具有普遍性，DWDM 缺乏明确和准确的定义，而且随着技术的发展，原来认为所谓密集的波长间隔，在技术实现上也越来越容易，已经变得不那么“密集”了。一般情况下，如果不特指 1310nm / 1550nm 的两波分 WDM 系统，人们谈论的 WDM 系统就是 DWDM 系统。

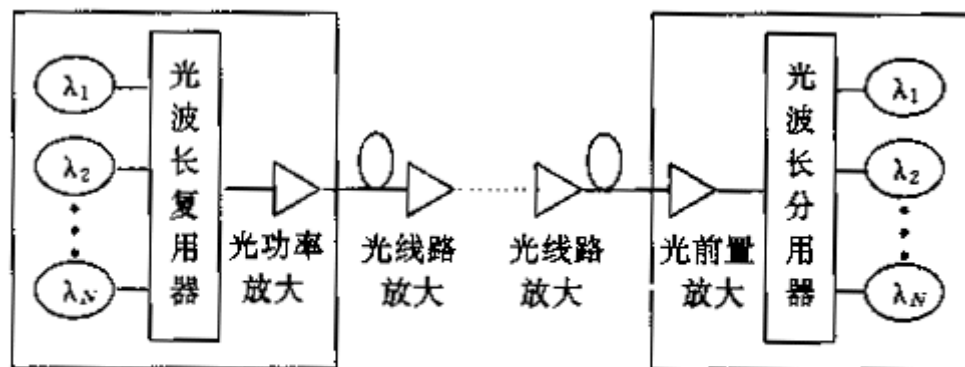


图 5 1550nm 窗口的 DWDM 光缆系统

## 6 总结

过去无论 PDH 的 34Mb / s-140Mb / s-565Mb / s，还是 SDH 的 155Mb / s-622Mb / s-2.4Gb / s，其扩容升级方法都是采用电的 TDM 方式，即在电信号上进行的时间分割复用技术，光电器件和光纤完成的只是光电变换和透明传输，对信号在光域上没有任何处理措施（甚至于放大）。WDM 技术的应用第一次把复用方式从电信号转移到光信号，在光域上用波分复用（即频率复用）的方式提高传输速率，光信号实现了直接复用和放大，而不再回到电信号上处理，并且各个波长彼此独立，对传输的数据格式透明。因此，从某种意义上讲，WDM 技术的应用标志着光通信时代的“真正”到来。

## 第二讲 WDM 系统中的光电器件

WDM 系统本质上是光域上的模拟系统，WDM 技术第一次把复用方式从电域转移到光域，在光域上用波分复用（即频率复用）的方式提高传输速率，光信号实现了直接复用和放大，而不再回到电信号上处理，因而大大增加了光电器件，而且光模拟系统的性能很大程度上取决于各器件的特性。相对于 SDH 系统，WDM 系统增加了波分复用器（解复用器）、光放大器等器件，另外对激光器信号的波长准确性和稳定性也提出了较高的要求。下面我们分 3 部分介绍 WDM 系统中的光电器件，即激光器、波分复用器和光放大器。

## 1 激光器

过去 SDH 系统工作波长是在一个很宽的区域，而 WDM 系统的最重要特点是每个系统采用不同的波长，一般波长间隔为 100GHz 或 200GHz，这对激光器提出了较高要求。除了准确的工作波长外，在整个寿命期间波长偏移量都应在一定的范围之内，以避免不同的波长相互干扰。即激光器必须工作在标准波长、且具有很好的稳定性。

另一方面，由于采用了光放大器，WDM 系统的无再生中继距离大大延长。SDH 系统再生距离一般在 50~60km，由再生器进行整形、定时和再生，恢复成数字信号继续传输。而 WDM 系统中，每隔 80km 有一个 EDFA，只进行放大，没有整形和定时功能，不能有效去除因线路色散和反射等带来的不利影响，系统经 500~600km 传输后才进行光 / 电再生，因而要求光源的色散受限距离大大延长。由过去的 50~60km 提高到 600km 以上，这对光源的要求大大提高。总体上，应用在 WDM 系统上的光源有 2 个突出特点：（1）比较大的色散容纳值。（2）标准而稳定的波长。

### 1.1 外调制技术

对于直接调制来讲，单纵模激光器引起的啁啾（Chirp）噪声已成为限制其传输距离的主要因素。即使采用  $\alpha$  值较小的应变型超晶格激光器，在 G. 652 光纤上传输 2.5 Gb/s 的色散受限距离也只有 120km 左右。这对于国家干线 WDM 系统要求的 500~600km 是不够的。从原理上讲，很难消除直接调制带来的 Chirp 噪声，人们把目光转向了外调制。

与直接调制不同，在外调制情况下，高速电信号不再直接调制激光器，而是加载在某一媒介上，利用该媒介的物理特性使通过的激光器信号的光波特性和特性发生变化，从而间接建立了电信号与激光的调制关系。在外调制情况下，激光器产生稳定的大功率激光，而外调制器以低啁啾对它进行调制，从而获得远大于直接调制的色散受限距离。目前，投入实用的主要有两种：一种是电吸收型外调制器，一种是波导型铌酸锂马赫-曾德尔

调制器。

#### 1. 1. 1 电吸收外调制器 (EML 激光器)

电吸收外调制器是一种强度调制器，也是第一种大量生产的铟镓砷磷 (InGaAsP) 光电集成器件。它将激光器和调制器集成到一片芯片上。EML 激光器芯片的激光器段工作于恒定功率或 CW 模式。输入信号加在调制器上，因此调制器像一个开关，让光通过或把光关断。这使得产生的信号的啁啾声 (Chirp) 非常小，因此可以在标准的光纤上传播非常长的距离，并且信号的失真很小，典型的 EML 激光器支持超过 600km 的距离。

电吸收外调制器的最突出的优点是体积较小，集成度好。另外驱动电压低，耗电量小，在已有的 WDM 陆地系统中，绝大部分公司的产品都采用了这种类型的外调制器。

#### 1. 1. 2 马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder) 外调制器

马赫-曾德尔波导型外调制器也是一种强度调制器。它使用单独的一个单纵模 DFB 激光器和一个外调制器。激光器也工作于连续波 (CW) 状态，在外加调制电场的情况下，由于银酸锂 (LiNbO<sub>3</sub>) 良好的电光效应，使波导的折射率发生改变，通过波导的光的强度相应发生变化，实现波导输出的光幅度调制。马赫-曾德尔调制器在原理上其啁啾参数可以为零，因而调制速率极高，几乎不受光纤色散的限制，调制线宽很窄，消光比高。缺点是调制器与偏振矿态相关，激光器和调制器之间的连接必须使用保偏光纤。在 10Gb / s 以上超高速 WDM 系统传输时，MZ 外调制器成为克服光纤色散影响的主要手段。

### 1. 2 波长稳定技术

WDM 系统的一个重要特点是在光波分复用器处输入的信号均为固定波长的光信号，各个通路的信号波长不同，而且对中心频率偏移有严格规定。如对于 8×2.5Gb / s WDM 系统，通路间隔选择 200GHz，到寿命终了时的波长偏移不大于 ±20GHz。相邻两个通路如果波长偏移过大，就会造成通路间的串扰过大，产生误码。就目前技术而言，最简单的方法是依靠稳定激光器的温度和偏流保证。但这种方法无法解决由于激光器老化、温度变化引起的波长变化。当波长精度要求较高时，需要使用更严格的波长控制技术。使用波长敏感器件对可调制连续波光源的波长进行控制的原理如图 1 所示。波长敏感器件的输出电压随 LD 发射光波长变化而变化，这一电压变化信息经适当处理可用来直接或间接控制 LD 发射的光波长，使其稳定在规定的工作波长上。

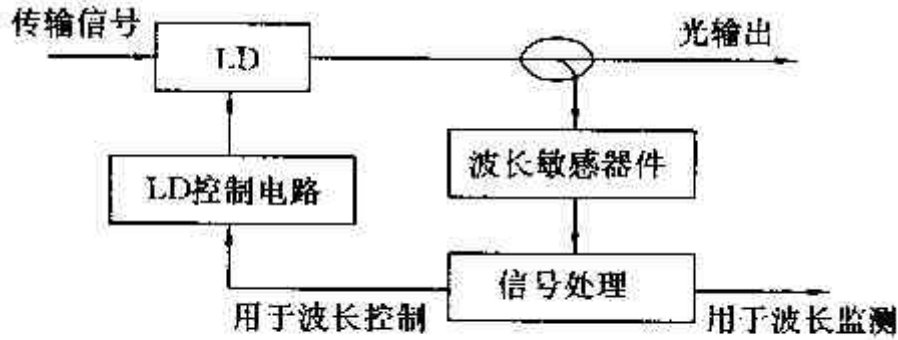


图1 波长控制原理

## 2 波分复用器件

波分复用器件是波分复用系统的重要组成部分，将不同光源波长的信号结合在一起经一根传输光纤输出的器件称为合波器，如图2(a)所示。反之，经同一传输光纤送来的多波长信号分解为个别波长分别输出的器件称分波器，如图2(b)所示。有时同一器件既可作分波器，又可以作合波器。

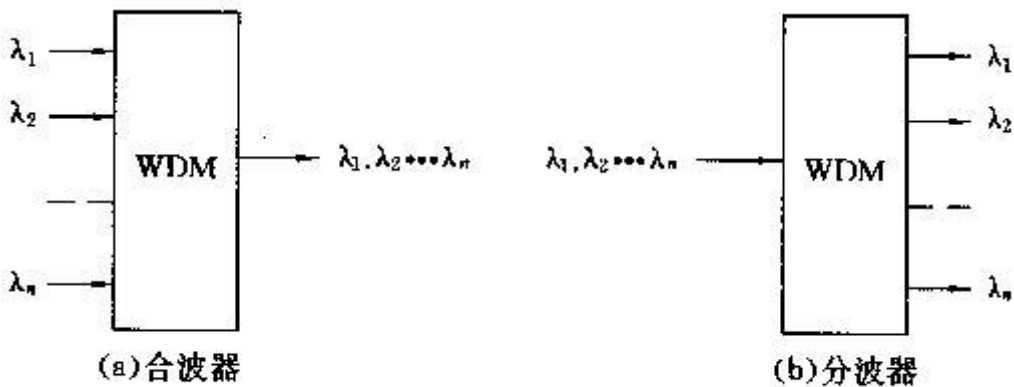


图2 波分复用器件

WDM器件有多种制造方法，目前已广泛商用的WDM器件可以分为4类，即角色散器件、干涉滤波器、熔锥型波分复用器和集成光波导型。下面分别进行介绍。

### 2.1 光栅型波分复用器

光栅型波分复用器件属于角色散型器件。当入射光照射到光栅上后，由于光栅的角色散作用，使不同波长的光信号以不同的角度出射，然后经透镜会聚到不同的输出光纤，从而完成波长的选择作用，如图3所示。

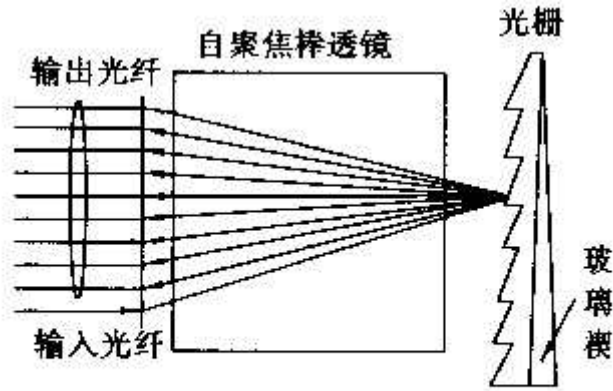


图3 块状光栅型波分复用器典型结构

总的来看，光栅型 WDM 器件具有优良的波长选择特性，可以使波长间隔缩小到数 nm 到 0.51nm 左右。另外，光栅型器件是并联工作的，插入损耗不会随复用信道的增多而增加，已能实现 32~131 个波长的复用，但对温度稳定性要格外注意。以 16 通路 WDM 为例，由于光源在 1550nm 波长的温度系数大约为 0.4nm / °C，环境温度变化 30°C 就足以引起约 0.4nm 的波长偏移，对于通路带宽仅 0.31nm 的情况将至少导致 3dB 的失配损耗，其严重性可见一斑。因而采用温控措施是必要的。

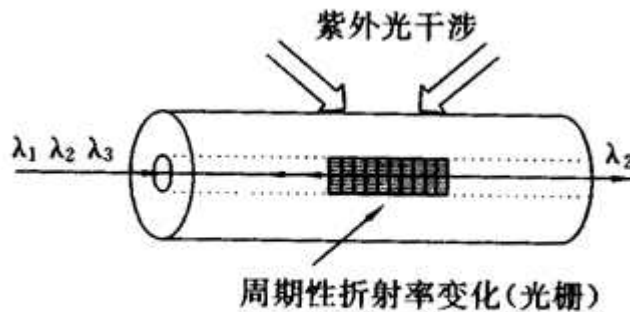


图4 光导纤维中布拉格光栅滤波器

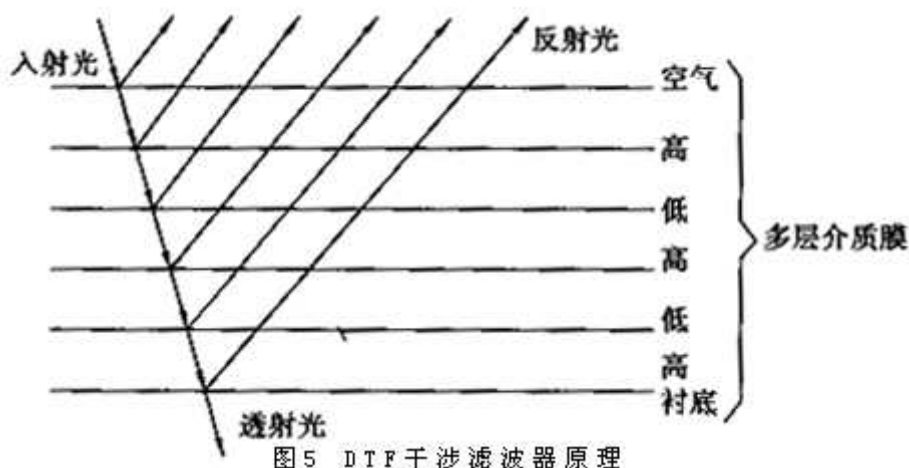
除上述传统光栅器件外，近来一种利用紫外光将折射率光栅刻在光纤芯区的光纤光栅受到了很大重视，如图 4 所示。据报道其性能甚佳，带内频响很平坦，带外抑制比很高，插入损耗不大，性能十分稳定，1560nm 的温度系数为 0.01nm / °C，滤波特性滚降斜率优于 15odB / 11m，带外抑制比可以高达 50dB。

它具有理想的滤光特性、便于设计制造、效率高等优点，因此可制作成信道间隔非常小的带通、带阻滤波器。目前已广泛用于 WDM 系统中。

## 2.2 介质薄膜滤波器型波分复用器



光滤波器有两类，一类为干涉滤波器，另一类是吸收滤波器，两者均可由介质薄膜（DTF）构成。DTF干涉滤波器由几十层不同材料、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  $\lambda/4$  波长，一层为高折射率，一层为低折射率，交替叠合而成。当光入射到高折射率层时，反射光没有相移。当光入射到低折射率层时，反射光经历  $180^\circ$  相移。由于层厚  $\lambda/4$  波长（ $90^\circ$ ），因而经低折射率层反射的光经历  $360^\circ$  相移，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。在这高反射区之外，反射光突然降低，大部分光成了透射光，据此可以使之对一定波长范围呈通带，对另外波长范围呈阻带，从而形成所要求的滤波特性。利用这种具有特定波长选择特性的干涉滤波器就可以将不同的波长分离或者合并起来，如图 5 所示。



采用 DTF 干涉滤波器型 WDM 器件的主要优点是设计与所用光纤参数几乎完全无关，可以实现结构稳定的小型化器件，信号通带较平坦，与极化无关，插入损耗较低，温度特性很好，可达  $0.001\text{nm}/^\circ\text{C}$  以下，但通路数不会很多，目前可达 16 路。

### 2.3 熔锥型波分复用器

熔拉双锥（熔锥）型光纤耦合器，即将多根光纤在热熔融条件下拉成锥形，并稍加扭曲，使其熔融在一起。由于不同光纤的纤芯十分靠近，因而可以通过锥形区的消逝波耦合达到所需要的耦合功率。熔锥型 WDM 器件制造简单，更易于批量生产，因而应用更广泛。

熔锥型 WDM 器件的特点是插入损耗低（最大值  $<5\text{dB}$ ，典型  $0.2\text{dB}$ ），无需波长选择

器件,此外还具有较好的光通路带宽 / 通路间隔比和温度稳定性,不足之处是尺寸稍大,复用波长数少,隔离度较差(20dB 左右),一般不用在目前的密集波分复用系统中。

## 2.4 集成光波导型 WDM 器件

(图略)

