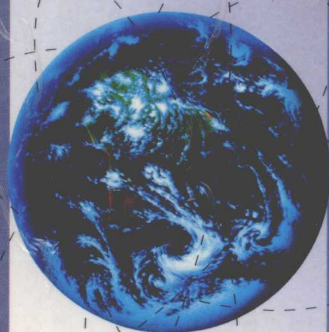


# 新编电信小百科

TELECOM

主编：王 静



北京邮电大学出版社

新 编

# 电信小百科

主 编 王 静

副主编 果明实

(第二卷)

北京邮电大学出版社

·北京·

# 第一章 光纤通信技术

## 第一节 光纤通信网络概述

### 一、光纤通信网络技术发展过程

#### (一) 光纤通信史回顾

光纤是现代化通信网中传输信息的媒质。光纤通信作为一项新兴的通信技术，从一开始就显示出无比的优越性，引起人们的极大兴趣和关注。在短短的二十几年中，获得了迅速的发展，光纤通信之所以能够成功，主要得益于超纯石英玻璃纤维和半导体激光器的研制成功。早在 1966 年英籍华人高锟，当时还是一个在英国 Harlow ITT 实验室工作的年轻工程师，大胆地提出，人们应该能够发送高速信息光脉冲到一根纤细的玻璃中的概念，并且做了一系列实验，证明这是可以实现的。接着，1970 年美国康宁公司生产出了低损耗 ( $20\text{dB/s}$ ) 的光纤，GaAlAs 半导体激光器也在同年实现了室温下连续工作，从而揭开了光纤通信的序幕。

在高锟早期的实验中，光纤的损耗约为  $3.000\text{dB/km}$ ，而光源也是性能并不优良的发光二极管。今天，小于  $0.5\text{dB/km}$  的光纤已被广泛安装使用，而调制速率超过每秒千兆比特的近红外半导体激光器也已商品化。图 3-1-1-1 表示光纤通信中继距离和比特率乘积的进展情况。

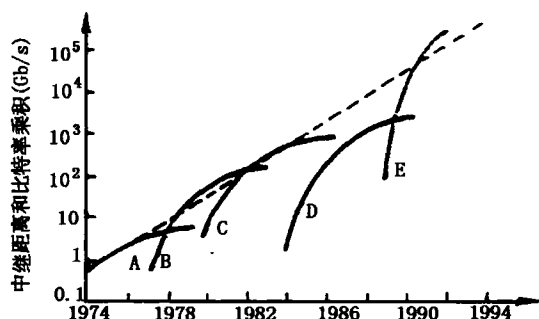


图 3-1-1-1 光纤通信中继距离和比特率乘积的进展情况

- (A)  $0.85\mu\text{m}$  波长的多模光纤 (B)  $1.3\mu\text{m}$  波长的单模光纤 (C)  $1.5\mu\text{m}$  波长的单模光纤  
(D) 相干检测取代直接检测 (E) 使用铒掺杂光纤放大器

现已安装使用的光纤通信系统，光纤长度有的很短，只有几米长（计算机内部或机房内），有的又很长，如连接洲与洲之间的海底光缆。60年代中期以来，光纤通信的发展速度之快令人震惊，可以说没有任何一种通信方式可与之相比拟，光纤通信已变成所有通信系统的最佳技术选择。

目前，世界上许多国家的新建通信系统均采用光纤，同时光纤通信从低速系统向高速系统发展。5Gb/s 系统也正在横跨太平洋的海底光缆系统（TPC-5/6）中安装。WDM 系统也将在环非洲的海底光缆系统上使用。现在世界上广泛讨论的信息高速公路实际上就是一种高速、大容量、宽带城域网和宽域网。世界光纤市场和元件市场 1992 年增长超过 20%。1995 年欧洲光发财元件市场增长了 28%，世界光纤通信市场总收入到 1999 年将增加一倍。光纤通信产品市场价格将急剧下降。有人预测，到 2000 年单模光纤将从现在的每米 0.3 美元下降到每米 0.1 美元，光纤活动连接器将从 75 美元降至 10 美元，激光器将从 750 美元降至 100 美元。光纤通信产业方兴未艾，其旺盛的生命力令人振奋。

