

光通信系列丛书

光纤通信技术原理与应用

金明晔摇张智江摇陆摇斌摇编著

电子工业出版社

北京·月报

北京·月报

内 容 简 介

摇摇密集波分复用(阅宰阅)技术是一种可以利用现有光纤资源彻底解决带宽危机的有效方法。本书以阅宰阅技术的基本原理为出发点,从网络的角度深入浅出地介绍了阅宰阅网络技术、应用和商用情况,同时也对阅宰阅技术未来发展的主要趋势和关键问题进行了简要分析。书中还包含了近年来有关阅宰阅技术研究的最新成果。

本书可供从事光通信研究和工程设计的技术人员阅读,也可供相关专业的高校师生用做教材或参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

阅宰阅技术原理与应用 钱明晔,张智江,陆斌编著—北京:电子工业出版社,阅宰阅

(光通信系列丛书)

阅宰阅

I 阅宰阅 II 钱... ②张... ③陆... 阅宰阅光通信—数字传输系统 IV 阅宰阅阅宰阅

中国版本图书馆 CIP 数据核字(阅宰阅)第 阅宰阅号

责任编辑:张来盛

印 刷:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 阅宰阅信箱 阅宰阅

经阅宰阅销:各地新华书店

开阅宰阅本:阅宰阅开阅宰阅阅宰阅印张 阅宰阅阅宰阅千字

印阅宰阅次:阅宰阅年 阅宰阅月 第 阅宰阅次印刷

印阅宰阅数:源阅宰阅册 阅宰阅定价:阅宰阅元

摇摇凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(阅宰阅)阅宰阅阅宰阅 质量投诉请发邮件至 阅宰阅 阅宰阅 阅宰阅 盗版侵权举报请发邮件至 阅宰阅 阅宰阅 阅宰阅

前 言

随着因特网业务种类的日益丰富,网络覆盖的范围不断扩大,因特网的应用不断深入到社会的各个角落,因特网的用户正以摩尔定律的两到三倍、甚至更高的速度增长,这就对网络的承载能力提出了更加严峻的考验。

在网络发展过程中面临着诸多的问题,其中日益增长的应用和用户与网络有限的带宽资源之间的矛盾便是最重要的矛盾之一。在解决这个矛盾的众多技术和方法中,DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing)技术是一种可以利用现有光纤资源彻底解决带宽危机的有效方法。

DWDM技术在几十年前就已经提出,大规模的研究和商用却是近几年的事情。本书以DWDM技术的基本原理为出发点,从网络的角度深入浅出地介绍了DWDM网络技术、应用和商用情况,同时也对DWDM技术未来发展的主要趋势和关键问题进行了简要分析,力求对DWDM网络技术进行较为全面的介绍。书中包含了近年对DWDM技术研究的最新成果,其中有部分算法、网络协议等是作者近年发表的学术论文的内容。

本书由第0~12章和附录组成。其中第0章简要介绍了全球通信网络的体系结构、存在的问题和危机以及发展的趋势和前景;第1章介绍了DWDM特点和基本原理、DWDM网络概念和分类,并对WDM和DWDM两个概念在技术上的区别进行了说明;第2章介绍了广播和选择性DWDM网络的网络结构、特点和介质访问控制协议(MAC);第3章介绍了波长寻径DWDM网络的结构、路由与波长分配问题、结点波长转换问题、多光纤网络设计问题等;第4章介绍了DWDM网络虚拓扑设计的概念和方法;第5章介绍了波长寻径DWDM网络的试验网情况;第6章介绍了DWDM网络的生存性和保护问题;第7章介绍了DWDM网络的控制和管理问题;第8章介绍了光网络的QoS问题和自动交换光网络的技术概况;第9章介绍了IP over DWDM网络的概念、体系结构和路由算法;第10章对光分组交换网络的概念和关键技术进行了介绍;第11章简要介绍了DWDM的标准发展情况和产品的情况;第12章介绍了DWDM技术的应用情况;附录对阅读本书需要具备的相关数学知识进行了简单介绍。

本书的编写得到了中国工程院院士李乐民教授、电子科技大学通信与信息工程学院院长彭启琮教授的悉心指导,也得到了王晟博士、虞红芳博士、徐世中博士、何荣希博士的大力支持,在此一并表示感谢。

由于DWDM技术还在不断发展,新的技术层出不穷,加之作者水平有限,难免存在错误和疏漏之处,敬请读者指正!