集成光波导型 WDM 器件是以光集成技术为基础的平面波导型器件,具有一切平面波导技术的潜在优点,诸如适于批量生产、重复性好、尺寸小,可以在光掩膜过程中实现复杂的光路、与光纤的对准容易等等,因而代表了一种先进的 WDM 器件技术。目前平面波导型 WDM 器件有各种实现方案,其中一种称为龙骨型的平面波导 WDM 器件较有前途。器件由 2 个星形耦合器经 M 个非耦合波导构成,耦合波导不等长从而形成光栅,两端的星形耦合器由平面设置的两个共焦阵列径向波导构成。这种波导型 WDM 器件通路数大、紧凑、易于批量生产,但带内频响尚不够平坦,图 6 所示为一个龙骨型平面波导 WDM 器件的结构原理。

## 2.5 各种 WDM 器件的性能比较

表 1 是各种 WDM 器件主要特性的比较结果,需要注意特性参数是随波长数不同而变化的,表中数值只是大致范围,仅供参考。

表 1 各种 WDM 器件性能比较

器件类型	机理	批量生产	通路间 (nm)	通路数	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	4~131	≤-30	3~6	温度敏感
DTF 型	干涉/吸收	一般	1~100	2~32	≤-25	2~6	通路数较少
熔锥型	波长依赖性	较容易	10~100	2~6	≤-(15-45)	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

在合波器上,8~16 路 WDM 系统,几乎所有的公司都采用了无源的星型光耦合器作为波分复用器的合波器,有的采用 1:n,有的出于线路保护的考虑,采用了 2:n 耦合器,一路输出接工作通路,另一个接保护通路。这主要是因为简单、便宜,相互间隔离度好。缺点是引入的损耗大,以 1:8 耦合器为例,可以达 10dB 左右。而在解复用器上,

对于 8~16 路的 WDM 系统，现在的厂家大部分选用了 DTF 干涉滤波器解复用器或平面波导型解复用器；而对于 16 路以上的 WDM 系统，复用器和解复用器大多都选用平面波导型复用器，因为该类型复用器的损耗与通路数无关。

### 3 光放大器

在 WDM 系统中，光放大器有 3 种应用：发送侧波分复用器之后放大信号的光放大器功率放大器，线路上的光放大器 线路放大器，接收侧解复用器之前的光放大器前置放大器。迄今为止，人们已研究成功 3 种光放大器，即半导体激光放大器、非线性光纤拉曼放大器和掺稀土元素的光纤放大器。掺稀土元素的光纤放大器又可分为掺铒光纤放大器（EDFA）和掺镨光纤放大器（PDFA），其中，EDFA 适合于长波长 1550nm 窗口的光信号放大，而 PDFA 适用于 1310nm 窗口的光信号。目前已经达到实用化水平并在 WDM 系统应用的就是掺铒光纤放大器 EDFA。

#### 3.1 光放大器原理

一个典型的 EDFA 由掺铒光纤、泵浦源和波分复用器组成。其中掺铒光纤提供放大，泵浦源提供足够强的泵浦功率，波分复用器将信号与泵浦光混合，掺铒光纤放大器构成如图 7 所示。

（图略）

EDFA 是利用激光泵浦石英光纤中掺铒离子（E<sup>3+</sup>）的受激辐射来实现对 1550nm 波段光信号的放大。由于光放大器有很宽频带一般在 1530nm~1565nm，这给采用 EDFA 的光系统提供了“透明”特性，放大与信号码率和信号格式无关，而且能把各波长信号光同时放大。

泵浦源有两种，即 980nm 和 1480nm。980nm 泵浦源可以保持较低的噪声系数，而 1480nm 泵浦源有着更高的泵浦效率，可以获得较大的输出功率（相对于 980nm，大 3dB 左右）。在实际的线路放大器应用中，对于 8 路 WDM 系统，大多采用 980nm，这是因为 G. 652 光纤的 WDM 系统主要是色散受限，而非损耗受限，因而采用 1480nm 会增大系统功率损耗，提高 EDFA 的输出功率并没必要；采用 980nm 获得最佳的噪声系数反而有利于系统性能。但是对于 16 路以上的 WDM 系统，则采用了 1480nm 的泵浦源。这是由于较大的分路比减少了可用功率范围，必须采用功率更大的泵浦源。也有的公司采用了两级泵浦，1，级采用 980nm，一级采用 1480nm 泵浦源。既改善了噪声系数，又增大了输出功

率。但是，出于激光安全性和光纤非线性的考虑，输出光功率一般限制在+17dBm 以下，这也是激光器 3A 的安全要求。

### 3.2 EDFA 的增益平坦度

EDFA 的增益。波长特性不平坦导致不同波长的接收光功率差异。对于多级级连 EDFA 系统尤其重要。在多波长级联 EDFA 系统中，信号频带内的 ASE（放大的自发光辐射）噪声在每个 EDPA 得到累积，累积的 ASE 噪声还会由于 Kerr 效应给信号带来相位上的噪声，扩展了信号频谱，EDFA 级联数目较多时，多级级联后的 EDFA 的增益曲线极不平坦，可选用的增益区减小，各波长信号的增益不平衡，必须采取均衡措施。

解决增益均衡的途径首先是实现增益谱的平坦。

方法大体上可分为滤波器型和本征型两类：滤波器型是在 EDFA 中内插无源滤波器将 1530nm 的增益峰降低，或专门设计其透射谱与掺铒光纤增益谱相反的光滤波器将增益谱削平，但结构工艺都较复杂，附加损耗大，输出功率会减校本征型是采用高铝掺杂光纤或氟化物光纤。这类方法的最大优点是无需制作和引入附加元件，掺铝光纤还可以增大放大器的放大频谱范围。但氟化物光纤与石英光纤材料的不共性招致放大器工艺和可靠性的诸多麻烦。

### 3.3 掺铒光纤放大器的增益均衡技术

EDFA 的增益均衡是一个重要问题。WDM 系统是一个多波长工作系统，当某些波长信号失去时，由于增益竞争，其能量会转移到存在的信号上，使其它波长的功率提高。在接收端，由于电平的突然提高会带来误码，而且在极限情况下，当 8 路波长中 7 路丢失时，所有的功率都集中到一个波长上，功率会达到+17dBm 左右，这又会带来强烈的非线性或接收机过载，也会带来误码。

EDFA 的增益控制技术有许多种，典型的有控制泵浦源增益的方法，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（输出 / 输入）增益不变，从而使 EDFA 的总输出功率减少，保持输出信号电平的稳定。

另外，还有饱和波长的方法。在发送端，除了 8（16）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，当线路的某些信号失去时，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波长激光器的输出，速度较控制泵浦源要快一些。

#### 4 总结

本讲介绍了 WDM 系统中主要光电器件：激光器、波分复用器和掺饵光纤放大器 EDFA。模拟系统的性能很大程度上取决于各器件的特性，因此这些光电器件的性能对 WDM 系统的性能有着重要影响。要想深入理解 WDM 系统，我们也必须熟悉和了解这些器件的工作原理和特性。

### 第三讲 WDM 系统技术规范

随着 WDM 系统的大规模建设，对标准的需要也越来越强烈。WDM 系统不像 SDH 系统那样有严格统一的规范。主要原因在于 SDH 系统是 ITU-T 先制定了标准规范，各大厂商再根据标准去制造产品，而 WDM 系统的发展却恰恰相反，是各厂商先有产品，而且规范不一，都认为自己是最好的选择，因此到现在为止 ITU-T 还没有形成统一的规范。因此，为了使引进产品和国内自行开发的产品具有统一性，制订我国的标准是十分必要的。

在制定我国 WDM 规范时，必须先确定波分复用系统的通道数目。从最近几年看，16 (8) 波长的应用将是第一步。从各个公司现在推出的产品看，几乎全是间隔为 100GHz 的 16 波分系统。这主要有以下原因：(a) 现实的需要性，以 2.5Gb/s 系统为例，16 波分单向就可达到 40Gb/s 的传输速率，这足以满足未来几年的业务需求；(b) 技术的可行性。当前波分复用器件和激光器元件的技术都满足 16 个波长以上的复用。有鉴于此，我们所考虑的主要是用于干线系统的 1550nm 的 16 通路密集波分复用技术。

从当前应用上看，WDM 系统只用于 2.5Gb/s 以上的高速率系统。因而在制定规范的过程中，我们主要考虑了基于 2.5Gb/s SDH 的干线网 WDM 系统的应用，承载信号为 SDH STM-16 系统，即 2.5Gb/s×N 的 WDM 系统。对于承载信号为其他格式（例如 IP）的系统和其它速率（例如 10Gb/s×N）暂不作要求。

在 WDM 系统规范中，只考虑了点到点的线性系统。目前世界上大规模建设的 WDM 系统几乎无一例外的都是点到点的系统，而且大部分没有采用 OADM。在有业务上下的节点上，采用了复用器 / 解复用器的背对背方式，因此我们规范的都是点到点的线性系统，而没有考虑环型或其它应用。

## 1 集成式系统和开放式系统

WDM 系统根据其分类，可以分为开放式 WDM 系统和集成式 WDM 系统。

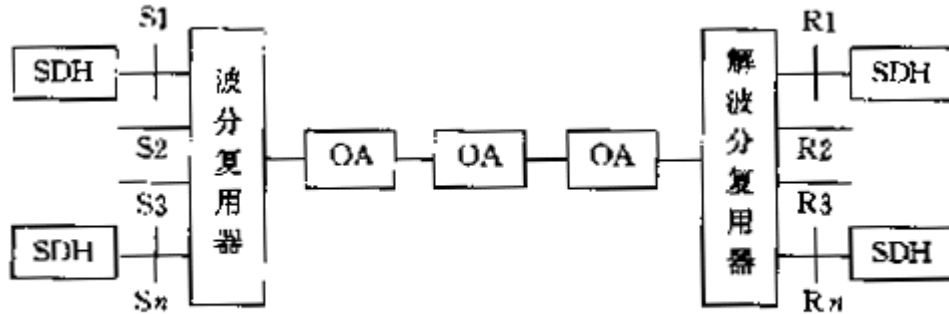


图 1 集成式 WDM 系统

集成式系统就是 SDH 终端设备具有满足 G. 692 的光接口：标准的光波长、满足长距离传输的光源（又称彩色接口）。这两项指标都是当前 SDH 系统不要求的。即把标准的光波长和长受限色散距离的光源集成在 SDH 系统中。整个系统构造比较简单，没有增加多余设备。但在接纳过去的老 SDH 系统时，还必须引入波长转换器 OTU，完成波长的转换，而且要求 SDH 与 WDM 为同一个厂商，在网络管理上很难实现 SDH、WDM 的彻底分开。集成式 WDM 系统如图 1 所示。

开放式系统就是在波分复用器前加入 OTU（波长转换器），将 SDH 非规范的波长转换为标准波长。开放是指在同一 WDM 系统中，可以接入多家的 SDH 系统。OTU 对输入端的信号没有要求，可以兼容任意厂家的 SDH 信号。OTU 输出端满足 G. 692 的光接口：标准的光波长、满足长距离传输的光源。具有 OTU 的 WDM 系统，不再要求 SDH 系统具有 G. 692 接口，可继续使用符合 G. 957 接口的 SDH 设备；可以接纳过去的 SDH 系统，实现不同厂家 SDH 系统工作在一个 WDM 系统内，但 OTU 的引入可能对系统性能带来一定的负面影响；开放的 WDM 系统适用于多厂家环境，彻底实现 SDH 与 WDM 分开。开放式 WDM 系统如图 2 所示。

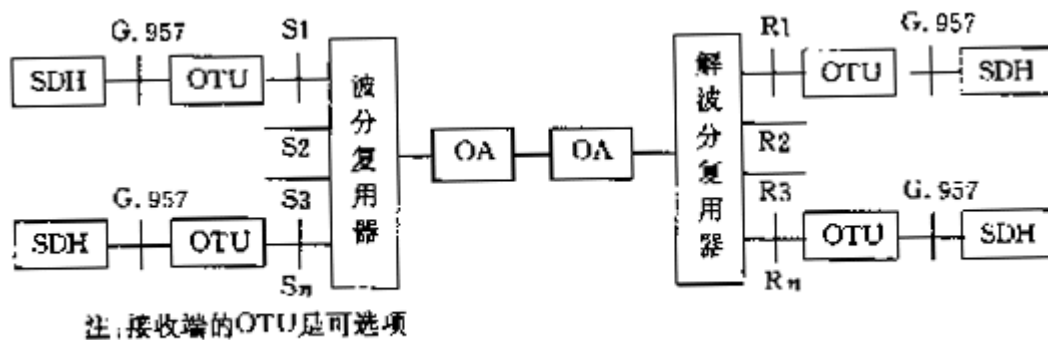


图2 开放式 WDM 系统

图3是一个波长转换器 OTU。该器件的主要作用在于把非标准的波长转换为 ITU-T 所规范的标准波长，以满足系统的波长兼容性。现在已商用的产品中，使用的依旧是光/电/光 (O/E/O) 的变换，即先用光电二极管 PIN 或 APD 把接收到的光信号转换为电信号，然后用该电信号对标准波长的激光器重新进行调制，从而得到新的符合要求的光波长信号。

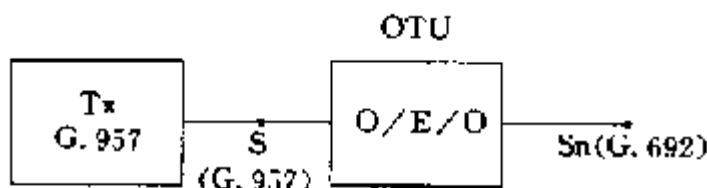


图3 符合 G.957 的发射机与波长转换器(OTU)合并使用的示意

对于集成系统和开放系统的选取，运营者可以根据需要。在有 SDH 系统多厂商的地区，可以选择开放系统，而新建干线和 SDH 制式较少的地区，可以选择集成系统。但是现在 WDM 系统采用开放系统的越来越多。

## 2 工作波长区的选择

对于常规 G.652 光纤，ITU-T G.692 给出了以 193.1THz 为标准频率、间隔为 100GHz 的 41 个标准波长 (192.1~196.1THz)，即 1530~1561nm。但在实际系统中，考虑到当前干线系统应用 WDM 系统主要目的是为了扩容，全部应用的可能性几乎为零，因为在整个 EDFA 放大频谱 1530~1565nm 内，级联后的 EDFA 的增益曲线极不平坦，可选用的增益区很小，各波长信号的增益不平衡，必须采取复杂的均衡措施，并且当前业务的需求并没有那么大的容量。综合各大公司的材料，1548~1560nm 波长区的 16 个波长更受青睐，西门子和朗讯都采用了这一波长区。在 1549~1560nm 波长区间，EDFA 的增益相

对平坦，其增益差在 1.5dB 以内，而且增益较高，可充分利用 EDFA 的高增益区，见图 4。在多级级联的 WDM 系统中，容易实现各通路的增益均衡。另外该区域位于长波长区一侧，很容易在 EDFA 的另一侧 1530~1545nm 开通另外 16 个波长，扩容为 32 通路的 WDM 系统。

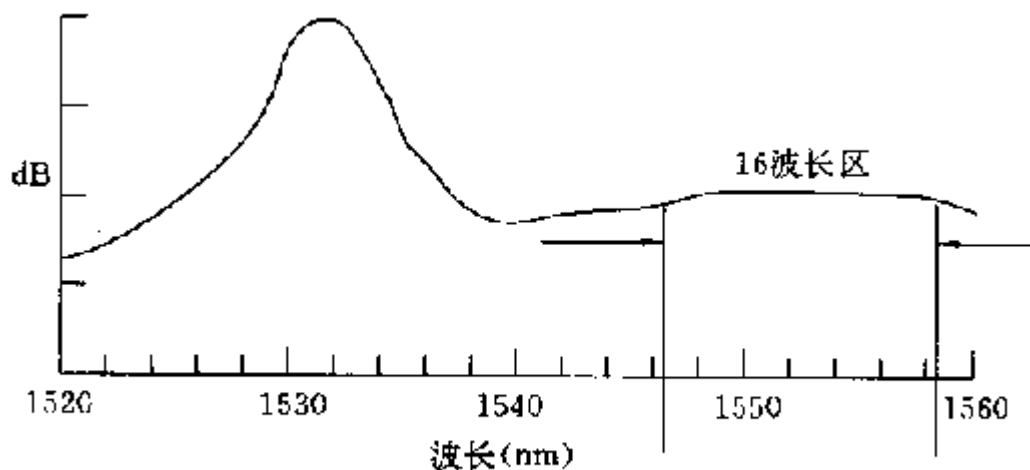


图 4 16 波长区的选择

16 通路 WDM 系统的 16 个光通路的中心频率应满足表 1 的要求，8 通路 WDM 系统的 8 个光通路的中心波长应选表：中加\*的波长。

序号	中心频率 (THz)	波长 (nm)
1	192.1	*1560.61
2	192.2	1559.79
3	192.3	*1558.98
4	192.4	1558.17
5	192.5	*1557.36
6	192.6	1556.55
7	192.7	*1555.75
8	192.8	1554.94
9	192.	*1554.13
10	193.0	1553.33
11	193.1	*1552.52
12	193.2	1551.72
13	193.3	*1550.92
14	193.4	1550.12