通信和计算机技术的发展，出乎许多人的预料。电子传输设备速度的高速增加只有光纤线路的容量才能满足。硅数字器件速度充其量可达到 1~2Gb/s，而镓砷器件的速度是硅器件的二倍到五倍。10Gb/s 的高速集成电路已经开发出来，200Gb/s 的晶体管和 40Gb/s 的集成电路也已进行了演示。另外，每根光纤在近红外波段具有 0.85 $\mu\text{m}$ 、1.3 $\mu\text{m}$  和 1.55 $\mu\text{m}$  三个传输窗口，每个传输窗口约有 25,000GHz 容量。该数字相当于当今美国一年中电话使用高峰期数量的总和，约相当于整个无线电通信频谱数的 1000 倍。

过去，通信线路是交换、终端和计算机间的技术瓶颈，但是，自从光缆使用后，这个问题就不复存在了。下面几章我们就试图阐述这个问题。

## （二）电缆网络的缺点

只能用于局域网（LAN）中的电缆网络与光纤网络相比具有许多致命的缺点，现列举如下：

### 1. 电气危害

802 标准指出，LAN 干线电缆系统在使用中至少可能遇到四种直接的电气危害：

- （1）LAN 部件和交流电源或照明电路的直接接触；
- （2）LAN 电缆和部件上累积的静电荷；
- （3）耦合到电缆系统上的高能瞬变；
- （4）各种 LAN 部件接地点之间的电位差。

这些危害可能导致 LAN 部件甚至联网计算机的损坏，必须在安装使用时十分注意。这些危害都是由电缆的导电性引起的。在我国，已有不少 LAN 遭到雷击导致计算机和 LAN 部件损坏的情况。

### 2. 电磁干扰

802 标准指出可能影响 LAN 正常工作的几种干扰源：高频电磁场、静电放电和接地点间的瞬变电压等，并明确规定了 LAN 的电磁环境条件。如果不能满足这些条件，就难以保证 LAN 的正常运行。这些干扰问题是由于电缆的电磁兼容性或屏蔽能力差所引起的。

### 3. 传输损耗大

表 3-1-1-1 给出了局域网用电缆和光纤的每公里传输损耗。由表可见，电缆的损耗明显高于光纤，有的甚至大几个数量级。因此，电缆只能用于网径不大的 LAN，网径较

大的 LAN 以及 MAN 只能使用光纤。

#### 4. 频带窄

从表 3-1-1-1 还可看到, 电缆基本上只适用于数据速率较低的 LAN, 高速局域网 ( $\geq 100\text{Mb/s}$ ) 和城域网 (MAN) 必须采用光纤。

表 3-1-1-1 局域网用电缆和光纤的损耗和频带比较

| 类型                                                    | 频带 (或频率)                                                | 损耗 (dB/km)             |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------|
| 对称电缆                                                  | 4kHz 时                                                  | 2.06                   |
| 细同轴电缆 ( $\varnothing 1.2/4.4$ )                       | 1MHz 时    30MHz 时                                       | 5.24    28.70          |
| 粗同轴电缆 ( $\varnothing 2.4/9.4$ )                       | 1MHz 时    60MHz 时                                       | 2.42    18.77          |
| 0.85 $\mu\text{m}$ 波长多模光纤<br>1.3 $\mu\text{m}$ 波长多模光纤 | 200 ~ 1000MHz·km<br>$\geq 1000\text{MHz}\cdot\text{km}$ | $\leq 3$<br>$\leq 1.0$ |
| 1.3 $\mu\text{m}$ 波长单模光纤<br>1.55 $\mu\text{m}$ 波长单模光纤 | > 100GHz<br>10 ~ 100GHz                                 | 0.36<br>0.2            |

#### 5. 保密性差

在现代社会中, 不但国家的政治、军事和经济情报需要保密, 企业的经济和技术情报也已成为竞争对手的窃取目标。因此, 对 LAN 的保密性能如何是用户往往必须考虑的一个问题。对 LAN 中信息的窃取通常有三个途径:

- (1) 直接接入式窃听;
- (2) 窃听计算机和终端设备辐射的电磁场;
- (3) 窃听电缆系统辐射的电磁场。

对于第一种窃听可以采取保密口令、信息加密等技术; 对于第二种窃听可以采取加强电磁屏蔽措施 (包括设备和房间的屏蔽), 但是, 电缆系统的完全屏蔽通常是很困难的。现代侦听技术已能做到在离同轴电缆几公里以外的地方窃听电缆中传输的信号, 可是对光缆却困难得多。因此, 要求保密性高的局域网不能使用电缆。

#### 6. 电缆的体积和重量较大

由于电缆体积和重量较大, 安装时还必须慎重处理接地和屏蔽问题。在空间狭小的场合, 如舰船和飞机中, 这个弱点更突出。

由于通信用光纤都用石英玻璃和塑料制成, 是极好的电绝缘体, 而且光信号在光缆中传输时不产生泄漏, 所以不存在电气危害、电磁干扰、接地、屏蔽和保密性差等问题。再加上传输特性好的优点, 使光纤成为迄今为止最好的信息传输媒质。因此, 自 80 年代初以来, 光纤局域网取得了飞速的发展, 用光纤局域网逐步取代电缆网是必然的发展趋向。

当前, 光纤 LAN 的价格比使用双绞线和同轴电缆的 LAN 的价格高, 但与粗同轴电缆 LAN 的价格相当。用光纤 LAN 作为主干网连接若干个细同轴电缆 LAN 的方案将两类 LAN 的优点结合起来, 在大多数场合下其性能价格比很有竞争力。随着光纤技术的迅速发展,

光纤 LAN 所占 LAN 市场的比率正在迅猛增长，而 MAN 市场则将由光纤独占。

### (三) 三种基本的光纤通信系统

我们可以把光纤通信系统划分为三类，如图 3-1-1-2 所示。这些系统用来连接一些节点，这些节点通常可能是交换机、终端、计算机、工作站和电话机等。在图 3-1-1-2 中，从左到右分别表示点对点系统、一点对多点系统以及网络的拓扑结构。在点对点系统中，可能是单向的，也可能是双向的，一端的发射机发送信息到另一端的接收机。在一点对多点（设有  $N$  个工作站）的系统中，其中站 1 可发送信息到所有其他  $N-1$  个站，并可能收到他们的回答，但其他站之间不能相互通信。该系统的一个特殊情况是广播网络，即一个站可发送信息到所有其他  $N-1$  个站。

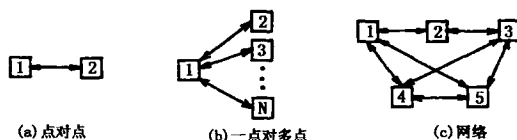


图 3-1-1-2 光纤通信系统结构分类

点对点系统和一点对多点系统仅仅是网络的特例。在网络中，每个站可以与其它任一节点进行通信，而绝不仅仅是一个站只能与另外  $N-1$  个站通信。有时候我们要指出它们之间的区别，有时候我们通称以上三种情形均为系统或者网络。

现在的情况是已经敷设好的长距离干线正在转变成一点对多点系统或网络。前者的应用多半是光纤到家或者是到办公室，而网络的进一步应用将变成局域网或城域网。

图 3-1-1-1 足以说明二十多年来光纤通信已取得了显著的成就。过去，光纤通信的主要任务是建立点对点局间干线以满足日益增长的电信业务的需要。今天，世界上发达国家，电话已相当普及，随着信息量的不断增加，人们已要求增大传输的速度和容量。比如，目前我国的干线大多数使用 140Mb/s，一对光纤只能供 1920 部电话同时以 64Kb/s 的速率通话；然而，同一对光纤若以 2.5Gb/s 的传输速率工作，则可以供 30240 部电话同时通话。

目前光纤系统研究和开发的重要问题很多。它们是光纤通信系统可以支持多少个不同波长（频率）的数字信道；光放大器有多宽的带宽可以使用；调谐接收机或者调谐发射机可以调谐多快；用全光器件怎样连接全光网络；通信协议可以工作多快；通信资源对用户如何更有效和透明；以及一些其它有关一点对多点系统和网络节点的连接问题。降低费用的问题也变得越来越重要。还有，现在最重要的工作是用光缆取代现有的同轴电缆或敷设新的光缆线路。