编 著
2003年8月

第0章 绪论

- ◆ 全球通信网络的体系结构
- ◆ 经济发展对通信的驱动
- ◆ 增加承载带宽的方法

0.1 全球通信网络的体系结构

随着全球信息化进程的不断深化，新的需求、新的应用和新的技术层出不穷，现代通信网络也在发生不断的变化，甚至是变革。但是，无论技术实现的细节或目的如何变化，全球通信网络都可以根据其使用的传送技术、传送的长度、不同的应用范围等进行广义的定义，分为长途传输网（long-haul network）、城域网（MAN：metropolitan area network）和接入网（access network）三层的网络结构，见图 0-1。

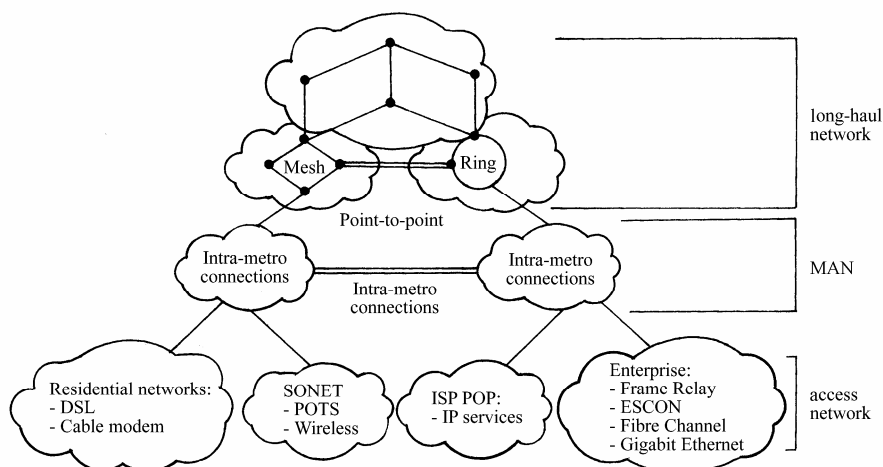


图 0-1 现代通信网络总体结构

1. 长途传输网（long-haul network）

长途传输网络位于整个全球网络的核心，由跨国界的和全球性的承载运营商控制。长途传输网络将城域网连接起来，它的作用或者说应用就是传输/传送（transport），因此它最主要、最基本的性能参数就是“容量（capacity）”。长途传输网络在通常的情况下都采用 SONET（synchronous optical networks）或者 SDH（synchronous digital hierarchy）技术，目前长途传输网络的容量因为高带宽的需求日益增多而变得越来越匮乏。

2. 接入网络 (access network)

接入网络位于全球网络中最接近用户的一端，在城域网 (MAN) 的边缘。接入网往往具有协议多样化、网络结构多样化、速率变化多样化的特点，用户可以是 Internet 住宅用户，也可以是大型企业和机构，接入网的 IP 业务具有天然的突发性、不对称性、不可预测性，这为承载这些业务提出了许多挑战，特别是在许多新的实时业务模式下。与此同时，接入网络也要求能够继续接入许多传统的业务和协议，如 IBM 的 ESCON (enterprise system connection)。

3. 城域网 (MAN)