15	193.5	*1549.32
16	193.6	1548.51

表 1 16 通路和 8 通路 WDM 系统中心频率

WDM 系统除了对各个通路的信号波长有明确的规定外，对中心频率偏移也有严格规定。通路中心频率偏移定义为通路实际的中心频率与通路中心频率标称值的差值。对通路间隔选择 100GHz 的  $16 \times 2.5\text{Gb/s}$  WDM 系统，到寿命终了时的波长偏移应不大于  $\pm 20\text{GHz}$ 。

### 3 光接口分类

由于现在应用的 WDM 系统都是用于干线长途传输，因而我国只选用有线路光放大器的系统，不考虑两点之间的无线路光放大器的 WDM 系统。现阶段我们只考虑确定 8 波长和 16 波长的应用。

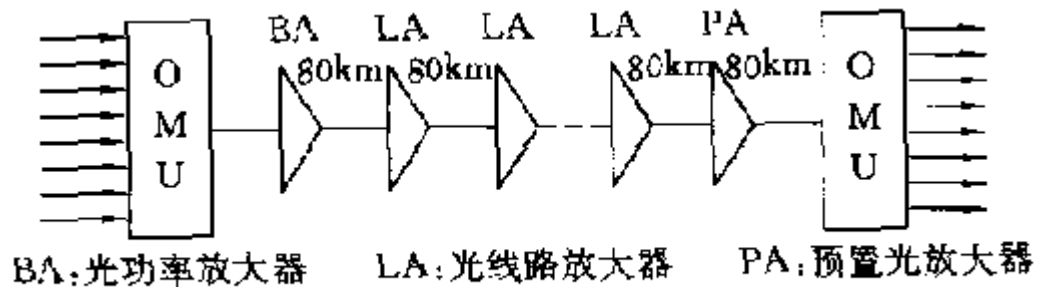


图 5  $8 \times 22\text{dB}$  系统构成

对于长途 WDM 系统的应用，我们规定了 3 种光接口：即  $8 \times 22\text{dB}$ ， $3 \times 33\text{dB}$  和  $5 \times 30\text{dB}$  系统。其中 22dB、30dB 和 33dB 是每一个区段 (Span) 允许的损耗，而前一个数字 8 (5, 3) 则代表区段 (Span) 的数目。

图 5 为  $8 \times 22\text{dB}$  系统的示意图。该系统由 8 段构成，每两个 LA 之间的允许损耗为 22dB，BA 和 PA 分别是功率放大器和预放大器，LA 是线路放大器。假设光纤损耗以  $0.275\text{dB/km}$  为基础 (包括接头和光缆富裕度)，22dB 对应于 80km 的光纤损耗，则  $8 \times 22\text{dB}$  WDM 系统可以传输  $8 \times 80\text{km} = 640\text{km}$  的距离，中间无电再生中继。

80km 比较符合我国中继段的情况，可以满足大部分地区中继距离的要求。目前干线的中继段距离大多在 50~60km。另外  $8 \times 22\text{dB}$  系统技术上相对成熟，可靠性高，性能好，光信噪比 (OSNR) 比  $3 \times 33\text{dB}$  和  $5 \times 30\text{dB}$  要好 4~5dB。因此可作为干线传输和省内二级干线传输的优选系统。

考虑到西北地区有可能出现超长中继的情况，增加了  $3 \times 33\text{dB}$  系统（可以传输  $3 \times 120\text{km} = 360\text{km}$ ），以适应某些沙漠地区超长中继距离的需要。另外由于  $5 \times 33\text{dB}$  的实现尚需要研究，并结合我国实际情况，在中继距离 80km 和 120km 以外，我们引入每区段 (Span) 损耗 30dB（传送距离为 100km 左右）、5 个 Span 的系统，即  $5 \times 30\text{dB}$  系统，作为长中继距离，多段数的补充，也是  $5 \times 33\text{dB}$  的替代。这样使每个区段 (Span) 的距离由 2 种 (80km、120km) 增加到 3 种 (80km、100km 和 120km)，增加了组网的灵活性。

在 WDM 系统中，目前的 8 通路系统不能被升级为 16 路系统，除非该 8 路系统是配置不完全的 16 通路系统的子集，否则都不能直接升级，即没有前向兼容性。这就要求运营者在建设 WDM 系统时，应对本地业务量发展有着正确的估计，以选择合适的通路数。

#### 4 光接口参数

在 ITU-T G. 692 建议中，对于点到点 WDM 系统的光接口参数几乎为零，为了增加可操作性，我们重点参考了几家大公司的产品标准，制定了较详细的系统接口规范，增加了标准化程度，具有较强的可操作性，特别是考虑到高功率条件下的非线性效应和光信噪比要求，合理地选择入纤功率，并对开放系统和集成系统提出了相应要求。在开放的 WDM 系统中，对于 OTU 在发送端、再生中继器和接收端的不同应用，分别给出了具体指标。考虑到维护人员的需要，对 EDFA 增加了在线监测口的要求，以方便日常的维护测试。

针对 WDM 系统的模拟性质，我们特别制定了 WDM 系统接收端光信噪比 (OSNR) 数值，对于  $8 \times 22\text{dB}$  的系统，其光信噪比为 22dB；而对于  $5 \times 30\text{dB}$  和  $3 \times 33\text{dB}$ ，则要求分别为 21dB 和 20dB。因为系统的 OSNR 很大程度上决定于区段 (span) 的损耗。区段 (span) 的损耗越大，则最后系统的性能越差。由于篇幅所限，参数的具体内容在此不详述。

#### 5 性能要求

目前，WDM 系统还缺少一套衡量其传输质量的标准。虽然光信噪比（OSNR）可以衡量系统传输质量，但还存在一定缺陷。当光信噪比（OSNR）很高时（ $>22\text{dB}$ ），系统的质量可以保证（一般  $\text{BER} < 10^{-15}$ ）。当 OSNR 工作在临界状态，例如  $15\sim 17\text{dB}$  时，OSNR 就很难定量地评估信号传输质量；再考虑到信号脉冲传输中出现的波形失真，有时 OSNR 较高时相应的误码率有可能较差。因而承载信号的质量很大程度上还需要在电域上进行评估。实际上国家骨干网的 WDM 系统是基于 SDH 系统的多波长系统，因而其网络性能应该全部满足我国 SDH 标准规定的指标，包括误码、抖动和漂移。WDM 系统在一个光复用段内，只有一个电再生段，没有任何转接，因而不能用通道指标进行衡量，暂定采用复用段指标进行要求。该指标与具体 WDM 系统光复用段长度无关。

开放式 WDM 系统引入了波长变换器 OTU，OTU 应具有和 SDH 再生中继器一样的抖动传递特性和输入抖动容限。

## 6 光监控通路（OSC）要求

与常规 SDH 系统不同，WDM 系统增加对 EDFA 监视和管理。由于在 EDFA 上业务信号不进行上下，无电接口接入，只有光信号的放大，而且业务信号的开销（如 SDH）上也没有对 EDFA 进行控制和监控的字节，因而必须增加一个电信号对 EDFA 的运动状态进行监控。现在经常采用的是在一个新波长上传送检测信号。

对于使用线路放大器的 WDM 系统需要一个额外的光监控通路，这个通路能在每个线路光放大器处进行上下。光线路放大器 EDFA 的增益区为  $1530\sim 1565\text{nm}$ ，光监控通路必须位于 EDFA 有用增益带宽的外面，我们规定采用  $1510\text{nm}$  波长。

监控通路的接口参数见表 2。

监控波长	1510nm
监控速率	2Mb/s
信号码型	CMI
信号发送功率	(0~7dBm)
光源类型	MLM LD
光谱特性	待研究
最小接收灵敏度	-48dBm

表 2 监控通路的接口参数

## 7 WDM 系统的保护

WDM 系统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 OMSP，在光路上同时对合路信号进行保护。

### 7.1 基于单个波长，在 SDH 层实施的 1+1 保护

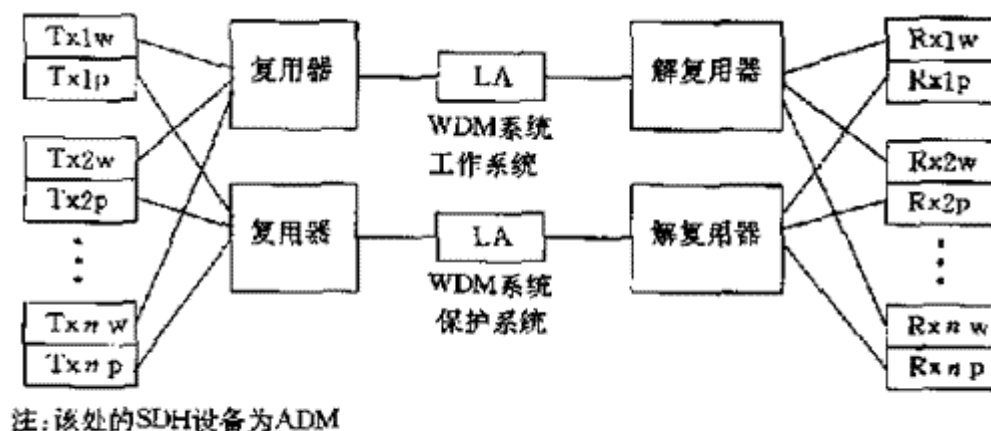


图 6 基于单个波长，在 SDH 层实施的 1+1 保护

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。如图 6 所示，SDH 信号在发送端被永久桥接在工作系统和保护系统上，在接收端监视从这两个 WDM 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，但是成本也高。与此原理相一致，还可以实现基于单个波长，在 SDH 层实施的 1:n 保护。

另外一种方式是基于单个波长、同一 WDM 系统内 1:n 路的 WDM 系统中，n 个波长通道作为工作波长，1 个波长通路作为保护。但是实际系统中，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，实际意义不太大。

### 7.2 光复用段 (OMSP) 保护

这种技术是只在光路上进行 1+1 保护，而不对终端设备进行保护。在发端和收端分别使用 1×2 光分路器或光开关，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。

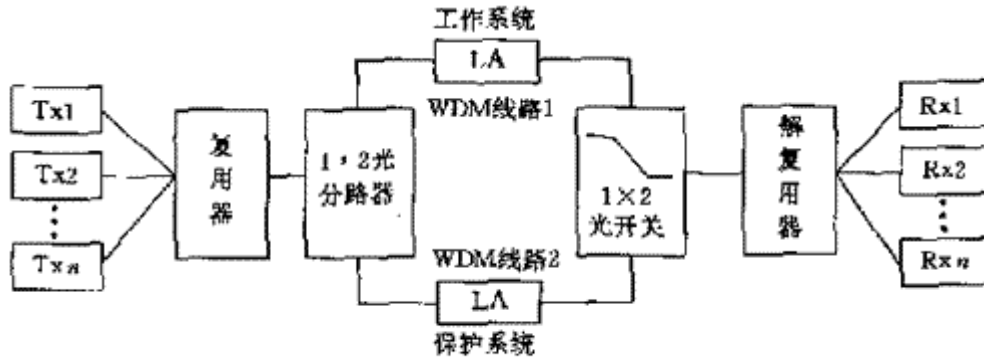


图 7 光复用段(OMSP)保护

图 7 是采用光分路器和光开关的光复用段保护方案。在这种系统中，只有光缆和 WDM 的线路系统是备份的。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 的全保护，该方法减少了成本。光复用段保护只有在独立的两条光缆中实施才有实际意义。

## 8 安全要求

对于含光放大器的 WDM 系统，安全特别重要。因为一般情况下，光放大器系统工作在高功率情况下，有的已经在光纤安全功率极限的边缘。ITU-T 建议规定：单路或合路入纤最大光功率电平为+17dBm。对链路切断情况下可能引起的强烈“浪涌”效应更应加以重视，必须保证系统能够及时关闭泵浦源和系统，以防止对系统造成损害。

### 8.1 光“浪涌”的产生

使用 EDFA 放大光信号，当输入光功率迅速增大时，由于 EDFA 的慢增益动态效应会产生光浪涌，输出光功率出现“尖峰”，特别是对级联 EDFA 的情况下，其峰值功率可以到数十瓦，其原理如图 8 所示。

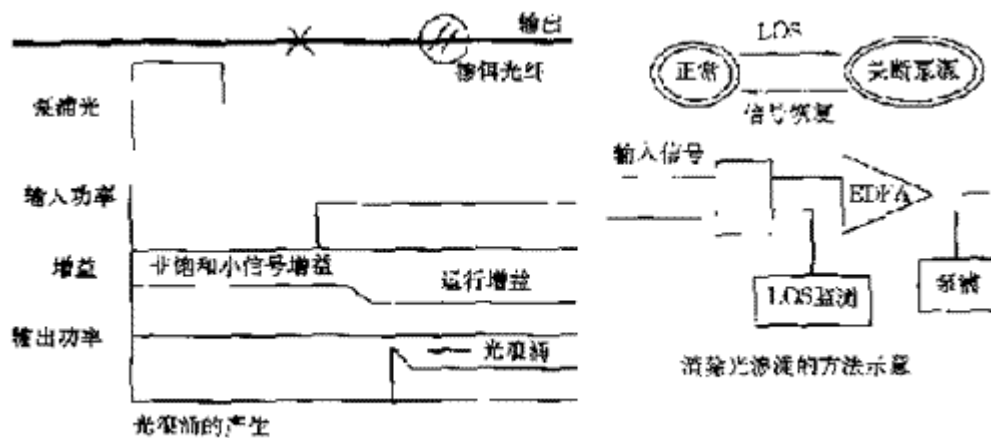


图 8 光浪涌的产生及消除

在光缆突然被切断或其它原因导致信号丢失时，如果泵浦源不关闭，泵浦源还处于泵浦“状态，使高能级“泵浦”状态下的离子浓度达到最大。这时，当信号经过一段时间恢复后，如果一个较高功率的信号进入掺铒光纤，将引起几乎所有的亚稳态离子发生受激辐射翻转，使 EDFA 的输出达到一个最大值[+30dBm (1W) 以上]。这种高功率是非常危险的，有可能“烧坏”光连接器和接收机。

## 8.2 光浪涌的防止 (Optical surge prevention)

采用图 8 所示的方法可以防止光浪涌。当光缆切断或其它原因引起 LOS 被检出时，当时间积累到一定长度，应减小直至切断向 EDFA 馈送的泵功率。而当链路恢复时，应待光信号恢复一定时间后，再恢复向 EDFA 泵功率。对于 WDM 系统，只有当所有主通路的光信号都丢失时才启动 EDFA 自动功率关断 (APSD) 进程。APSD 实施时，不影响并且能保持所有 OSC (光监控通路) 功能的实施。

## 9 单纤双向传输

与单纤单向 WDM 相比，单纤双向 WDM 系统可以减少光纤和线路放大器的数量。但双向 WDM 设计比较复杂，必须考虑多通过干扰 (MPI)、光反射的影响，另外还需考虑串音、两个方向传输功率电平数值、OSC 传输和自动功率关断等一系列问题。

从现在得到的资料看：大部分公司都是采用单纤单向系统。单纤双向 WDM 只适用于光缆对比较紧张的情况，目前只有 Nortel 采用了这种技术。单纤双向在于线中应用的机会并不多。因为它只适用于光纤芯数极少的地区，而通常干线的芯数都在 24 芯以上。

这种技术适合在一些边远地区采用，而边远地区的业务量似乎尚不能达到  $N \times 2.5\text{Gb/s}$  超高速容量，真正实施的可能是  $622\text{Mb/s}$  或  $155\text{Mb/s}$  系统的简单两波分或类似系统。

对于单纤双向系统，我们没有完全予以禁止，但也并不提倡。在光纤芯数可以满足要求时，最好仍采用单纤单向的 WDM 系统，只有在那些光纤芯数极少的地区，才有必要考虑采用单纤双向系统。

## 10 总结

当前，WDM 技术仍处于快速发展阶段，今年内，许多厂商的  $32 \times 2.5\text{Gb/s}$  系统都将投入商用，另外  $N \times 10\text{Gb/s}$  的 WDM 技术也发展很快，我们目前制定的规范仅仅对当前引进和建设的  $16(8) \times 2.5\text{Gb/s}$  WDM 系统参数进行了具体规定，对于 16 通路以上的 WDM 系统的光接口参数还没有规范。但是许多普遍性原则，例如 WDM 分层结构、光接口分类、保护以及安全要求等在多通路 WDM 系统中仍将适用。另外我们也会加快  $32 \times 10\text{Gb/s}$  ( $2.5\text{Gb/s}$ ) 和其它拓扑结构的 WDM 系统（如 WDM 环网）的标准化，以满足国内迅速发展的 WDM 技术的要求。



## 第四讲 WDM 系统网络管理要求

在传送网体系结构中，SDH 和 WDM 是分属于不同逻辑“层”的系统，它们之间是客户层 / 服务层之间的关系。WDM 系统管理的传输资源是波长光通道（带宽、信号格式不确定），SDH 系统管理的传输资源是 VC-4（12）通道。WDM 网络提供的光通道可以直接支持各种业务网。从 WDM 技术角度看，SDH 和其他业务网一样只是它的客户信号，所以 SDH 和其他业务网的网管系统都应独立于其承载层 WDM 网管系统，WDM 网络管理系统应与 SDH 彻底分开。