### (四) 三代通信网络介绍

图 3-1-1-3 表示通信网络物理层所经历过的三个阶段。(a) 图表示第一代网络的结构，四个节点用铜线互连在一起。铜线是一种窄带线路，它的容量有限。两个节点间的逻辑连接如点划线所示。(b) 图表示用一段一段光纤取代铜线后构成的网络，这是第二代网络。(c) 图表示所有节点被不间断的光纤连接的第三代网络。设计网络时，关于线路的选择要考虑三点：它的带宽、误码率和延迟。图 3-1-1-3 (b) 图和 (c) 图表示的线路要比 (a) 图粗些，但长度相等，这就是说第二、第三代网络和带宽和误码率要比第一代的已有改进，但是传输延迟没有改变。

光纤三个传输窗口 (0.85 $\mu\text{m}$ 、1.3 $\mu\text{m}$  和 1.55 $\mu\text{m}$  波长) 中的每一个均具有 25.000GHz 带宽, 它比电话线路高出几个数量级。其系统误码率也可以改进几个数量级。15 年前传输声音允许的标准误码率是  $10^{-5}$ , 而今天机房内使用光纤线路的计算机误码率甚至可以到  $10^{-15}$ 。误码率减小的原因是显然的, 因为铜线很容易受到噪声的干扰, 而在光纤线路中我们可以控制光发射机和接收机的噪声电平, 并使光发射机发出的光足够强, 使系统信噪比足够高。

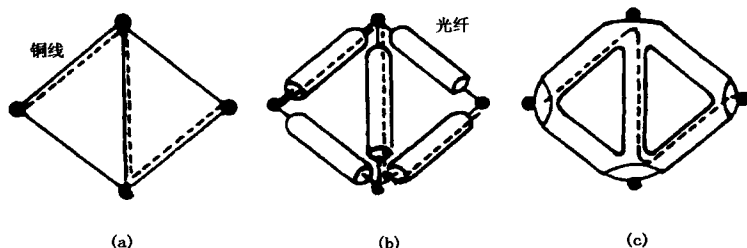


图 3-1-1-3 三代通信网络结构

(a) 第一代 (b) 第二代 (c) 第三代

光纤的另一个优点是直径小, 我们可以制成多芯光缆, 在一些情况下光纤的密度可高达  $10^6/\text{cm}^2$ 。利用多芯光缆可以构成一些特殊应用的网络。

实际上, 第三代网络最重要的优点并不在于这些可以测量到的参数, 如带宽、误码率、损耗或者捆扎密度, 而是它的开放性。所谓开放性就是容易使用、改变以及它的资源共享性, 这种特性今天愈来愈受到重视, 特别是在计算机网络中。许多第三代网络本质上具有协议透明性, 即许多互不相同的数字速率和制式可以同时兼容。第三代网络结构上非常灵活, 因此可以随时增加一些新节点, 包括增加一些无源分路/合路器和短光纤, 而不必安装另外的切换节点或者长光缆。这种特性在空分交换网络中是需要的。或许这就是为什么像以太网或者信令环这样的局域网从来不会受到用户交换机竞争的影响。

传统上, 以服务范围的大小把网络分为三类:

- (1) 局域网 (LAN), 服务范围 2 公里, 如以太网、信令环和信令总线;
- (2) 城域网 (MAN), 服务范围 100 公里, 如电话本地交换网或者有线电视 (CATV) 分配系统;
- (3) 宽域网 (WAN), 服务范围可达数千公里, 如开放系统互连国际网络等。

第一代网络的比特率可以是用于电话服务的旧商用网络的每秒几千比特, 也可以是用于同轴电缆局域网的每秒几兆比特。特别有意思的是第一代系统可以是一个用于交换的高性能平行接口 (HIPPI), 或者只有 25 米长、1Gb/s 的点对点的线路。