在长途传输网络和接入网络之间的网络层次就是城域网。城域网具有许多与接入网络一样的特点，如多样的网络协议和信道速率。与接入网络一样的，传统的城域网一般是基于 SONET/SDH 的，采用点对点或环状拓扑结构，以及上下路复用器 (ADM: add and drop multiplexers)。城域网位于网络中的分界点，一方面，它需要满足带宽不断增长的长途传输网的要求，另一方面它也必须解决不断增长的接入结点的连接性要求以及用户定制的数据服务所提出的各种网络需求。

4. 城域网和长途传输网的比较

我们可以将城域网看成规模缩小的长途传输网，只是数据传输的距离更短了，然而这只是表面上的区别。长途传输网的网络拓扑更加稳定，而城域网的网络拓扑则时常发生变化；城域网需要支持更多的服务类型和业务类型，从传统的语音业务、租线 (leased line) 业务到数据存储、分布式应用、视频会议等新型应用。而与之相比较，长途传输网更像一个管道。城域网与长途传输网另一个重要的不同点就是城域网中涵盖了低速率的非同步和同步传输设备，短的环路、小的交叉部分 (cross-sections)，以及具有不同带宽要求的多种多样的用户。这两种网络在根本特性上不同，使得城域网更能够满足不同的业务需求，而长途传输网的协议、速率透明性、可扩展性等都成为与传输容量一样重要的因素。

5. 另一种观点 (an alternative view)

前面描述的网络结构将全球通信网络分割成为不同的部分，实际上，每个层次之间的

界限并不总是那么清晰。长途传输网和城域网有时候也无法清晰地描绘出来；同样，有时候城域网与接入网之间的界限也并不清楚。更有甚者，有些人认为，接入网就是城域网的一部分，而城域网内包括了企业之间的连接（enterprise connectivity）。从这个角度来讲，城域网市场可以划分为以下三个部分：

- 核心——基本上是规模缩小了的长途传输网，之所以作为城域网的核心，是因为它们连接了 POP 点而不与用户终端直接相连。
- 城域接入——是 POP 结点域接入设施之间的部分，可能是用户端接入设备，也可能是业务汇聚结点设备。
- 企业级网络——这是网络中专门服务于企业需求的部分，利用专有的或租用的光纤（或租用的光纤容量），将地理上分离的企业结点连接起来实现新的应用，如 SAN（storage area network）。

0.2 经济发展对通信的驱动

随着人类进入 21 世纪，信息服务已经渗透到社会和商业活动的每个角落。信息，作为一种载体和工具，已经越来越成为一种“日用品”。然而，随着对信息系统全球化的认同和应用的普及，我们建设的网络资源愈发紧张。愈来愈高的要求和网络利用率、通信管制在全世界范围内的逐步放开，以及高可靠性的需求等，都使得我们的光纤资源迅速耗尽，而这些光纤在我们数年前铺设时认为是可以满足未来相当一段时间的需求的。

1. 带宽需求

网络带宽需求的迅速膨胀和爆炸很大程度上都应该归功于数据业务的迅猛增长，特别是 IP 业务的增长。世界上主要的通信运营商都纷纷报告自己主干网的带宽每 6 至 9 个月增长一倍。这也体现在因特网业务每年增长 300%，而传统话音业务每年以 13% 的速度增长，详见图 0-2。