### 1 WDM 与 SDH 网管系统的关系

SDH 和 WDM 的相同点在于都是建立在光纤这一物理媒质上，利用光纤作为传输手段的技术。但两者也有本质的区别，WDM 是更趋近于物理媒质层（光纤、光缆）的系统，它是在光域上进行的复用，现在是点到点的应用，以后加上 OXC、OADM 构成“光传送网”。而 SDH 则是电路层实施的“光同步传送网”技术，它提出了一整套传送网的国际标准，规定了复用方法，还描述了组网原则。相对于 WDM 技术而言，SDH 与 PDH、ATM 信号一样，

都只是 WDM 系统所承载的业务。也就是讲，SDH 和 WDM 之间是客户层与服务层的关系。现在 WDM 技术的应用似乎只有一个客户——SDH 系统，但实际上它具有承载多客户信号的能力。

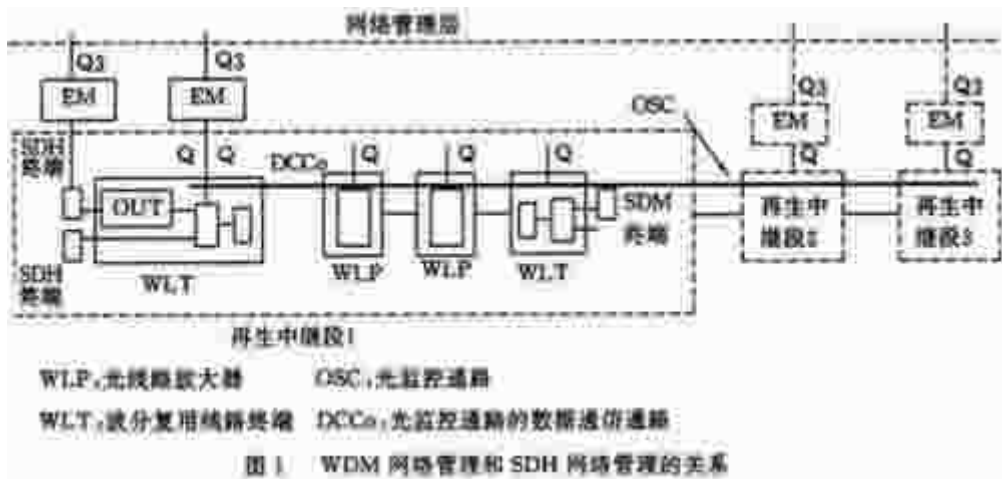
当前 WDM 系统承载的客户层信号都是 SDH，也就是  $N(8, 16) \times 2.5 \text{Gb/s}$  ( $10 \text{Gb/s}$ ) SDH 的系统，但这并不是说 WDM 系统只能承载 SDH 信号。WDM 系统的一个最重要特点是与业务无关，对业务透明。它可以承载各种格式的信号，既可以承载标准的 SDH 信号，也可以承载其它任何不受限的数字信号或模拟信号。因而 WDM 的网络管理系统也应与其传送的信号的网管分离。WDM 系统的网管系统独立于其承载系统的网络管理，对现在的干线工程来讲，就是独立于 SDH 的网管系统。WDM 系统的网管系统只负责对光线路系统的管理，这包括波分复用器、光放大器、监控信道等。SDH 网管系统负责管理 ADM、中继器等设备的配置、故障和性能管理，而不涉及光传输系统。

另外 WDM 系统是未来光网络的一部分。随着光网络的迅速发展，其开销和网管信息会越来越多，其网管系统也会日益庞大。为了适应未来庞大的光网络系统，现在有必要建立独立的 WDM 网管系统。这一系统与 SDH 网络层管理系统平行，在更高层上再考虑两个网管系统的相互关系。

## 2 WDM 网管系统配置

现阶段 WDM 系统至少应设置自己独立的网元管理系统 (EM) 层，具有在一个平台上管理 EDFA、波分复用器、波长转换器 (OTU) 和监控信道的功能，对设备进行性能、故障、配置及安全等方面的管理。在 WDM 系统 EM 管理系统的配置上，既可以一个 WDM 光复用段 (即 SDH 再生段) 设置一个 EM 管理系统，也可以相邻几个光复用段采用一个 EM 管理系统，如图 1 所示。





在已建设的 WDM 系统干线中，在网管系统配置上，我们采用了每个省设置一个网元管理系统 EM 的方法，实行分段管理。即每条干线在其经过的所有省份都分别设置了一个 EM 管理系统，负责对本省的 EDFA、WDM 终端站等网元进行管理。如京—汉—广干线，在其经过的北京、河北、河南、湖北、湖南和广东都设置了 EM 网管系统。与 SDH 干线不同的是，没有配置可以管理整条干线的子网管理系统（SNM），因而无法从整体上了解整条干线工作的情况，现在各厂家都还没有开发出 WDM 的 SNM 网管系统。

在一个开放的 WDM 系统中，可以承载多家 SDH 设备，这在实际的工程中已有应用，以广东—汕头的 8 波长 WDM 系统为例，虽然该 WDM 系统是大唐电信提供的，但承载的 SDH 系统，既有大唐电信的设备，也有西门子的 SDH 设备，两家的 SDH 系统通过波长变换器连接到 WDM 系统中。因此 WDM 系统的网元管理系统应独立于其所承载的 SDH 设备。

对于既能提供 SDH 设备，又提供 WDM 系统的厂家，当 WDM 的网元和 SDH 的网元具有相同的 Q 接口时，SDH 和 WDM 可以采用同一网元管理系统。现在各厂商一般对自己的 SDH 和 WDM 产品都采用同一网管系统，在一个网管平台上实现对自己 SDH、WDM 设备的统一管理。但必须注意的是，其 WDM 网管系统必须可以分离并独立运行，具有承载其他厂家 SDH 系统的能力。

当前，对于 SDH、WDM 的网管系统，可以采取物理集中维护管理的方法，即 SDH 和 WDM 的网络管理平台建在同一机房里，以方便故障的处理。当出现故障时，会出现如何划分 WDM 和 SDH 系统职责的问题，一般说来，WDM 系统的网管系统负责端到端的波长路由、光缆线路和光信号质量的监测，不涉及业务层信号格式由 SDH 网管负责的是端到端 VC-4 和 VC-12 通道的性能监测及与 SDH 设备相关的告警。

### 3 网元管理系统

网元管理系统承担授权区域内各网络单元的管理，并提供部分网络管理功能，被管理网络中的各网元均应由一个管理软件和硬件平台进行管理。在工作站的用户窗口界面上应能监视被管理的区域网络，并能显示被管理的整个网络拓扑结构。通过 WIMP（窗民图标、菜单、光标）方式的人机接口，网元管理系统应能监视和控制到整个被管理网络中的每一个网元，告警和事件记录追踪至 WDM 系统的每一块电路板。

图 2 给出 WDM 系统网元划分的逻辑示意图，一个虚框内可看作一个 WDM 系统的网元。在发送端和接收端，除 EDFA、光监控通路外，网元还包括波分复用器 / 解复用器，对它们的控制也要统一纳入 WDM 系统的网元级管理。这样，就明确划分了 SDH 系统和 WDM 系统的网元管理界限，一个面向 SDH 系统终端设备，另外一个面向 WDM 线路系统设备。



WDM 系统的网元与网元之间通过光监控通路 OSC 中的 DCC 通道互连，并传递监控网管信息。光监控通路工作在 1510nm 波长，速率为 2Mb / s，其中在 2Mb / s 的帧结构中，我们规定了类似 SDH 系统 D1~D12 的 DCC 数据链路，专门用来传输 WDM 系统的网管信息，因而 OSC 中的 DCC 通道是 WDM 网管信息的物理承载层。另外，在 2Mb / s 的帧结构中，我们还定义了 2 个字节用来承载 EDFA 中继站之间的公务电话，从而解决了 EDFA 线路放大器站无法联络的问题。

网元管理系统 (EM) 应同时具有 Q 接口和 Q3 / CORBA 接口。EM 与网元连接通过 Q 接口，EM 与上级管理系统相连的接口为 Q3 / CORBA。

### 4 网元管理系统的管理功能

WDM 网元管理系统的管理功能包括故障管理、性能管理、配置管理和安全管理。

#### 4.1 故障管理

故障管理应能对传输系统进行故障诊断、故障定位、故障隔离、故障改正以及路径测试。

#### 4.1.1 告警功能

网元管理系统应该至少能支持下列告警功能：

—可利用内部诊断程序识别所有故障并能故障定位至单块插板， —能报告所有告警信号及其记录的细节，如时间、来源、属性及告警等级等。

—应具有可闻、可视告警指示。

—告警历史记录应便于查看和统计。

—能够设置故障严重等级。

—激光器寿命预告警。

在 WDM 系统中，故障管理必须监视的告警参数：

##### (a) 光发射单元告警参数 (SDH) 终端

—激光器输出光功率值不足或过载

—输入信号丢失 (LOS)

—发送器劣化

—激光器发送失效

—激光器寿命告警

—调制器输出光功率告警 (采用啻酸啻调制器时)

##### (b) OTU

—激光器输出光功率值不足或过载

—输入信号丢失 (LOS)

—发送器劣化

—激光器发送失效

—激光器寿命告警

—调制器输出光功率告警 (采用铊酸铯调制器时)

—光输入信号电平过高或过低

#### (c) 光放大器

—输入合路信号丢失

—输入单波长丢失

—泵浦激光器偏流过高

—泵浦激光器温度过高

—监测失效。

#### (d) 接收单元 ODU

—输入合路波长信号丢失

—单个波长丢失

—分波器温度控制告警 (对采用温度敏感的分波器件)

#### (e) 光监控通路

—激光器发送失效

—光信号丢失

—光信号帧丢失

—光信号帧丢失

(f) 外部事件告警管理功能（例如无人中继站的开门告警和火警告警等）。

#### 4.2 性能管理

故障管理中必须监视的基本参数也是性能管理必须监视的参数，此外，性能管理还至少有以下管理功能：

—能对监控信道 OSC 的误码性能参数进行自动采集和分析，并能以 ASCII 码文件形式传给外部存储设备。

—能同时对所有终端点进行性能监视。

—能同时对性能监视门限进行设置（如泵浦源功率、激光器偏置电流）。

—能存储和报告监控通路 15min 和 24h 两类性能事件数据。

—能报告“当前”和“近期”两种性能监视数据。

#### 4.3 配置管理

网元配置：

—网元（包括各组成单元 NE）的初始化设置。

—建立和修改网络拓扑图。

—配置网元状态。

—NE 的状态和控制。

—实际网络的配置应能按用户请求以图形方式在网元管理系统屏幕上完成。

当前点到点 WDM 系统的配置功能还较少，由复用器 / 解复用器背对背方式实现波长上下，没有波长直接上下和交叉连接能力，配置功能很弱。随着 OADM 和 OXC 的引入，其配置功能会大大加强。 4.4 安全答理

—安全管理应至少能提供下述管理功能：

—操作级别及权限划分。

—用户登录管理。

—口令管理。

—操作记录。

—安全检查，如核查口令。

—安全告警。

—未经授权的人不能接入管理系统，具有有限授权的人只能接入相应授权的部分。

## 5 本地维护终端 LCT

本地维护终端 LCT 提供对所供设备的本地维护能力，其管理能力符合 4 项中有关网元的管理功能。在没有网元管理系统的 WDM 终端站，可以只配备 LCT 对 WDM 系统进行常规测试、维护。有些厂家的 LCT 具有远端接入能力，可以查看远端网元的工作情况，这在实际维护中有一定益处。运营者可以根据自己的需要，决定 LCT 是否具有远端接入功能。

## 6 网元管理系统数据通道的保护

WDM 系统的承载量很大，其保护也十分重要。当某光纤段中光监控通路双向都断路时（如光纤段的两根光纤都断开时），网元管理系统将无法获取网元的监控信息，网管对整个 WDM 系统无法进行配置和实时的性能监测。为防止这种情况带来的严重后果，WDM 系统必须具有对监控通路（OSC）的保护功能，有必要对网元管理系统的数据库保护。

一般的方法是除了光监控通道（OSC）中 DCC 通道承载网管信息外，在 WDM 系统的两个终端站还可以提供 DCC 通道的保护路由 DCN（数据通道网），DCN 可以为 X.25、IP 或数据专线，现在厂家大多采用 IP 或数据专线作为 DCC 的保护路由。这样，即使线路中的两条光纤都被切断，设在 WDM 系统终端站的 EM 管理系统仍可通过 DCN 和 OSC 中的 DCC 访问到线路系统中的任何网元。如图 3 所示。

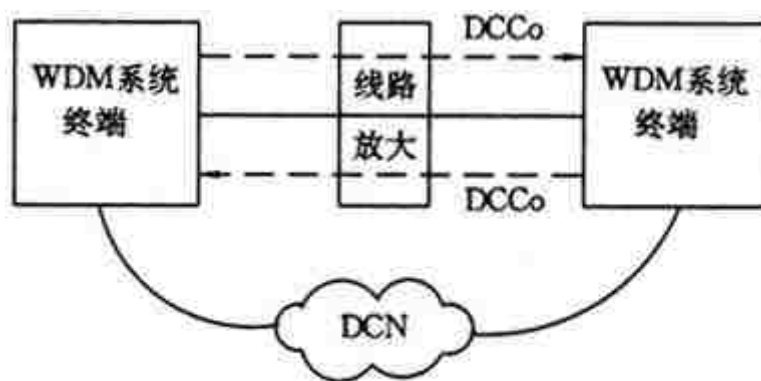


图 3 DCC 通道保护路由

## 7 结 语

WDM 网络管理系统是对 WDM 系统及光网络的最大考验，失去了电信号的接入，运营者比较难于评估信号质量和系统传输性能，在光域上加入开销和光信号处理技术还待发展。在功能完善的 WDM 网管系统出现之前，WDM 系统还不能被称作一个成熟的光传输系统。

现在各厂商 WDM 系统的网管系统都还不尽完善，且功能相差甚远，这在很大程度上与 ITU-T 缺少明确统一的规范有关，另外与 WDM 系统发展的“初级阶段”有关。相信随着 ITU-T “光联网”建议的成熟和光开销处理技术的发展，WDM 系统的网管系统会逐步完善起来。

## 第五讲 WDM 系统测试及仪表

### 1 概述

随着国内多条干线 WDM 系统的开通，WDM 系统测试和维护成为大家面临的一个实际问题，WDM 系统是一种光域的模拟系统，可看作平行许多光通路，每个采用稍微不同的光波长，共享一种传输媒质——光纤的系统。它与 SDH 系统在测试参数和方法上有较大

差异，除了常规数字系统的误码和抖动外，模拟量特别是光域的模拟量测量大大增加，例如光通道功率、中心波长、串音、光信噪比等。另外 WDM 仪表，特别是光谱分析仪、多波长计的应用也有一些新参数。

## 2 WDM 系统中测试的物理量

在常规 SDH 系统中，主要是进行数字信号的性能测量，如误码、抖动性能等，监测的模拟量基本上限制在发送机的发送光功率和接收光功率等。而在 WDM 系统中，需要测试的模拟量就大大增加，如光信号波长、发送光功率、接收光功率和信号的光信噪比等，对光信号波长、光信噪比和串音的测试是 WDM 系统所特有的，而且在多个测试点还需要进行重复测试。WDM 系统增加的主要测试参数有：

- . 波长中心频率和波长间隔：测量每个通路波长的精确值，以确定 DFB 激光器的漂移，保证相邻波长不发生串扰。

- . 光信噪比：确定光信号的传输质量，噪声的测量必须基于通路之间的噪声电平。
- . 串音：由于波分复用器 / 解复用器不完善带来的串扰，确定器件带来的通路间相互干扰。

- . 功率：各参考点合路的总功率、各路的功率

- . 光监控通路，光监控通路的误码、抖动等。

下面分别进行具体介绍，而对于与常规 SDH 系统类似或可参照的测试量则不再赘述。

### 2.1 通路中心频率和中心频率偏移

WDM 系统的一个重要特点是在光波分复用器处输入的信号均为固定波长的光信号，各个通路的信号波长不同，而且对中心频率偏移有严格规定，通路中心频率偏移定义为通路实际的中心频率与通路中心频率标称值的差值。如对于  $8 \times 2.5 \text{Gb/s}$  WDM 系统，通路间隔选择 200GHz，到寿命终了时的波长偏移不大于  $\pm 20 \text{GHz}$ 。理想情况下，光信号的脉冲宽度应无限接近于 0，但实际产生的脉冲都有一定的宽度，相邻两个通路如果波长偏移过大，就会造成通路间的串扰过大，即一个通路的脉冲边带串到另一个通路的脉冲边带上，使被串通路的信号光特性和功率等发生变化，造成系统 OSNR 下降，产生误码



影响传输性能，因此通路中心频率成为 WDM 系统的一个重要的测量参数。通路中心频率定义为在该参考点测得的光信号的实际中心频率，在多个参考点都需要逐通路地进行测试。