第二代光纤传输网络具有较大的带宽和较少的误码, 现已普遍推广应用, 如图 3-1-1-3 (b) 图所示。工作速率为 100Mb/s 的光纤分布数据接口 (FDDI) 局域网, 以及 IEEE 802.6 分布排队双总线 (DQDB) 的城域网等就是这种网络的典型代表。FDDI 是一种改进的信令环网, DQDB 是一种总线网。这些网络都是用光缆取代同轴电缆, 传输速率均有提高, 误码率均有下降, 而通信协议也有一些改变, 但其它功能与同轴电缆网络相同。

事实上, 宽带光缆和窄带电缆是两种截然不同的传输介质, 由光缆构成的不同种类的网络其性能远比电缆网好。

第三代网络与第二代网络的显著不同之处在于它具有最少量的电/光和光/电转换。最重要的是没有一个节点为其他节点传输和处理信息服务。在前两代网络中,不管是信令环, FDDI 还是以太网, 比特流一旦进入节点, 不仅总是以电子的方式处理节点的输入和输出比特, 而且密切注视管理着数据缓冲器和进行一些信息协议管理, 这些信息有可能来自想要使用网络的任一站, 也有可能来自所有其他各个站。这样的节点称为转发站。在物理介质共享的网络中, 如以太网和信令环, 每个站必须处理来自其他各站的比特流。在要求高比特率、小延迟和绝对完整性的应用中, 插入一个高比特率工作的中间节点, 不仅变得不能接收, 而且技术上也是不可能的。这就是今天正在广泛讨论的所谓电子瓶颈, 即硅和砷器件的运行速度和带宽远远不能满足第三代光纤网络的要求。

传输带宽大、误码率少及传输延迟小的第三代网络已被称为全光网络。在这种网络中只有在接收机和发射机里进行了光/电或电/光转换。一个节点只包含本节点的电子信息, 而与其他节点的信息无关, 同时并不受硅和砷器件的速度限制, 使用适当速度的电子器件就可以构成一个极大传输容量的网络, 而不必使用大量的逻辑组合和并行技术。

### (五) 全光网络——第三代网络介绍

全光网络是用一些中间不含有光/电转换器的光纤, 连接不同节点的网络。它能充分利用光纤的带宽和低差错率的特性。图 3-1-1-4 表示三种基本的全光纤网络, 即星形网、总线网和树形网。星形耦合器是一种能将所有输入端口的输入信号合并在一起, 并传输到每个输出端口的器件。跨接在总线上的每个站使用两个 T 型耦合器, 分别用于光发射机和接收机与总线的连接。从图 3-1-1-4 可见, 网络中的任一接收机均可以接收网络中的任一发射机发送的信息, 也就是说任意一个光发射机的光功率都分配给所有站的光接收机。原则上讲这是没有必要的, 因为并不是所有的用户都需要接收它, 或许只有一个用户才需要与它建立联系。然而, 设计制造一个不浪费光能量的器件是相当困难的, 通常分配损耗是不可避免的。

从图 3-1-1-4 可见, 每个节点只有一个光发射机和一个光接收机。但是为了充分利用光纤的带宽, 我们可能想同时从给定的任意节点接收和发射信号。现有的一些技术是可以使它实现的, 这就是波分多址 (WDMA)、时分多址 (TDMA) 以及码分多址 (CDMA) 技术。人们可以使用不同的访问技术, 在节点间进行动态的连接, 构成一个多路访问网络。WDMA 是使用不同的光波长, TDMA 是使用不同的时槽, 而 CDMA 是借助于不同的信号波形来实现动态多路访问, 如图 3-1-1-5 所示。所谓动态是指该连接是快速改变的。本书我们对波分多路访问 (WDMA) 和频分多路访问 (FDMA) 不加区别, 统称为 WDMA。这是因为光是一种电磁波, 其频率和波长是一一对应的, 所以 WDMA 和 FDMA 实际上是一回事, 并无明显的区别。只是 FDMA 的信道间隔比 WDMA 的窄得多而已。到目前为止, 在大多数第三代光网络中, 每个信道使用互不相同的波长, 或者几个信道使用同一个波长, 这几个信道使用互不相同的微波副载波对该波长进行调制。