与此同时，网络上传输业务的峰值也在增长，这使得业务独特性本身也变得很复杂。主干网上承载的业务从传统的基于电路的业务（如 TDM 业务和传真业务），发展到基于分

组（如 IP）或信元（如 ATM 和帧中继）的业务。此外，对时延敏感的业务的比例也在不断上升，如 VoIP（voice over IP）业务和视频流业务。

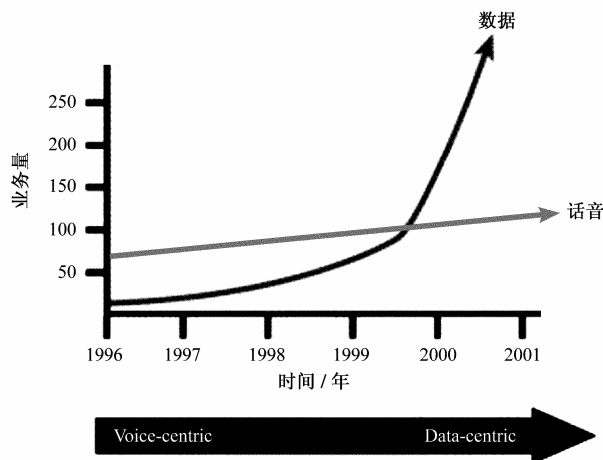


图 0-2 数据业务增长超过话音业务

为了满足带宽爆炸式增长的需求，同时考虑到 IP 将成为未来主流的网络公共基础平台，长途传输的服务提供商也逐渐从传统的、为话音业务而优化但目前证明是非常昂贵的、基于 TDM 的系统中走出来。与此同时，城域网也正面临挑战：更加拥塞；采用的设备和技术逐渐老化；由于用户要求更快、更简单的接入而不得不面对快速和频繁变化的需求。

2. 竞争与可靠性

随着新的数据应用、因特网的利用率以及无线通信等对带宽需求的驱动，两个因素开始扮演重要的角色：竞争与网络的可靠性。电信运营领域，作为电信管制体制下的长期收益的一方，目前也开始变得越来越具有竞争性。电信运营领域的竞争最初是 1984 年引入美国长途传输市场的，1996 年电信改革法案的通过导致了越来越多的运营商加入。这些新兴运营商总是通过努力适应并满足用户额外服务和容量的需求来争取用户。有两个主要因素影响着通信运营界的竞争：

- 新型运营商总是通过完善的服务来赢得竞争。比如，在城域网市场，为住户和中小型商业客户提供宽带、无线和 DSL 的服务，为企业提供高速租线和 VPN 服务，

为企业网络客户提供透明局域网（transparent LAN）服务。

- 新型运营商都构造自己的新的网络构架，这样他们就无须向老运营商租用线路和资源，通过这个策略，他们能够对业务吞吐量和可靠性有更强的控制力。

当电信业和数据服务的商业运作开始变得更加激烈和充满竞争时，服务提供商就要保证他们所运营的网络具有足够的容错性。为了达到这个目标，网络运营商就必须建立备份的路由，常见的方式有在环状网络或点对点网络中采用的 1:1 冗余备份方式。为达到可靠性所需的要求水平，就意味着为克服网络失效预留专用的容量和资源，这给本来就紧张的网络架构增加了一倍的网络容量，见图 0-3。

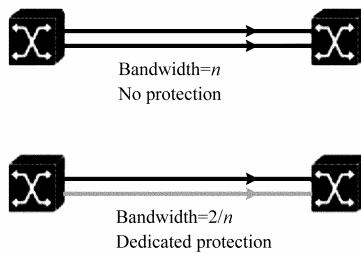


图 0-3 预留带宽减少了为业务提供的网络容量总量

0.3 增加承载带宽的方法

面对控制成本条件下网络容量需求不断增长的挑战，运营商有两个选择：铺设新的光纤和提高现有光纤的利用效率。

铺设新光纤是运营商用以扩展网络的传统办法，但也是耗费巨大的一种方法。每千米光纤需要耗资几万元甚至更多的成本，很多情况下用于办理铺设许可证和光缆施工的费用要远远比购买光缆本身的费用高。因此，铺设新的光纤可能在需要扩展管线等的时候才真正有意义。

提高已有光纤的利用效率的方法有以下两种方式：

- 提高已有系统的比特率（速率）；
- 增加光纤中波长的数量。

1. 提高比特率

采用时分复用 (TDM : time division multiplexing) 的方式可以将光纤的传输容量逐步提高到 2.5 Gb/s (OC-48) 或者 10 Gb/s (OC-192)。最近已经有研究成果表明, 可以将速率进一步提高到 40 Gb/s (OC-768)。采用电的处理方式虽然可以到达这样的速率, 但是其实现方法十分复杂, 同时无论是制造或是运营, 其成本都很高。此外, 有一些技术问题限制了真正方法的使用。比如, 在单模 (SM : single mode) 光纤上传输 OC-192 所受到色散的影响是低一阶速率 OC-48 所受到影响的 6 倍多。高阶速率所需的更大的传输功率也会对波形质量产生非线性的影响。此外, 另一个重要的影响——非极性色散也会限制光脉冲的传播距离。