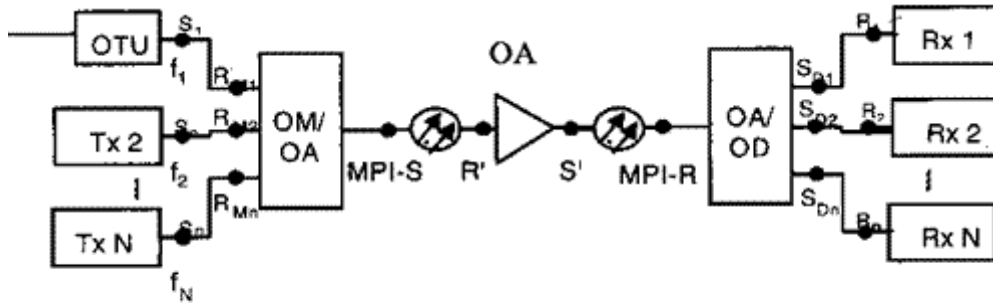


图 1 WDM 系统的参考配置

如图 1 所示，在图中的参考点已 MPI-S、R'、S'、MPI-R 和 R 都需要测量每个通路的中心波长，并与系统指标相比较是否相符。

通路间隔指相邻波长间的频率差别（或波长差异），我国规范的 WDM 系统是等间距的系统。对于  $8 \times 2.5\text{Gb/s}$  WDM 系统，通道间隔为  $200\text{GHz}$  ( $1.6\text{nm}$ )，而对于  $16 \times 2.5\text{Gb/s}$  WDM 系统，通道间隔为  $100\text{GHz}$  ( $0.8\text{nm}$ )，相邻两波长中心频率之差就为通路间隔。

## 2.2 光信噪比 (OSNR)

光放大器是 WDM 系统的一个重要组成部分。EDFA 在  $1545 \sim 1560\text{nm}$  波长范围的增益较平坦，EDFA 输出的放大信号中有 ASE 噪声，即信号是叠加在 ASE 噪声上的，因此单纯测量每通路信号的光功率并不能完全反映系统的工作情况，有可能信号光功率很高，但 ASE 噪声也与它相当，实际上信号的劣化已很明显，但光功率反映不出来，所以在 WDM 系统中引入了光信噪比的概念。每通路信号的光信噪比定义为通路内信号功率与噪声功率的比值，即 
$$OSNR = \frac{S_{\text{signal}}}{N_{\text{ASE}}}$$
，S 与 N 均在光有效带宽  $\Delta\nu$  内测

量。光信噪比的定义是在  $\Delta\nu=0.1\text{nm}$  带宽内光信号功率和噪声功率的比值。光信号的功率一般取峰峰值，而噪声的功率一般取两相邻通路的中间点的功率电平。光信噪比是一个十分重要的参数，对估算和测量系统的误码性能和实际工程设计和维护有着十分重要的意义。

OSNR 在多个参考点都需要逐通路地进行测试,如图 1 所示,在图中的参考点 MPI-S、R'、S'、MPI-R 都需要测量每个通路的 OSNR,监测其是否与系统指标相符。

### 2.3 光放大器和波分复用器件

对光放大器需要进行测试的项目较多,主要有如下指标:

- . 输入功率范围;
- . 输出功率范围;
- . 工作带宽;
- . 小信号增益;
- . 饱和输出功率;
- . 噪声系数;
- . EDFA 平坦度。

对光放大器的测试比较复杂,需要集成化平台,一般并不常见,而用分离设备搭建平台测试则误差过大,因此对光放大器的某些参数只能进行验证,根据给定的输入条件,观察光放大器的输出是否符合要求,这也是目前情况下较为现实的一种做法。其中实际测量较多的是 EDFA 的平坦度,因为级联 EDFA 的 WDM 系统很大程度上决定于光放大器的平坦度,比较平坦的光放大器,容易实现各通路的增益均衡,反之则需要复杂的系统设计。光放大器噪声系数也非常重要,对于 WDM 系统的光信噪比有着至关重要的影响。但该指标测量起来十分复杂,且随着输入功率的变化而改变,因而日常维护不需要测试。

波分复用器件也是 WDM 系统引入的新器件,将不同光源波长的信号结合在一起的器件称为合波器。反之,经同一传输光纤送来的多波长信号分解为个别波长分别输出的器件称分波器,有时同一器件既可作分波器,又可以作合波器。对波分复用器的测试项目包括。

- . 插入损耗;

- . 隔离度;
- . 极化相关损耗;
- . 温度特性;
- . 通带特性 (通路的 3dB 带宽和 1dB 带宽)。

其中最为重要的指标是隔离度。该指标的大小对信道的串音水平有着直接影响。一般来说, 相邻通路的隔离度应在 25dB 以上, 非相邻通路的隔离度应在 30dB 以上。

波分复用器和光放大器的测试相对来说比较复杂, 涉及到器件的水平。一般的维护只对系统指标进行测试, 而不会分离器件测试。 2.4 光监控通路

光监控通路是 WDM 系统的一个重要部分, 它传送的是 WDM 系统网管信息, 因此这个通路的运行状况会直接影响到整个 WDM 系统的运行状况, 对该通路进行测试是必须的。对光监控通路的测试项目主要包括发送光功率、发送波长、接收光功率、光谱特性和光监控通路的误码性能等, 监控通路波长和监控通路的误码性能是比较重要的两个项目。其中对于采用 G. 704 帧结构 CRC-4 校验的系统, 可以实现在线的误码检测。

## 2.5 WDM 系统的传输性能

在 WDM 系统承载的 SDH 系统中, 相对于 WDM 系统, SDH 只是它的承载信号, 因而当衡量 WDM 系统传输质量时, 必须以 SDH 2.5 Gb / s 的信号作为标准, 除了测试 SDH 支路 155Mb / s 电接口的指标外, 系统必须增加对 2.5Gb / s 误码和抖动的测试。在电域上最好以 2.5Gb / s 的群路传送信号为标准。配备的误码仪必须可以进行 2.5Gb / s 的误码和抖动测试。仪表具有 2.5Gb / s 的光口, 输出信号为满负载的 2.5Gb / s 信号。HP37718A 可以输出 16 个 VC-4 级联的 2.5Gb / s 满负荷伪随机序列, 使我们衡量 WDM 系统传输性能时更有说服力。主要增加的指标有:

- . 2.5Gb / s 的 BER 性能;
- . 2.5Gb / s 的输出抖动;
- . 2.5Gb / s 的输入抖动容限。

开放式 WDM 系统引入了波长变换器 OTU，OTU 应具有和 SDH 2.5Gb/s 再生中继器一样的抖动传递特性和输入抖动容限。这两项指标也是新增加的项目。

### 3 WDM 系统测试仪表

WDM 系统测试仪表有些与常规 SDH 系统是相同的，如误码仪用于测量单通路的误码性能和抖动性能等，示波器用于测量脉冲眼图。但是 WDM 系统的有些测试项目与 SDH 系统不同，这就决定了仪表有其特殊性，如用光谱仪和多波长计来评估光信号的质量。在详细介绍这两种仪表之前，有必要介绍一些仪表参数的定义。

动态范围是指在强信号下测量弱信号的能力，即在特定带宽下同时测量比较强的光信号功率和相邻的比较高的 ASE 噪声的能力。例如，对于间隔 10GHz 的系统，仪表在测量光信号功率的同时，可以测量间隔 0.4nm 处比信号低 30dB 或 35dB 的 ASE 噪声电平。

分辨率带宽：一般定义仪表为对单色测试信号的 3dB 响应带宽。分辨率带宽决定了仪表处理光通路间隔的能力。

光灵敏度：定义为能定量测量的最小光功率。主要取决于仪表光检测器的水平。该值必须足够低，以测量光电器件的插入损耗和评估整个网络的信噪比。

#### 3.1 多波长计

多波长计多采用迈克尔逊干涉仪原理制造，它测量波长精度较高，绝对准确度可达 0.005nm。特别适合于测量波长间隔小（100GHz 或更小）的密集 WDM 系统，多波长计可以精确地确定 DFB 激光器的中心波长，以确认激光器是否正常工作。同时可以测量多通路的中心频率。它所测量的波长数目主要取决于干涉仪的物理精度和 FFT（傅里叶变换）的能力，一般通路数在 40~100 左右，并且可以测量波长漂移。其缺点是动态范围小，测量 OSNR 时精度稍差，误差一般在 1~2dB。但比起光谱分析仪一体积较小，操作比较方便。

在 WDM 系统中测量通路中心频率和中心波长漂移时多采用多波长计，测量信号光功率电平时也可以使用。现在市场上商用化多波长计有 HP 86120B 和 EXFO FTB-5320。表 1 是两种多波长计的性能比较。

表 1 两种多波长计的性能比较

项 目	HP86120B	EXFO FTB-5320
波长范围 (nm)	700~1650	1450~ 1650
波长精度 (nm)	0.005	0.005
OSNR 测试范围(0.1nm)(dB) >35		>25
接收灵敏度 (dBm)	-40	-30
电平测试范围 (dBm)	-40~+10	-30~+10
电平测试精度 (dBm)	≤0.5	≤0.5

### 3.2 光谱仪

光谱分析仪是在实验室应用较多的仪表，它出现比较早，采用的技术比较多，有单光栅型、双光栅型，本来并不是专为 WDM 系统设计的仪表，WDM 系统刚出现时，多用它测试信号波长和光信噪比。它的主要特点是动态范围高，一般厂家可达 70 dB；灵敏度好，可以达到-90dBm；分辨率带宽小，一般<0.1nm。它比较适合于测试 OSNR，另外测量波长范围大，一般在 600nm~1700nm。但测量中心波长时精度稍差；体积也较大，一般适合在实验室、机房中使用，也适合在工程开通、验收中使用。

各参考点通路信号光功率、各参考点光信噪比、光放大器各个波长的增益系数和增益平坦度的测试可以采用光谱分析仪，它在测量单个波长的光功率时精度较高，而且测量光信噪比也更准确，但使用起来相对较复杂，需要设置的项目多一些，如在测量 OSNR 时需要设置滤波器的带宽为 0.1nm。另外它和宽带光源相配合，还可以测量波分复用器的通带特性。

HP 公司用于 WDM 系统测试的光谱分析仪为 HP86143A，Anritsu 公司为 MS9710B，W &G 公司的光谱分析仪为 OSA-155。

## 4 结 论

本文着重论述了 WDM 系统所特有的一些测试项目，如通路中心频率、光信噪比等，介绍了光谱仪和多波长计等新引入的测试仪表和相应的参数，并对各厂家的仪表性能进行了比较，但局限于篇幅，对具体的测量方法没有介绍。相信随着 WDM 系统在国内的广泛使用，这方面的经验会越来越多，人们也会越来越熟悉。



## 第六讲 光波分复用技术

### ——WDM 系统技术规范

随着 WDM 系统的大规模建设，对标准的需要也越来越强烈。WDM 系统不像 SDH 系统那样有严格统一的规范。主要原因在于 SDH 系统是 ITU-T 先制定了标准规范，各大厂商再根据标准去制造产品，而 WDM 系统的发展却恰恰相反，是各厂商先有产品，而且规范不一，都认为自己是最好的选择，因此到现在为止 ITU-T 还没有形成统一的规范。因此，为了使引进产品和国内自行开发的产品具有统一性，制订我国的标准是十分必要的。

在制定我国 WDM 规范时，必须先确定波分复用系统的通道数目。从最近几年看，16（8）波长的应用将是第一步。从各个公司现在推出的产品看，几乎全是间隔为 100GHz 的 16 波分系统。这主要有以下原因：（a）现实的需要性，以 2.5Gb/s 系统为例，16 波分单向就可达到 40Gb/s 的传输速率，这足以满足未来几年的业务需求；（b）技术的可行性。当前波分复用器件和激光器元件的技术都满足 16 个波长以上的复用。有鉴于此，我们所考虑的主要是用于干线系统的 1550nm 的 16 通路密集波分复用技术。

从当前应用上看，WDM 系统只用于 2.5Gb/s 以上的高速率系统。因而在制定规范的过程中，我们主要考虑了基于 2.5Gb/s SDH 的干线网 WDM 系统的应用，承载信号为 SDH STM-16 系统，即 2.5Gb/s×N 的 WDM 系统。对于承载信号为其他格式（例如 IP）的系统和其它速率（例如 10Gb/s×N）暂不作要求。

在 WDM 系统规范中，只考虑了点到点的线性系统。目前世界上大规模建设的 WDM 系统几乎无一例外的都是点到点的系统，而且大部分没有采用 OADM。在有业务上下的节点上，采用了复用器/解复用器的背对背方式，因此我们规范的都是点到点的线性系统，而没有考虑环型或其它应用。

## 1 集成式系统和开放式系统

WDM 系统根据其分类，可以分为开放式 WDM 系统和集成式 WDM 系统。

集成式系统就是 SDH 终端设备具有满足 G. 692 的光接口：标准的光波长、满足长距离传输的光源（又称彩色接口）。这两项指标都是当前 SDH 系统不要求的。即把标准的光波长和长受限色散距离的光源集成在 SDH 系统中。整个系统构造比较简单，没有增加多余设备。但在接纳过去的老 SDH 系统时，还必须引入波长转换器 OTU，完成波长的转换，而且要求 SDH 与 WDM 为同一个厂商，在网络管理上很难实现 SDH、WDM 的彻底分开。集成式 WDM 系统如图 1 所示。

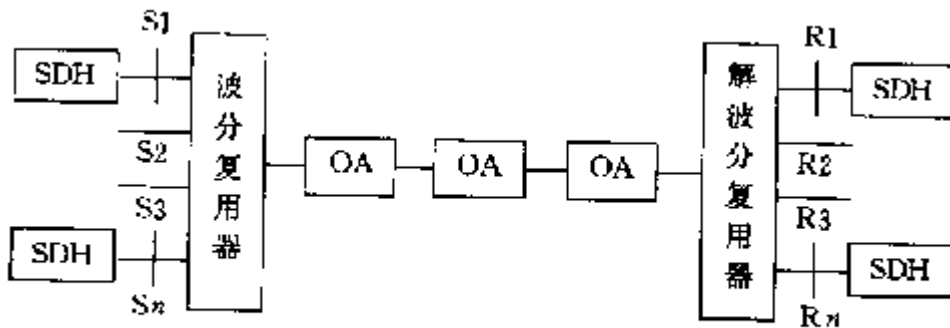
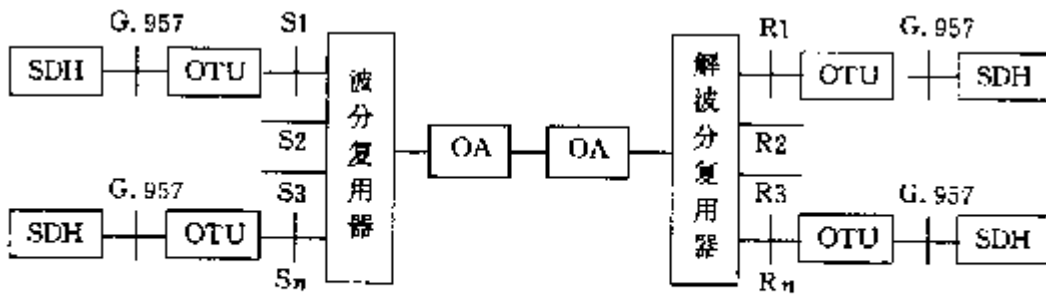


图 1 集成式 WDM 系统



注：接收端的 OTU 是可选项

图 2 开放式 WDM 系统

开放式系统就是在波分复用器前加入 OTU（波长转换器），将 SDH 非规范的波长转换为标准波长。开放是指在同一 WDM 系统中，可以接入多家的 SDH 系统。OTU 对输入端的信号没有要求，可以兼容任意厂家的 SDH 信号。OTU 输出端满足 G. 692 的光接口：标准的光波长、满足长距离传输的光源。具有 OTU 的 WDM 系统，不再要求 SDH 系统具有 G. 692 接口，可继续使用符合 G. 957 接口的 SDH 设备；可以接纳过去的 SDH 系统，实现不同厂家 SDH 系统工作在一个 WDM 系统内，但 OTU 的引入可能对系统性能带来一定的负面影响；

开放的 WDM 系统适用于多厂家环境，彻底实现 SDH 与 WDM 分开。开放式 WDM 系统如图 2 所示。

图 3 是一个波长转换器 OTU。该器件的主要作用在于把非标准的波长转换为 ITU-T 所规范的标准波长，以满足系统的波长兼容性。现在已商用的产品中，使用的依旧是光 / 电 / 光 (O / E / O) 的变换，即先用光电二极管 PIN 或 APD 把接收到的光信号转换为电信号，然后用该电信号对标准波长的激光器重新进行调制，从而得到新的符合要求的光波长信号。

对于集成系统和开放系统的选取，运营者可以根据需要。在有 SDH 系统多厂商的地区，可以选择开放系统，而新建干线和 SDH 制式较少的地区，可以选择集成系统。但是现在 WDM 系统采用开放系统的越来越多。