在 WDMA 中, 信道波长的改变是使用可调谐的半导体激光器; 在接收端信道的选择是使用可调谐的接收机。

我们使用光纤线路、耦合器和分路器把多个光发射机和接收机连接在一起, 从而构成一个网络, 如图 3-1-1-4 所示。光发射机通常使用半导体激光二极管, 因为它能提供脉宽非常窄的高输出光功率, 并易于被信息流所调制。有几种调制方式可用来数字调制激

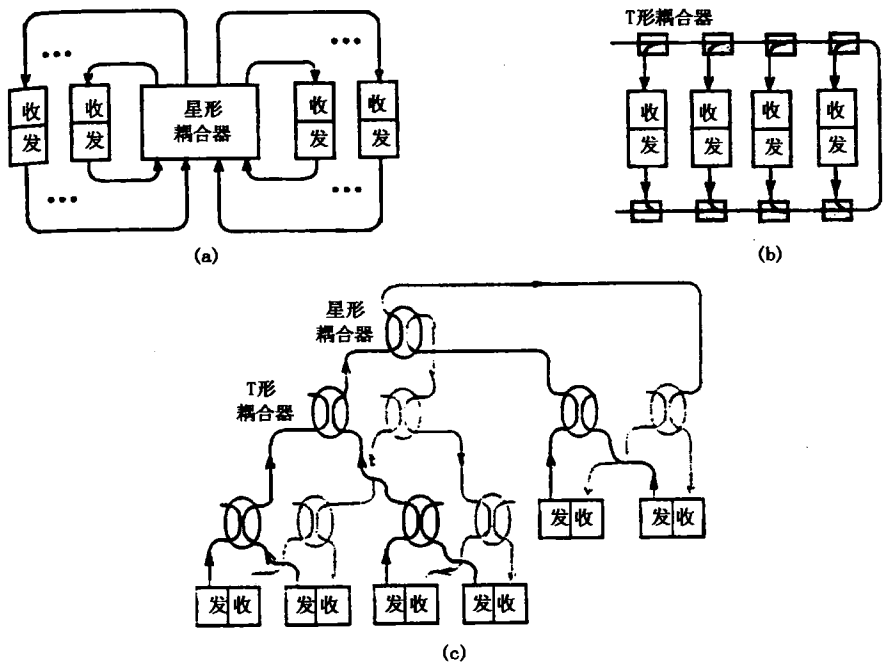


图 3-1-1-4 全光网络的三种基本拓扑结构

(a) 星形 (b) 总线 (c) 树形

光器，它们是开关键控 (OOK)、幅移键控 (ASK)、频移键控 (FSK) 及相移键控 (PSK)。接收机可以是

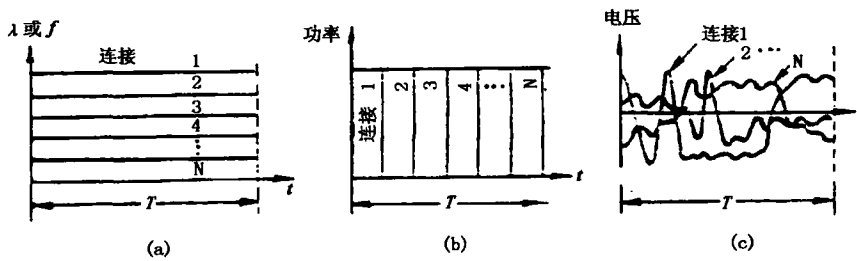


图 3-1-1-5 三种基本的多路复用方式

(a) 波分多址 (WDM) (b) 时分多址 (TDMA) (c) 码分多址 (CDMA)

与入射光的频率和相位有关的相干检测，也可以是只与接收到光功率电平有关的直接检测。与相干检测不同，直接检测本质上是无波长选择性，接收到的光信号必须首先通过窄带光滤波器，滤掉不需要的信号，选出所要接收的数字流。微光栅、光纤光栅滤波器和 F-P 光调谐滤波器和可调谐的激光器已商品化，然而至今外差接收机仍不能在市场上购得，所以许多早期实用的光纤网络是使用直接检测光接收机。