2. 增加波长的数量

采用这种方法将在一根光纤里组成多个光波长, 采用波分复用 (WDM : wavelength division multiplexing) 技术将在一根光纤里同时复用多路 2.5 ~ 40 Gb/s 的信号。目前常用的有 16 波、32 波的系统, 128 波或 160 波的系统也正在推向商用的过程中。相关的内容将在本书其余部分详细介绍。

3. 时分复用

时分复用 (TDM : time division multiplexing) 技术最初是由于提高传输介质中承载话音业务的数量的。在时分复用技术使用前, 电话网中每路电话都需要一条自己的物理链路, 这种方法既昂贵又不具有扩展性。采用时分复用技术可以在一条链路上承载多路电话。

TDM 技术可以用高速公路上的交通来比喻。来自四条支道的车流要去往某个城市, 所有的车辆将回到一条主道上。一条支道上每隔 4 秒就会有车辆开上高速公路的主道, 那么高速公路的主道上将会有汽车以每秒 1 辆的速度开上来。只要所有汽车的速度是同步的, 就不会有交通拥塞。在终点, 这些车辆将以同样的同步机制离开高速公路去往不同的目的地。

这就是 TDM 的原理, 它通过将时间划分成小的时间间隔, 这样从不同源头来的数据比特将承载在同一条链路上, 以此来提高传输链路的容量, 见图 0-4。

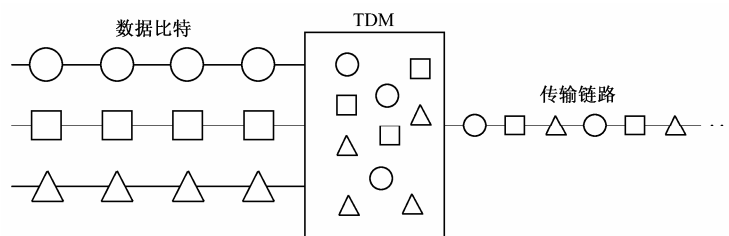


图 0-4 TDM 的原理

采用 TDM，信息的输入源可以以轮询的方式工作，这种方式虽然可以保证公平性，效率却不高。这是因为，即使没有数据需要传输，事先预留的时隙将空闲。这个问题通过统计复用的方式可以解决，如 ATM（异步转移模式，asynchronous transfer mode）。虽然 ATM 的带宽利用率更高，但是由于承载数据分组的 ATM 信元需要在电的层面进行拆分重组（SAR：segmentation and reassembly），因而限制了速率的进一步提高。

4. SONET 与 TDM

目前电信运营商普遍采用同步光网络（SONET：synchronous optical network）或同步数字序列（SDH：synchronous digital hierarchy）标准来进行 TDM 数据的光传输。SONET 主要用于北美，SDH 主要用在除北美以外的其他地方。这两种标准非常接近，它们都为光纤上传输 TDM 业务定义了接口参数、速率、帧格式、复用方式和管理模式等。

对于 n 比特的数据流，SONET/SDH 首先对其进行复用，并对其进行光调制，以 n 倍于输入速率的比特率将数据通过光发射器发送出去。例如，四路数据流均以 2.5 Gb/s 的速率到达 SONET 复用器，那么流出的数据流的速率为 4×2.5 Gb/s 或 10 Gb/s。图 0-5 对 SONET 的原理进行了说明。