**2 工作波长区的选择** 对于常规 G.652 光纤，ITU-T G.692 给出了以 193.1THz 为标准频率、间隔为 100GHz 的 41 个标准波长 (192.1~196.1THz)，即 1530~1561nm。但在实际系统中，考虑到当前干线系统应用 WDM 系统主要目的是为了扩容，全部应用的可能性几乎为零，因为在整个 EDFA 放大频谱 1530~1565nm 内，级联后的 EDFA 的增益曲线极不平坦，可选用的增益区很小，各波长信号的增益不平衡，必须采取复杂的均衡措施，并且当前业务的需求并没有那么大的容量。综合各大公司的材料，1548~1560nm 波长区的 16 个波长更受青睐，西门子和朗讯都采用了这一波长区。在 1549~1560nm 波长区间，EDFA 的增益相对平坦，其增益差在 1.5dB 以内，而且增益较高，可充分利用 EDFA 的高增益区，见图 4。在多级级联的 WDM 系统中，容易实现各通路的增益均衡。另外该区域位于长波长区一侧，很容易在 EDFA 的另一侧 1530~1545nm 开通另外 16 个波长，扩容为 32 通路的 WDM 系统。



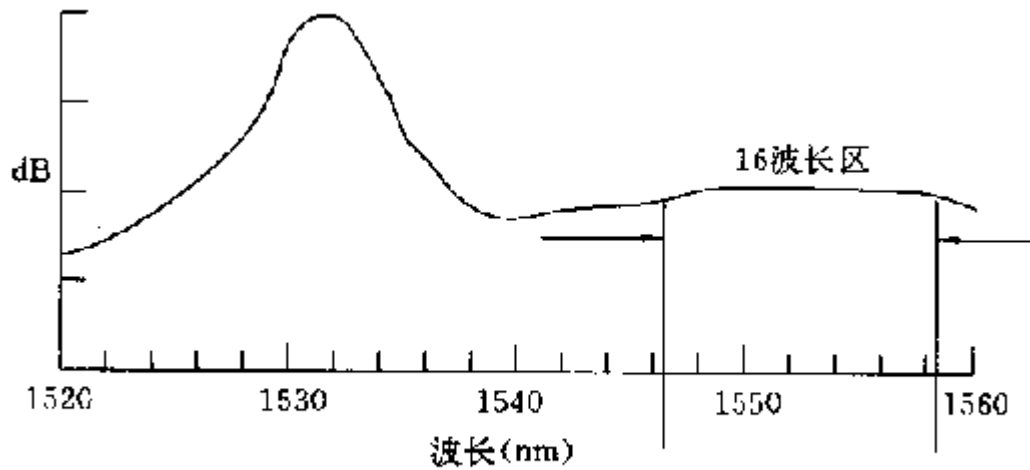


图 1 16 波长区的选择

16 通路 WDM 系统的 16 个光通路的中心频率应满足表 1 的要求,8 通路 WDM 系统的 8 个光通路的中心波长应选表: 中加 \* 的波长。

表 1 16 通路和 8 通路 WDM 系统中心频率

序号	中心频率 (THz)	波长 (nm)
1	192.1	*1560.61
2	192.2	1559.79
3	192.3	*1558.98
4	192.4	1558.17
5	192.5	*1557.36
6	192.6	1556.55
7	192.7	*1555.75
8	192.8	1554.94
9	192.	*1554.13
10	193.0	1553.33
11	193.1	*1552.52
12	193.2	1551.72
13	193.3	*1550.92
14	193.4	1550.12
15	193.5	*1549.32
16	193.6	1548.51

WDM 系统除了对各个通路的信号波长有明确的规定外，对中心频率偏移也有严格规定。通路中心频率偏移定义为通路实际的中心频率与通路中心频率标称值的差值。对通路间隔选择 100GHz 的  $16 \times 2.5 \text{Gb/s}$  WDM 系统，到寿命终了时的波长偏移应不大于  $\pm 20 \text{GHz}$ 。

### 3 光接口分类

由于现在应用的 WDM 系统都是用于干线长途传输，因而我国只选用有线路光放大器的系统，不考虑两点之间的无线路光放大器的 WDM 系统。现阶段我们只考虑确定 8 波长和 16 波长的应用。

对于长途 WDM 系统的应用，我们规定了 3 种光接口：即  $8 \times 22 \text{dB}$ ， $3 \times 33 \text{dB}$  和  $5 \times 30 \text{dB}$  系统。其中 22dB、30dB 和 33dB 是每一个区段 (Span) 允许的损耗，而前一个数字 8 (5, 3) 则代表区段 (Span) 的数目。

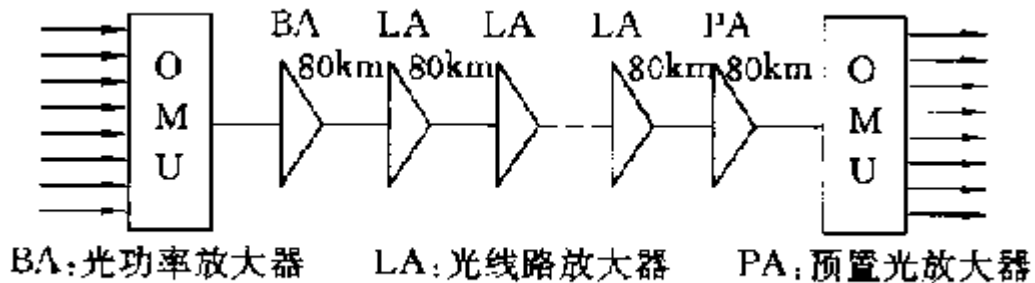


图 5  $8 \times 22 \text{dB}$  系统构成

图 5 为  $8 \times 22 \text{dB}$  系统的示意图。该系统由 8 段构成，每两个 LA 之间的允许损耗为 22dB，BA 和 PA 分别是功率放大器和预放大器，LA 是线路放大器。假设光纤损耗以  $0.275 \text{dB/km}$  为基础（包括接头和光缆富裕度），22dB 对应于 80km 的光纤损耗，则  $8 \times 22 \text{dB}$  WDM 系统可以传输  $8 \times 80 \text{km} = 640 \text{km}$  的距离，中间无电再生中继。

80km 比较符合我国中继段的情况，可以满足大部分地区中继距离的要求。目前干线的中继段距离大多在 50~60km。另外  $8 \times 22 \text{dB}$  系统技术上相对成熟，可靠性高，性能好，光信噪比 (OSNR) 比  $3 \times 33 \text{dB}$  和  $5 \times 30 \text{dB}$  要好 4~5dB。因此可作为干线传输和省内二级干线传输的优选系统。

考虑到西北地区有可能出现超长中继的情况，增加了  $3 \times 33\text{dB}$  系统（可以传输  $3 \times 120\text{km} = 360\text{km}$ ），以适应某些沙漠地区超长中继距离的需要。另外由于  $5 \times 33\text{dB}$  的实现尚需要研究，并结合我国实际情况，在中继距离  $80\text{km}$  和  $120\text{km}$  以外，我们引入每区段（Span）损耗  $30\text{dB}$ （传送距离为  $100\text{km}$  左右）、5 个 Span 的系统，即  $5 \times 30\text{dB}$  系统，作为长中继距离，多段数的补充，也是  $5 \times 33\text{dB}$  的替代。这样使每个区段（Span）的距离由 2 种（ $80\text{km}$ 、 $120\text{km}$ ）增加到 3 种（ $80\text{km}$ 、 $100\text{km}$  和  $120\text{km}$ ），增加了组网的灵活性。

在 WDM 系统中，目前的 8 通路系统不能被升级为 16 路系统，除非该 8 路系统是配置不完全的 16 通路系统的子集，否则都不能直接升级，即没有前向兼容性。这就要求运营者在建设 WDM 系统时，应对本地业务量发展有着正确的估计，以选择合适的通路数。

#### 4 光接口参数

在 ITU-T G. 692 建议中，对于点到点 WDM 系统的光接口参数几乎为零，为了增加可操作性，我们重点参考了几家大公司的产品标准，制定了较详细的系统接口规范，增加了标准化程度，具有较强的可操作性，特别是考虑到高功率条件下的非线性效应和光信噪比要求，合理地选择入纤功率，并对开放系统和集成系统提出了相应要求。在开放的 WDM 系统中，对于 OTU 在发送端、再生中继器和接收端的不同应用，分别给出了具体指标。考虑到维护人员的需要，对 EDFA 增加了在线监测口的要求，以方便日常的维护测试。

针对 WDM 系统的模拟性质，我们特别制定了 WDM 系统接收端光信噪比（OSNR）数值，对于  $8 \times 22\text{dB}$  的系统，其光信噪比为  $22\text{dB}$ ；而对于  $5 \times 30\text{dB}$  和  $3 \times 33\text{dB}$ ，则要求分别为  $21\text{dB}$  和  $20\text{dB}$ 。因为系统的 OSNR 很大程度上决定于区段（span）的损耗。区段（span）的损耗越大，则最后系统的性能越差。由于篇幅所限，参数的具体内容在此不详述。

#### 5 性能要求

目前，WDM 系统还缺少一套衡量其传输质量的标准。虽然光信噪比（OSNR）可以衡量系统传输质量，但还存在一定缺陷。当光信噪比（OSNR）很高时（ $>22\text{dB}$ ），系统的质量可以保证（一般  $\text{BER} < 10^{-15}$ ）。当 OSNR 工作在临界状态，例如  $15 \sim 17\text{dB}$  时，OSNR 就很难定量地评估信号传输质量；再考虑到信号脉冲传输中出现的波形失真，有时 OSNR 较高时相应的误码率有可能较差。因而承载信号的质量很大程度上还需要在电域上进行评估。

实际上国家骨干网的 WDM 系统是基于 SDH 系统的多波长系统，因而其网络性能应该全部满足我国 SDH 标准规定的指标，包括误码、抖动和漂移。WDM 系统在一个光复用段内，只有一个电再生段，没有任何转接，因而不能用通道指标进行衡量，暂定采用复用段指标进行要求。该指标与具体 WDM 系统光复用段长度无关。

开放式 WDM 系统引入了波长变换器 OTU，OTU 应具有和 SDH 再生中继器一样的抖动传递特性和输入抖动容限。

## 6 光监控通路（OSC）要求

与常规 SDH 系统不同，WDM 系统增加对 EDFA 监视和管理。由于在 EDFA 上业务信号不进行上下，无电接口接入，只有光信号的放大，而且业务信号的开销（如 SDH）上也没有对 EDFA 进行控制和监控的字节，因而必须增加一个电信号对 EDFA 的运动状态进行监控。现在经常采用的是在一个新波长上传送检测信号。

对于使用线路放大器的 WDM 系统需要一个额外的光监控通路，这个通路能在每个线路光放大器处进行上下。光线路放大器 EDFA 的增益区为 1530~1565nm，光监控通路必须位于 EDFA 有用增益带宽的外面，我们规定采用 1510nm 波长。

监控通路的接口参数见表 2。

表 2 监控通路的接口参数

监控波长	1510nm
监控速率	2Mb/s
信号码型	CMI
信号发送功率	(0~7dBm)
光源类型	MLM LD
光谱特性	待研究
最小接收灵敏度	-48dBm

## 7 WDM 系统的保护

WDM 系统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 OMSP，在光路上同时对合路信号进行保护。

### 7.1 善于单个液长，在 sn11 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。如图 6 所示，SDH 信号在发送端被永久桥接在工作系统和保护系统上，在接收端监视从这两个 WDM 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，但是成本也高。与此原理相一致，还可以实现基于单个波长，在 SDH 层实施的 1: n 保护。

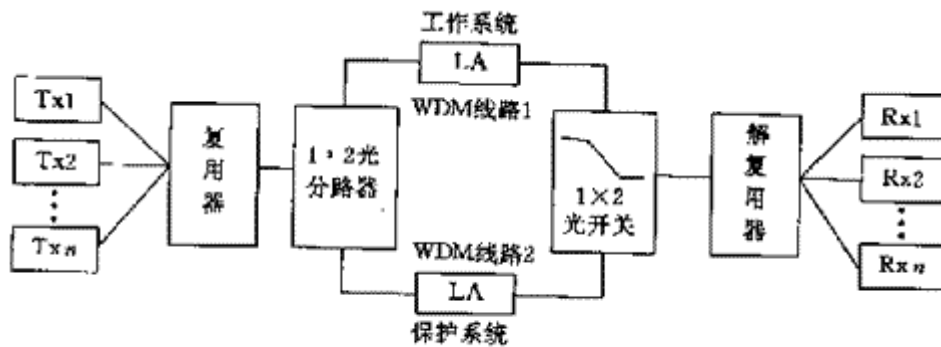


图 7 光复用段(OMSP)保护

另外一种方式是基于单个波长、同一 WDM 系统内 1: n 路的 WDM 系统中，n 个波长通道作为工作波长，1 个波长通路作为保护。但是实际系统中，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，实际意义不太大。

### 7.2 光复用段 (OMSP) 保护

这种技术是只在光路上进行 1+1 保护，而不对终端设备进行保护。在发端和收端分别使用 1x2 光分路器或光开关，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。

图 7 是采用光分路器和光开关的光复用段保护方案。在这种系统中，只有光缆和 WDM 的线路系统是备份的。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 的全保护，该方法减少了成本。光复用段保护只有在独立的两条光缆中实施才有实际意义。

## 8 安全要求

对于含光放大器的 WDM 系统，安全特别重要。因为一般情况下，光放大器系统工作在高功率情况下，有的已经在光纤安全功率极限的边缘。ITU-T 建议规定：单路或合路入纤最大光功率电平为+17dBm。对链路切断情况下可能引起的强烈“浪涌”效应更应加以重视，必须保证系统能够及时关闭泵浦源和系统，以防止对系统造成损害。

### 8.1 光“浪涌”的产生

使用 EDFA 放大光信号，当输入光功率迅速增大时，由于 EDFA 的慢增益动态效应会产生光浪涌，输出光功率出现“尖峰”，特别是对级联 EDFA 的情况下，其峰值功率可以到数十瓦，其原理如图 8 所示。

在光缆突然被切断或其它原因导致信号丢失时，如果泵浦源不关闭，泵浦源还处于泵浦“状态，使高能级“泵浦”状态下的离子浓度达到最大。这时，当信号经过一段时间恢复后，如果一个较高功率的信号进入掺铒光纤，将引起几乎所有的亚稳态离子发生受激辐射翻转，使 EDFA 的输出达到一个最大值[+30dBm (1W) 以上]。这种高功率是非常危险的，有可能“烧坏”光连接器和接收机。

8.2 光浪涌的防止 (Optical surge prevention) 采用图 8 所示的方法可以防止光浪涌。当光缆切断或其它原因引起 LOS 被检出时，当时间积累到一定长度，应减小直至切断向 EDFA 馈送的泵功率。而当链路恢复时，应待光信号恢复一定时间后，再恢复向 EDFA 泵功率。对于 WDM 系统，只有当所有主通路的光信号都丢失时才启动 EDFA 自动功率关断 (APSD) 进程。APSD 实施时，不影响并且能保持所有 OSC (光监控通路) 功能的实施。

## 9 单纤双向传输

与单纤单向 WDM 相比，单纤双向 WDM 系统可以减少光纤和线路放大器的数量。但双向 WDM 设计比较复杂，必须考虑多通过干扰 (MPI)、光反射的影响，另外还需考虑串音、两个方向传输功率电平数值、OSC 传输和自动功率关断等一系列问题。

从现在得到的资料看：大部分公司都是采用单纤单向系统。单纤双向 WDM 只适用于光缆对比较紧张的情况，目前只有 Nortel 采用了这种技术。单纤双向在于线中应用的机会并不多。因为它只适用于光纤芯数极少的地区，而通常干线的芯数都在 24 芯以上。这种技术适合在一些边远地区采用，而边远地区的业务量似乎尚不能达到  $N \times 2$ 。5Gb/s 超高速容量，真正实施的可能是 622Mb/s 或 155Mb/s 系统的简单两波分或类似系统。

对于单纤双向系统，我们没有完全予以禁止，但也并不提倡。在光纤芯数可以满足要求时，最好仍采用单纤单向的 WDM 系统，只有在那些光纤芯数极少的地区，才有必要考虑采用单纤双向系统。

## 10 总结

当前，WDM 技术仍处于快速发展阶段，今年内，许多厂商的  $32 \times 2.5\text{Gb/s}$  系统都将投入商用，另外  $N \times 10\text{Gb/s}$  的 WDM 技术也发展很快，我们目前制定的规范仅仅对当前引进和建设的  $16(8) \times 2.5\text{Gb/s}$  WDM 系统参数进行了具体规定，对于 16 通路以上的 WDM 系统的光接口参数还没有规范。但是许多普遍性原则，例如 WDM 分层结构、光接口分类、保护以及安全要求等在多通路 WDM 系统中仍将适用。另外我们也会加快  $32 \times 10\text{Gb/s}$  ( $2.5\text{Gb/s}$ ) 和其它拓扑结构的 WDM 系统（如 WDM 环网）的标准化，以满足国内迅速发展的 WDM 技术的要求。

## 第七讲 密集波分复用 (MWD) 和稀疏波分复用 (CWD)

### 定义和概述

#### 定义

所谓密集波分复用 (Dense Wavelength Division Multiplexing) 技术，也就是人们常说的 DWDM，指的是一种光纤数据传输技术，这一技术利用激光的波长按照比特位并行传输或者字符串行传输方式在光纤内传送数据。

#### 概述

本文将引领读者了解可伸缩的 DWDM 系统在促使服务供应商满足消费者日益增长的带宽需求这一领域所具有的重要性。DWDM 是光纤网络的重要组成部分，它可以让 IP 协议、ATM 和同步光纤网络/同步数字序列 (SONET/SDH) 协议下承载的电子邮件、视频、多媒体、数据和语音等数据都通过统一的光纤层传输。

#### 1. 当前通信网络所面临的问题

为了理解 DWDM 和光网互联的重要性，我们就必须在通信产业、特别是服务供应商当前面临何种问题这一大前提下讨论 DWDM 技术所带来的强大功能。我们知道，在网络的设计和建设时期，工程设计人员必须对网络未来的带宽需求作出合理的估计。目前，美国等地区铺设的大多数网络对带宽的需求估计都是来源于古典的工程公式概算，比如泊松 (Poisson) 概率分布模型等。结果呢，网络所需带宽量的估测值通常按照某种统计假设条件给出，比如，一般认为个人在通常的情况下，在一个小时之内只会使用 6 分钟的网络带宽。然而，这一数学模型并没有考虑到由于 Internet 接入（这一业务的数

据流量的年增长率是 300%)、传真、多条电话线路、调制解调器、电话会议、数据和视频传输等业务而产生的数据流量。如果考虑到这些因素，网络带宽的用户使用模型就和现有的设计初期估计大大不同了。实际上，在今天的日常生活中，许多人平均使用网络带宽的时间是 180 分钟甚至超过 1 个小时！

显而易见，运营商们迫切地需要大量的网络容量来满足顾客日益增长的服务需求。据估计，仅在 1997 年，通过一对光缆传输的长途电话的带宽容量就增加到了 1.2 Gbps（百万比特每秒）。当数据传输速度以 Gbps 单位计算的时候，每秒钟可以通过网络传输 1000 本图书的信息。可是，到了今天，假如有 1 百万个家庭希望观赏网站上推出的视频节目或者使用新出现的网络视频应用，那么，在这一需求场合下，网络传输速率就必须达到太比特级（万亿比特每秒：Tbps）。当数据传输速度以 Tbps 单位计算的时候，在一秒钟的瞬间之内，网络就可以传输 2000 万个并发双工电话或者 300 年来出版的全部日报的数据量。

当然，谁也不可能准确地预见到网络带宽的需求增长的如此之快！比方说，有人通过研究预测：从 1994 年到 1998 年，美国长途交换网营运公司（IXC）的网络容量会增长 7 倍，而美国的本地交换网营运公司（LEC）的网络容量会增长 4 倍。可事实上呢，现在已经有公司估计其网络容量会比往年增长 32 倍，而另一家公司单单在 1997 年的网络新增容量就达到了它在 1991 年的整个网络规模。还有家公司声称，其网络的规模在未来 4 年内将达到每半年扩张一倍的增长速率。

除了消费者的带宽需求爆炸性地增加以外，众多服务供应商还面临着其光缆可用余量即将用尽的窘迫局面。有一份产业报告指出：在 1995 年，埋设光缆中已经使用的部分平均在网络中占到了 70%到 80%之多。现在，许多电信运营商的光缆使用率几乎达到了 100%的有效利用率上限。另外还有一个窘迫的难题：网络服务运营商怎么才能在一种物理网络之上部署和集成五花八门的多种通信技术。消费者的需要和企业之间的竞争压力迫使运营商们一方面必须提供在建设和运营成本上比较经济的多种服务，而且另一方面他们还要尽可能地在已经埋设的现有网络基础之上来部署这些业务。还好，辛苦出现了 DWDM 技术，正是 DWDM 为这些运营商们提供了同时满足这些需求的可行解决方案（参看图 1）。



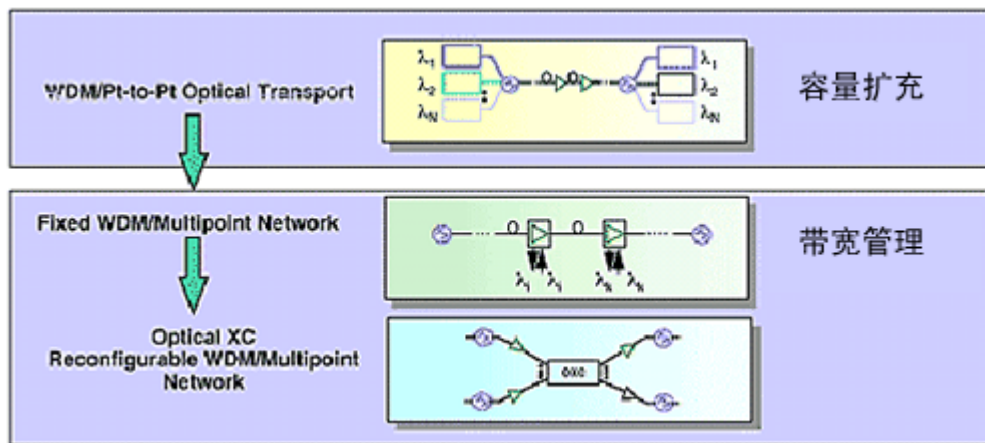


图 1 从光纤传输到光网互联：光子层的发展

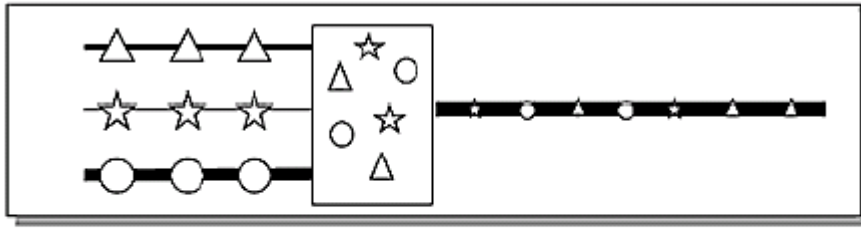
使用 DWDM 技术可以让服务供应商提供传统的 IP over ATM 承载数据、SONET/SDH 承载语音等传输方式所带来的电子邮件、视频和多媒体业务，与此同时，在无须考虑这些不同数据格式的情况之下——不管他们是 IP、ATM 还是 SONET/SDH，DWDM 却能够同等地向这些不同的传输方式提供统一的带宽管理功能，所有以上三种通信协议都可以通过采用 DWDM 技术的光层得以传输。这种统一管理功能可以让服务供应商灵活地仅通过单一网络就足以满足顾客的带宽需求。

运营商要想在商业运营上获得成功，其中的一个关键要旨就是需要一个统一的承载平台，这个平台能够统一承载各种通信技术并且同这些通信技术接口，而且，该平台还应该让运营商具备能把当前和新一代技术集成起来的能力。

## 2. 解决带宽危机

面对以上三个问题：日益增长的服务需求、光缆余量用尽、统一的层次型带宽管理。服务供应商必须找到一条在经济上可行的解决方案。降低光缆耗用率的一个显而易见的措施就是铺设更多的光缆，对那些铺设新光缆的成本可以保持最低的网络来说，这一措施可以证明是最为经济的解决方案。但是，铺设新光缆却并不能促使服务供应商一定能提供新型服务，或者也不能让运营商们获得光传输层带宽的统一管理能力。第二项措施是使用时分复用技术 TDM 来增加数据传输速率，TDM 把时间划分为更小的间隔以便更多的数据得以在同一时间内被传输（参看图 2），结果就增加了光缆的有效容量。其实，这也就是产业内目前已经采用的方案（DS - 1、DS - 2 和 DS - 3 等）。不过，当服务供应商仅仅使用这一措施时，他们的每一次网络扩容都具有显著跳跃性，意味着网络容量的增长很不平滑，很有可能最终让他们获得比当初需求更大的多的带宽，从某种意义上来说，这是很多运营商所不愿意见到的局面，其管理复杂性和投资都会增长得令人头痛不已。以 SONET 技术为例，从 10 Gbps TDM 提升的下一个容量层次就到了 40 Gbps（这一令许

多人深信不疑的巨大跃进对 TDM 技术来说在近期内是不太可能的)。采用 SONET 的北美传输网络和采用 SDH 的国际传输网络就都采用了 TDM 技术。



- **Combines traffic from multiple inputs onto one common high capacity output**
- **Allows high flexibility in managing traffic; fixed bandwidth**
- **Requires electrical mux/demux function**

图 2 增长的网络容量—TDM

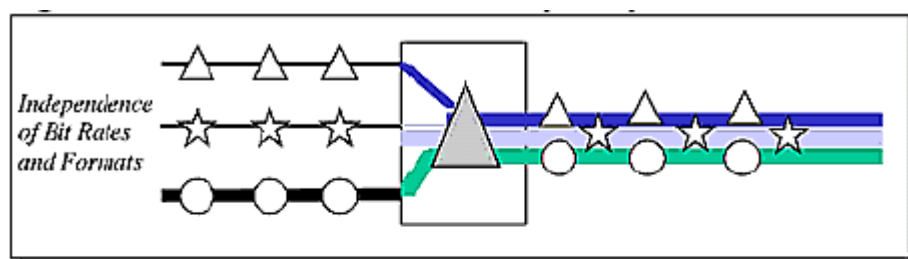
电信产业采纳了 SONET 或 SDH 标准以提供标准的同步光纤网络，通过它所具有的灵活性以匹配当前和未来的数字信号。SONET 或者 SDH 通过定义标准的传输速率和光纤接口来实现以上的目标。比方说，终止 SONET 网络的终端会引入多种电子信号和光信号，这些信号在成为 STS - 1 的数据负载（SONET 网络帧结构的有机组成部分）之前会以电信号的方式被复用，STS - 1 负载随后被复用并以单一速率在单根光纤中传输，这些标准速率是：OC - 3 、OC - 12、OC - 48 乃至最终高达 OC - 192。 SDH 具有和 STM - n 类似的帧结构，其信号速率可以达到 STS - 1 到 STM - 64 范围之内。

SONET 和 SDH 是两种密切相关的标准，就是这两种标准为今天的传输网络奠定了基础。这两种标准决定了传输接口的参数、传输的速率、传输数据的格式和信号复用方式乃至实现高速传输所需要的运行、管理、维护和提供（OAM&P）特性。同步传输模式意味着通过光缆系统流动的激光信号和外部时钟保持着同步。这样做的优点是光缆系统传输语音、数据和图象的数据流可以很平稳、规则的方式流动，结果每一束激光都可以很容易地被对端识别出来。

### 3. 容量扩充和灵活性：DWDM

服务供应商还可以选择的第三种方式就是密集波分复用——DWDM 技术。DWDM 首先把引入的光信号分配给特定频带内的指定频率（波长， $\lambda$ ），然后把信号复用到一根光纤中去，采用这种方式就可以大大增加已铺设光缆的带宽。由于引入（incoming）信号并不在光层终止，接口的速率和格式就可以保持独立，这样就允许服务供应商把 DWDM 技术和网络中现有的设备集成起来，同时又获得了现有铺设光缆中没有得以利用的大量带宽。

DWDM 可以把多个光信号搭配起来传输，结果这些光信号可以编成同一组同时被放大并且通过单一的光纤传输，网络的带宽也就大大增加（参看图 3）了。每个承载的信号都可以设置为不同的传输速率（OC - 3/12/24 等）和不同的格式（SONET、ATM、数据等）。比方说，某个 DWDM 网络可以在 DWDM 基础上混合 OC - 48（2.5 Gbps）和 OC - 192（10 Gbps）两种速率的 SONET 信号。从而获得高达 40 Gbps 的巨大带宽。采用 DWDM 的系统在达到以上目标的同时仍然可以维持和现有传输系统同等程度的系统性能、可靠性和稳固性——甚至过之而无不及。今后的 DWDM 终端更可以承载总计 80 个波长之多的 OC - 48 以达到 200 Gbps 的传输速率或者高达 40 波长的 OC - 192 以达到 400 Gbps 的传输速率，这个带宽已经足以在一秒钟之内传输 9 万卷的大百科全书！



- Merges *optical* traffic onto one common fiber
- Allows high flexibility in expanding bandwidth
- Reduces costly mux/demux function, reuses *existing* optical signals.
- Individual channels use original OAM&P

**DWDM = Dense WDM**

图 3. 增加的网络容量—WDM

实现这种高速、大容量传输能力的关键技术就是光放大器。光放大器运行在特定光谱频带之上并根据现有的光纤进行了优化，这样就可以使得光放大器有可能放大光波信号，从而在无须将其转换为电信号的情况下扩大其传输范围。超宽频带光纤放大器在实践中运用证明承载 100 个通道（或者波长）的光波信号可以有效地被放大。使用这种放大器的网络可以非常轻松地处理太比特级的信息。以这个速率传输，这种网络甚至可能一次传输全世界所有的电视频道节目或者同时传送 50 万部电影。

以公路做比喻，一根光纤也可以看作一条多车道公路。通常意义上的 TDM 系统使用该公路的一个车道，通过在这唯一车道上加快汽车的驾驶速率来增加带宽。在光缆网络中，DWDM 的采用好比为把后面的汽车放到了公路上没有使用的车道上（增加了铺设光纤的波长数目）得以获得难以置信的巨大带宽。另外还有一个好处：这条公路并不关心跑在自己上面的车流都是些什么类型。结果呢，跑在 DWDM 这条公路上的“车子”们可以装载 ATM 信元、SONET 和 IP 包。

#### 4. 容量扩充潜能

采用 DWDM, 服务供应商可以建立一种“随心所欲增长带宽”的网络, 可以让他们增加当前和未来新一代 TDM 系统以实现事实上无休止的网络扩张 (参看图 4)。DWDM 还可以让服务供应商灵活地扩充其网络中的任意部分, 这是任何其他技术所不能提供的绝对优势。运营商还可以藉此解决因为高带宽需求而产生网络拥塞地区的带宽问题。在两节点之间存在多环交叉而产生光纤冗余的地区, 该技术大有用武之地。

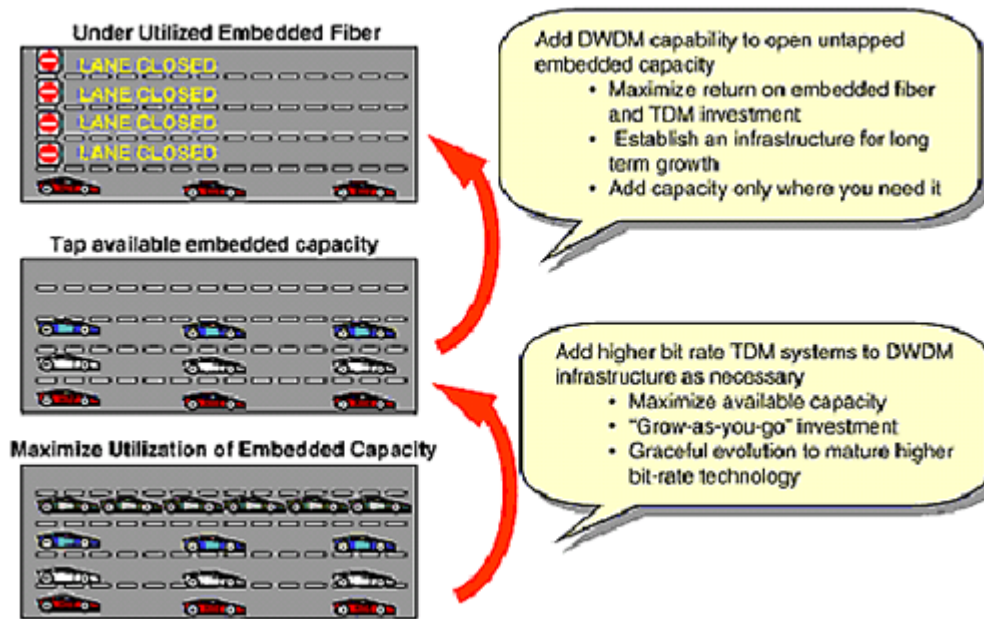


图 4. 容量扩充的发展: 长期策略

服务供应商总是在不断地搜寻新兴的、富有创造性的通信方式为自己创造利润, 同时他们还希望这些方式可以完全满足其顾客五花八门的需求。而 DWDM 网络就可以很好地满足以上的要求。比如, 服务供应商可以针对不同的用户分割和维护不同的专有波长, 向带宽使用率比较高的商务用户出租单独的波长而不是一整根光纤。

和使用中继器的网络应用相比, DWDM 网络还增加了网络单元之间的相邻距离, 这对寻求有效降低初始网络投资的长途通信服务供应商来说是个非常好的优点。DWDM 系统的光纤放大器可以让服务供应商通过接收和直接放大光信号而无须将其转换为电信号得以节约投资。此外, DWDM 还允许服务供应商在  $1.55 \mu\text{m}$  光谱区的广大波长范围内运行 DWDM。比如, DWDM 系统可以在一根光纤上复用最高 16 个波长, 运营商可以在每个再生器放置地点按 16 的因数来降低放大器的数量。在长途网络中采用更少的再生器会产生更少的信号干扰并且提高信号的传输效率。