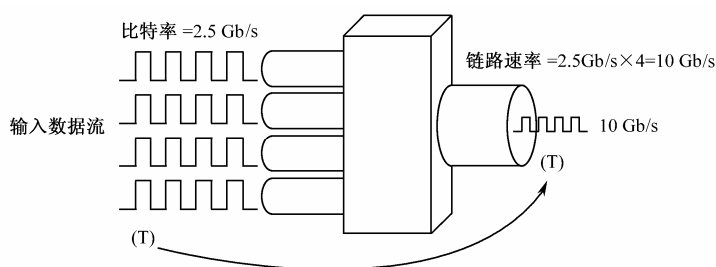


图 0-5 SONET 原理

1 路电话的速率为 64 kb/s。将 24 路（北美）或 32 路（北美以外）电话进行时分复用（TDM），其信号速率为 1.544 Mb/s 或 2.048 Mb/s，在 T1 或 E1 的线路上进行传输。电话复用的序列等级如表 0-1 所示。这是 SONET/SDH 将数据复用为 STS-1（51.85 Mb/s）至 STS-192/STM64（10 Gb/s）标准等级的基础。表 0-2 对常用的 SONET/SDHs 数据序列等级进行了对比说明。

表 0-1 电话复用的序列等级

电信复用等级	比特率	话音时隙
DS0	64 kb/s	1 DS0
DS1	1.544 Mb/s	24 DS0s
DS2	6.312 Mb/s	96 DS0s
DS3	44.736 Mb/s	28 DS1s

表 0-2 SONET/SDH 的数据序列等级

SONET/SDH 复用等级	SONET/SDH 信号	比特率	容量
OC-1	STS-1	51.84 Mb/s	28 DS1s 或 1 DS3
OC-3	STS-3/STM-1	155.52 Mb/s	84 DS1s 或 3 DS3s
OC-12	STS-12/STM-4	622.08 Mb/s	336 DS1s 或 12 DS3s
OC-48	STS-48/STM-16	2 488.32 Mb/s	1344 DS1s 或 48 DS3s
OC-192	STS-192/STM-64	9 953.28 Mb/s	5379 DS1s 或 192 DS3s

图 0-6 描述了低序列等级的数据是如何复用为高序列等级的数据的。采用称为虚支路（virtual tributaries）的方式将低速率信道映射到 STS-1 的净荷中，28 路 DS1 可以映射到 1 路 STS-1 的净荷中，或者利用 M13 复用器复用为 DS3 再映射到 STS-1 中。ATM 或第 3 层业务可以采用 POS（packet over SONET/SDH）的方式通过与 SONET 接口相连的交换机将数据适配为 SONET/SDH 信号。