#### 5. DWDM 增量性增长

DWDM 网络设计目标是: 为急于解决用户日益增长的带宽需求问题的服务供应商提供

漂亮的网络拓展方案。由于 DWDM 网络可以实现必要的容量扩张能力，所以，铺设该技术下的基础网络可以视为解决以上问题的最佳解决方案。对 DWDM 采用增量增长步骤，服务供应商就有可能在部署长期运营的网络同时减低其初始成本。

某些业界分析人士热切地称赞 DWDM 是满足更多带宽需求的网络的最佳之选。可是，这些专家也注意到要实现其目标也是有条件的：DWDM 系统必须具有可伸缩性。尽管每光纤接口 8 或 16 个通道的 OC - 48 系统现在看来有点超前了，但是这些措施对未来两年内保持其高效运转的网络而言是必要的。

由于 OC - 48 终端技术和相关的运营支持系统 (OSS) 和目前的 DWDM 系统完全匹配，服务供应商就有可能首先扩展已经连接到他们网络的 TDM 系统的容量。成熟的 OC - 192 系统就可以在以后增加以建立容量扩大到 40 Gbps 或更高的 DWDM 系统。

## 6. 光层作为承载层

光网除了能提供巨大的带宽容量以外，光层还是运营商把自己现有的多种通信技术融合为统一物理网络的唯一方式。DWDM 系统在同一根光纤上具备速率可调、传输数据格式无关等特性，同时还可以接受任何接口速率的组合形式（例如，同步、异步、OC - 3、- 12、- 48 或者 - 192）。如果某家运营商同时运营 ATM 和 SONET 网络，那么 ATM 信号就不必复用到 DWDM 网络承载的 SONET 速率。由于光层无需额外的复用即可承载信号，运营商籍此可以很快地在网络中引入 ATM 或者 IP 数据而无需重复部署网络。光网互联还有一个重要的优点：在光网这条公路上，任何类型的货车都可以在上面跑。

但是，DWDM 也不过是全光网络互联和实现光层承载之路的第一步。全光网概念意味着服务供应商可以在网络的不同节点上对数据流量实现光接入。这很象是承载 SONET 流量的 SONET 层。光波长增加/减少 (OWAD) 技术就实现了这一功能，它可以增加或者减少光纤中的波长数而无须 SONET 终端的存在。但最终，光层将由此实现带宽管理的灵活性和交叉连接能力。和 OWAD 和 DWDM 相比，光交叉连接 (OXC) 可以让服务供应商创建灵活、大容量、高效的光网，同时还具备完整的光带宽管理能力。这些技术已经成为今天的现实：DWDM 从 1995 年起就已经运用于长途网络，OWAD 在 1998 年产品化，第一部 OXC 则在 1997 年面世。

## 7. DWDM 系统关键特性

可接受的理想 DWDM 系统应该具备某些共有的关键特性。任何 DWDM 系统都应该具备这些特性以便运营商意识到该技术的巨大潜能。以下的问题有助于确定某个具体的 DWDM 系统是否符合要求。

系统重用现有的设备和光缆设施吗？

2.5 Gbps 级别的 DWDM 系统应能完全利用现有的设备和光缆设施。

系统既稳固可靠吗？

经过良好工程设计和建设的 DWDM 系统提供自身的可靠性、系统可用性和系统冗余。虽然滤波器经常受到潮湿环境的影响，但现在这已不成为问题。

激光泵有连接器吗？或者，它们直接接合在光放大器内吗？

光放大器具有两个关键部件：掺铒光滤波器和放大器。当激光泵用特定波长的激光激活铒元素时，铒就会起到增益媒质的作用把引入的激光信号放大。如果使用连接器而不是直接接合，表面轻微的污垢就可能会破坏连接器。

在增加或者减少通道的时候需要人工干预吗？

当我们增加或者减少光通道数量以达到最优的系统性能时，光放大器会进行自动调节。这一点非常重要，因为，如果高能系统内只有一个通道，那么自相位调制现象会导致系统性能的降低。另一方面，功率太低则会导致放大器无法获得足够的增益。

系统使用氟化物或者硅基光纤放大器吗？

在 1530- 到 1565- 纳米光谱内，备有滤波器的硅基光放大器和氟化物光放大器性能表现都不错。不过，氟化物光放大器要实现起来成本较大。氟化物光纤的长期可靠性尚未经过检验。

系统的波长数量和传输速率可升级吗？

尽管对各种 DWDM 系统来说这个答案都是肯定的，但对此进行升级计划也至关重要。如果服务供应商采用某种特定的方式把他们的网络组装成一个整体再进行升级，那么可能会发生以下情况：网络需要更大的功率或者附加的信噪比增量。比方说，每次供应商把通道数量或者比特率加倍的时候就需要额外附加 3 分贝的信噪比增量。

系统提供遵守标准的维护接口吗？

DWDM 系统下可以广泛使用 STL 1 接口。接口应当适应服务供应商通常的维护方案。

## 8. 小结

光网互联提供了支持现有的和刚出现技术的骨干，同时具备了几乎无限的带宽容量。通过光交叉连接而得以实现的全光网（不只是点对点传输）、光可编程增加/减少复用器和光交换机提供了满足现有和未来通信需求的统一网络架构。透明高效地移动数以万亿比特计的信息和经济的投资可以让服务供应商把现有网络的利用率最大化，同时使他们获得了满足未来带宽需求的能力。

**稀疏波分复用 CWDM**

DWDM（密集波分复用）无疑是当今光纤应用领域的首选技术，但其昂贵的价格令不少手头不够宽裕的运营商颇为踌躇。有没有可能以较低的成本享用波分复用技术呢？面对这一需求，CWDM（稀疏波分复用）应运而生。

稀疏波分复用，顾名思义，是密集波分复用的近亲，它们的区别主要有二点：一、CWDM 载波通道间距较宽，因此，同一根光纤上只能复用 5 到 6 个左右波长的光波，“稀疏”与“密集”所谓的差别就由此而来；二、CWDM 调制激光采用非冷却激光，而 DWDM 采用的是冷却激光。冷却激光采用温度调谐，非冷却激光采用电子调谐。由于在一个很宽的波长区段内温度分布很不均匀，因此温度调谐实现起来难度很大，成本也很高。CWDM 避开了这一难点，因而大幅降低了成本，整个 CWDM 系统成本只有 DWDM 的 30%。

CWDM 用很低的成本提供了很高的接入带宽，适用于点对点、以太网、SONET 环等各种流行的网络结构，特别适合短距离、高带宽、接入点密集的通信应用场合，如大楼内或大楼之间的网络通信。尤其值得一提的是 CWDM 与 PON（无源光网络）的搭配使用。PON 是一种廉价的、一点对多点的光纤通信方式，通过与 CWDM 相结合，每个单独波长信道都可作为 PON 的虚拟光链路，实现中心节点与多个分布节点的宽带数据传输。

目前，有几家公司正推出与 CWDM 相关的产品。LuxN 公司出品的 WideWav 系列 CWDM 模块支持 8 个 CWDM 信道，或者支持 4 个 CWDM 信道加 16 个 DWDM 信道。时代华纳公司已与 LuxN 公司签署长期采购协议，用包含 WideWave 模块的 WavSystem DWDM 设备在纽约、俄亥俄等地部署千兆以太网。Ocular 公司推出的采用 CWDM 技术的产品有 OSX-6000 和 OSX-1000 两个系列的交换机，其最大特色在于能为高端用户提供专用波长信道服务和 SAN 服务。

但是，CWDM 是成本与性能折衷的产物，不可避免地存在一些性能上的局限。业内专家指出，CWDM 目前尚存在以下 4 点不足：一、CWDM 在单根光纤上支持的复用波长个数较少，导致日后扩容成本较高；二、复用器、复用解调器等设备的成本还应进一步降低，这些设备不能只是 DWDM 相应设备的简单改型；三、CWDM 不适用于城域网，城域网节点间距离较短，运营商用在 CWDM 设备扩容上的钱完全可以用来铺设更多的光缆，得到更好的效果；四、CWDM 还未形成标准。

### 第三章 DWDM(密波分复用)技术

#### 第一讲 DWDM 发展回顾

目前，DWDM 光传输系统研发进展迅速，实验室中的 DWDM 的传输容量已经达到 6.4Tb/s，2000 年商用系统的容量将达到 1.6Tb/s。复用 30~40 波长的 DWDM 系统已经大范围使用，100~160 波长的系统近期也即将商用。实验室中复用波长已超过 1000 波长。

1996 年美国的 Bell Labs 首先进行总容量 1Tb/s 级的 DWDM 传输实验，这在当时是最新记录，然而此记录不到一年就被刷新。在 OFC '97 上 NEC 宣布实现了 2.6Tb/s DWDM 传输实验，号称世界最新记录。但此记录仅保持了两年又被刷新，在 OFC '99 上 NTT 宣布完成了 3Tb/s OTDM+DWDM 的传输实验，Siemens 公司也发表实现了 80×40Gb/s 总容量 3.2Tb/s 的传输实验，打破了 NEC 的记录。同年 Nortel 在 Telecom'99 上宣布了两个世界记录，即单信道 80Gb/s 和总容量 6.4Tb/s 的最高记录。但这两个记录刚刚宣布不久，在 11 月份的新发明展示会上，Lucent 宣布实现了单信道 160Gb/s 和 DWDM 16Tb/s 的传输实验记录，又把 Nortel 运运地抛在了后面。下一个世界记录属于谁，群雄逐鹿，风云再起。

国内 DWDM 市场也一样，几家主要通信设备供应商纷纷进入 DWDM 市场开展竞争，一时间国内市场也被炒得火热。在众多竞争对手中，烽火通信率先推出基于 2.5Gb/s 的 8、16、32 波长 DWDM 产品，从 1998 年开始先后应用于军网和广东、浙江、山东、辽宁等地的干线工程；在 2000 年上海国际信息通信展上又展示了首套国产 10Gb/s SDH 设备，并且此前已完成了 8510Gb/s DWDM 传输试验，16510Gb/s DWDM 系统也正在研制中。能够生产 10Gb/s SDH 设备的厂家为数不多，烽火通信研制的 10Gb/s SDH 设备不仅国内领先，而且在国际上也跻身于少数可提供 10Gb/s SDH 设备厂商之列。作为颇具实力的国产设备厂商，烽火通信目前可为市场提供从 155 Mb/s、622 Mb/s、2.5 Gb/s、10Gb/s 的 SDH 和 20Gb/s、40Gb/s、80Gb/s DWDM 系列设备；下一个目标，是让基于 10Gb/s 的 DWDM 系统、ETDM 40Gb/s 系统、OTDM 40Gb/s 系统象烽火一样燎原。

## 第二讲 DWDM 与光纤技术的发展

目前，DWDM 技术已成为通信网络带宽高速增长的最佳解决方案，今后无论是广域网、城域网还是接入网，都将以 DWDM 为传输平台，基于 DWDM 的光传送网将构成整个通信网的基础物理层，因此，光纤技术的发展与 DWDM 技术的应用与发展密切相关。 编者



### DWDM 对光纤性能的要求

DWDM 是密集的多波长光信道复用技术，光纤的非线性效应是影响 DWDM 传输系统性能的主要因素。光纤的非线性效应主要与光功率密度、信道间隔和光纤的色散等因素密切相关：光功率密度越大、信道间隔越小，光纤的非线性效应就越严重；色散与各种非线性效应之间的关系比较复杂，其中四波混频随色散接近零而显著增加。随着 DWDM 技术的不断发展，光纤中传输的信道数越来越多，信道间距越来越小，传输功率越来越大，从而使光纤的非线性效应对 DWDM 传输系统性能的影响也越来越严重。克服非线性效应的主要方法是改进光纤的性能，如增加光纤的有效传光面积，以减小光功率密度；在工作波段保留一定量的色散，以减小四波混频效应；减小光纤的色散斜率，以扩大 DWDM 系统的工作波长范围，增加波长间隔；同时，还应尽量减小光纤的偏振模色散，以及在减小四波混频效应的基础上尽量减小光纤工作波段上的色散，以适应单信道速率的不断提高。

### 适应 DWDM 的新型光纤的发展

目前广泛应用的 G. 652 光纤虽然有利于克服光纤的非线性效应，但它在 1550nm 区的较大色散，不能满足信道速率高速化的要求；G. 653 光纤在 1550nm 区的零色散虽然能满足信道速率高速化的要求，但在 DWDM 应用中存在严重的四波混频效应。有鉴于此，1994 年，国外公司先后推出了“True Wave”（真波）和“STM-LS”等第一代非零色散位移单模光纤，这种光纤在 G. 653 光纤的基础上，优化了 1550nm 区色散值，使光纤的工作波段具有少量的色散，以有效地克服四波混频。ITU-T 制定了该类光纤的 G. 655 标准。后来，国内外大公司又纷纷推出了大有效面积 G. 655 光纤和色散平坦型 G. 655 光纤，这两种光纤属于第二代非零色散光纤，它比第一代能够更有效地克服非线性效应。最近，第三代的非零色散光纤又已推出，即色散平坦型的大有效面积 G. 655 光纤，是适应 DWDM 应用最先进的光纤。

1997 年，武汉邮电科学研究院在国内率先推出了 G. 655 光纤，目前烽火通信科技已研制出最先进的色散平坦型大有效面积 G. 655 光纤，并相继推出了适应于架空、管道和直埋的 36 芯、48 芯和 66 芯的层绞式 G. 655 光缆产品，大量应用于国内干线网络工程。烽火公司先进的光纤光缆技术配合即将推出的国内最先进的  $N \times 10\text{Gbit/s}$  DWDM 光传输系统和光传送网络产品，将有力地推动我国通信市场的发展，在我国通信网络的建设中发挥重要作用。

## 第三讲 DWDM 技术走势

DWDM 关键技术都已成熟, Gb/s 级系统得到广泛应用, Tb/s 级系统的商用也正在计划中。目前 DWDM 技术体现出如下发展趋势。首先是系统传输容量的持续增长, 可通过提高通道速率、增加复用波长数量、扩宽应用波长范围等方案实现传输容量的扩大。

编者

提高通道速率。

最先实用的 DWDM 系统多基于 2.5Gb/s 的通道速率, 现在基于 10Gb/s 的多波长系统正在实用, 基于 40Gb/s 速率的系统已进入实验阶段, 技术日渐成熟。此外应用 OTDM 技术可将单通道速率提高至 ETDM 方式无法达到的高度, 目前的实验系统已经使通道速率达到了 160Gb/s。

增加复用波长数量。

8、16、32 个波长的 DWDM 系统已经大范围使用, 100 个波长的系统也走向商用。而实验室里的成绩尤为突出, 已完成了 1022 个波长的复用试验。应用波长范围受限时, 要增加复用波长数量, 必须缩窄通道间隔。目前的 DWDM 实验中, 通道间隔已达到 25GHz。

扩宽应用波长范围。

除了充分利用目前使用的“C 波段”的传输能力外, DWDM 系统应用的波长范围正在向“L 波段”发展, 甚至有人将 L 波段的长波长一侧延伸到 1700nm。此外, 对“S 波段”的应用也在计划之中。当 1385nm 波长的 OH<sup>-</sup>吸收峰被削减之后, S 波段与 1310nm 窗口便连接起来。对于比较短距离的传输, 应用波长范围将扩宽至 1100nm~1700nm。

DWDM 技术的另一个发展趋势是光再生中继器的开发。受光信噪比恶化、光信号波形恶化等因素限制, DWDM 信号经过数个光放段传输后必须再生一次, 再生段距离不可能无限制地长。随着通道速率提高、复用波长数量增多, 解波分复用后分别进行再生的电再生方式, 设备庞杂、建设和运行成本高。开发光再生中继器不仅对传输系统十分必要, 对提高光网络的透明性、实现全光传送网络也是不可缺少的。目前已有实验性光再生中继器, 但其性能还不能与电再生中继器相提并论。如何实现对 DWDM 系统中的所有波长一起进行再生处理, 仍在研究开发中。

DWDM 技术已经开始向城域网发展, 日趋价廉的 DWDM 产品及其软件对本地网的建设改造颇具吸引力。各大设备厂商自 1999 年开始研制用于城域网的 DWDM 系统, 并声称已开发出城域 DWDM 产品; 网络运营商也看好 DWDM 设备, Bell Atlantic 和 Bellsouth 这些老牌电信运营商都在考察这项技术并进行试验。据 Lucent 公司预测北美城域 DWDM 市场将从 1998 年的 2 亿美元发展到 2003 年的 10 亿美元, 大约占 DWDM 市场的 23%。世界范围内城域网和局域网所应用的 DWDM 设备市场年增长率约为 60%, 到 2005 年将会达

到 34.2 亿美元，而长途传输用 DWDM 设备将为 30.4 亿美元。

DWDM 虽然已经广泛应用，但基本上处于利用 DWDM 终端与光放大器组成点对点传输线路的状态。随着光节点技术的进步，单纯点间传输的现状正在改变，开始引入 OADM 设备构成光环路，最终还要采用 OXC 构成可选择波长路由的格形光网络。如今，OADM 已逐步投入商用，OXC 也开始提供小规模的产品。