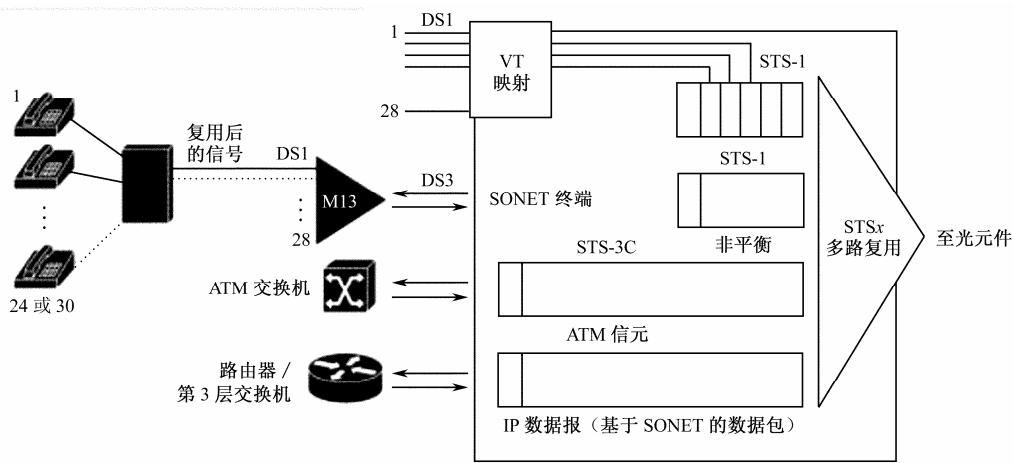


图 0-6 TDM 和 SONET/SDH 复用示意图

SONET/SDH 也存在缺点。与所有 TDM 技术一样，优先级或拥塞在 SONET/SDH 中是不存在的，同时复用的序列等级是非常严格的，如果需要更高的速率或传输容量，就只能到下一个序列等级。因此，可能会导致一部分带宽被浪费掉了。比如，10 Gb/s (STS-192) 的下一个等级就是 40 Gb/s (STS-768)。此外，由于这些序列等级是根据话音业务来优化的，因此对于使用 SONET/SDH 帧来承载数据业务效率不高，见表 0-3。由于 DWDM 能够透明传输任何协议、任何格式的数据，因此它没有带宽浪费的问题。

表 0-3 SONET/SDH 承载以太网 (Ethernet) 数据的带宽浪费比较

Ethernet	SONET/SDH	比特率 / (Mb/s)	浪费的带宽比例
10BASE-T (10 Mb/s)	STS-1	51.854	80.709%
100BASE-T (100 Mb/s)	STS-3/STM-1	155.52	35.699%
1000BASE-T (1000 Mb/s)	STS-48/STM-16	2488.32	59.812%

总之，由于需要大带宽支持的应用和因特网业务的爆炸式增长已经超过传统 TDM 的极限，使号称带宽无限的光纤资源几近耗尽。设备昂贵、复杂且扩展性不好的 SONET/SDH 架构已经不能满足日益增长和变化的应用的需求，出现的问题越来越多。

本书将重点对解决现代通信网带宽危机的 DWDM 技术进行详细的阐述。

第 1 章 WDM 和 DWDM 技术概论

- ◆ 网络发展中的带宽危机
- ◆ 解决带宽危机的可能方案
- ◆ 什么是 WDM
- ◆ DWDM 网络概述

1.1 网络发展中的带宽危机

如前所述，随着因特网（Internet）以越来越高的速度向世界各地扩展，越来越多的用户接入、使用因特网，越来越多的因特网应用开始出现，全球的因特网呈现全方位爆炸增长趋势，网络服务提供者和用户都对其提出更多的要求：用户要求一个更高速和更全面的因特网服务；网络服务提供者则要求网络运行得更有效和更经济。但是，现在的网络实际上还远远没有达到这些要求：用户还不能得到足够的网络速度和带宽，而网络服务提供者则在提高网络基础设施以满足日益增长的用户要求和保持网络运行的开销和效率之间寻求平衡。

网络带宽的危机是最严重的问题之一，不仅仅在因特网上，在传统电话网和传真网络上也存在这个问题，不过与传统电信业务 10% ~ 17% 的年增长速度相比较，因特网的业务在 1990 到 1997 年间以指数速度增长。

在众多的传输媒介（如同轴电缆、双绞线、光纤、射频、卫星和微波等）中，光纤是唯一拥有足够带宽以满足快速增长的主干网容量需求的传输媒介。最常被安装的是光纤 OC-48，其传输速率为 2.488 Gb/s，10 Gb/s 的 OC-192 光纤也越来越多地被使用。对用户而言，2.5 Gb/s 或 10 Gb/s 已经是相当高的带宽了，但是 2.5 Gb/s 只能支持约 1 600 个 1.544 Mb/s DSL 用户的连接。对小的局域网而言这可能足够了，但是对于主干网而言则只是很小的一部分，而且用户也不是按照固定速率接入的。图 1-1 是网络带宽需求增长的示意图（资料来源于 Avici Systems）。

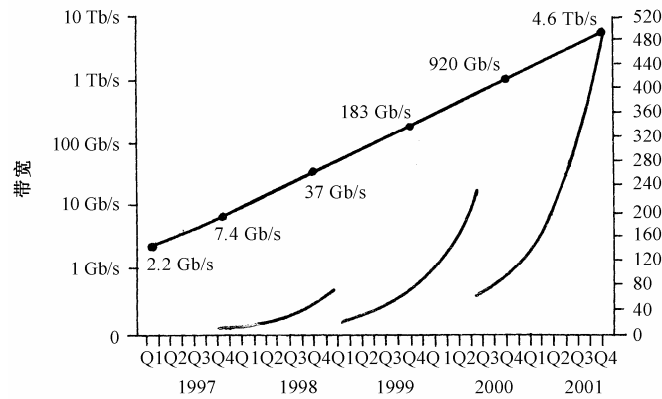


图 1-1 网络带宽需求增长的示意图

1.2 解决带宽危机的可能方案

有三种主要的方法可以解决越来越严重的带宽危机。

1. 空分复用 (SDM : space division multiplexing) 技术

解决带宽危机最简单的方法就是铺设更多的光纤，我们将其称为 SDM (space division multiplexing) 的方法。对于超过 1 000 km 的长距离传输的网络，铺设更多的光纤并不是一个合理的方法，即使对于城域网或局域网，铺设光纤的工程量也是相当大的。

2. 时分复用 (TDM : time division multiplexing) 技术

TDM (time division multiplexing) 技术通过不断提高数据传输的速率来提高系统的传输容量，如 SONET。这种方法有其局限性，根据传输媒介的不同，受传输距离和散射等传输效应的影响，数据传输速率不可能无限制地提高。一个带宽更高的 TDM 系统拥有更短的脉冲宽度，即更高的频率，这使得它更容易受光纤散射传播的影响。随着未来带宽要求的不断增长，TDM 系统的散射是一个很难克服的问题。

3. 波分复用 (WDM : wavelength division multiplexing) 技术

WDM 技术通过不断增加新的波长来增加 WDM 系统的带宽,每个波长都是一个独立的数据传输通道,每根光纤可以成倍地提高带宽容量。WDM 系统在 1550 nm 处的理论带宽在 5 000 GHz 以下。此外,WDM 技术可以在时分复用(TDM)的网络中使用,如 SONET 中的光再生器可以被 WDM 系统的光放大器(optical amplifiers)代替。与光再生器不同的是,WDM 系统的光放大器不用解复用信号就可以放大复用的信号,这降低了数据传输的间断性瓶颈。此外,光放大器放置的距离也可以比光再生器更远。但是在可恢复性性能上,SONET(TDM)在路径中断时 50 ms 处的可恢复性是最好的,现在的 DWDM 在可恢复性上还达不到这样的性能。

1.3 什么是 WDM

WDM 是一种可以在单根光纤上利用不同的光波长传输多路数据信号的技术。入端的光信号被分配到指定频带内的特定频率上去。通过在一根光纤上复用这些信号,使得光纤的容量成倍增加。图 1-2 是 WDM/DWDM 原理示意图。

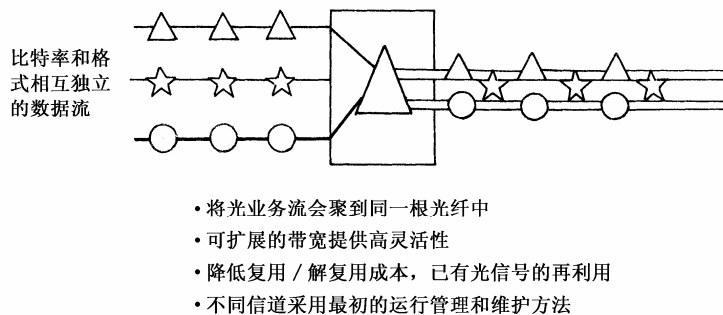


图 1-2 WDM/DWDM 原理示意图 (<http://www.webproforum.com/dwdm/topic03.html>)

如果我们将一根光纤看成一条高速公路,要传输的数据看成行驶的车辆,那么传统的 TDM 系统只是使用了高速公路的一条车道,通过加快车辆行驶的速度来提高高速公路的