就像我们已经提到的那样，由于局域网 (LAN) 和城域网 (MAN) 距离短，路径损耗远小于分配损耗，所以光纤网络的一个关键问题是，网络中分配光能量的耦合器和分路器引起的分配损耗。例如，一个  $N \times N$  星形耦合器分配入射光功率到与输入口数量相等的所有  $N$  个输出口，若是点很多而比特率又很高，接收到的每比特光能量可能不足以提供系

统所需要的比特误码率。所以这是一个相当严重的问题。可喜的是适用于第三代光纤网络的光放大器已研制成功，特别是掺铒光纤放大器已达到实用化。如第七章所述，这种光放大器在相当宽的频率范围内对入射光可进行无畸变的低噪声放大。光放大器的发明，其重要意义可以和电子三极管放大器的发明相比，电子三极管放大器的发明使电子通信变为现实；而光放大器的发明则使全光通信的梦想得以实现。人们再也不必在光信号的传输路径中插入一个个光-电-光中继器了。由于光放大器的使用，人们就可以在一定的限度内随心所欲的扩大传输距离，也就使服务范围宽广的宽域网得以实现。

本节讨论的网络主要是指最容易实现的局域网和城域网。把本地的子网，即第三代的局域网和城域网连接在一起，怎样建立一个第三代的宽域网这是一个非常新的研究课题，我们将粗略地对此进行讨论。

### (六) 光纤网络容量

我们用图 3-1-1-6 表示无源星形耦合器光纤网络总容量和比特率的关系。由图可见，用第三代网络取代第二代网络后，我们就有希望极大地扩大网络的容量。网络“容量”是网络的总传输量，即任一时间所有连接到网络各用户的总比特率。本图着重表示组成网络的各种技术对总容量的限制。

若  $1.5\mu\text{m}$  处光纤总带宽为  $200\text{nm}$  ( $25.000\text{GHz}$ )，我们使用时分或波分复用技术使信道以每比特每秒约  $2.5\text{Hz}$  的间隔复用，则同时以  $1\text{Gb/s}$  速率传输的节点数为  $10^4$ 。有趣的是我们从激光器输出的功率出发也同样可以得出这个结论。假定每个节点的激光器发射  $1\text{mW}$  的光功率（对  $1.5\mu\text{m}$  的光来说，每秒钟发射  $75 \times 10^{15}$  个光子），对于较好的光电探测器每个接收机要求  $750$  个光子/比特，比特率为  $10^9$ ，每个节点以  $1\text{Gb/s}$  速率传输信息，显然，如果功率在超过  $10^4$  个节点中分配的话，就没有足够的光子供给它们。

我们可以根据以上的结论：即传输速率为  $1\text{Gb/s}$  时，实际限制的节点数为  $10^4$  来选择比特率和相应的节点数，如图 3-1-1-6 右上方斜线所表示的那样。由图可见，如果每个节点的工作速率提高的话，则允许的节点数就要减少。图中也表示出在给定比特率下其它因素对节点数的限制。商用的掺铒光纤放大器具有约  $35\text{nm}$  的带宽，这要比光纤  $200\text{nm}$  的带宽小，图中右上方的第二条斜线就表示它的限制结果。图中右上方第三条斜线表示  $9\text{nm}$  调制范围的商用三段调谐激光器所限制的结果。这种激光器的优点并不在于它的调谐范围，而是它的  $\text{ns}$  级调谐速度。

另一方面，光纤法布里-珀罗 (F-P) 调谐滤波器，虽然调谐范围基本上不受任何限制，但是  $\text{ms}$  级的调谐时间却是相当慢的。该滤波器的信道选择性是用精细度  $F$  来衡量的。 $F$  表示所能分辨的最小频率差，它由光纤谐振腔端面反射膜的反射率  $R$  和光纤端面的平行度所决定。基于这种机理，使用该滤波器作为信道选择的光纤网络其信道数通常是由相邻信道的串话所限制，而并不是由总的可用带宽所决定。因此该器件对网络容量的限制如图中的平行线所表示。这种引起串话的限制当信道数超过约精细度  $F$  的  $2/3$  后就发生了。

图 3-1-1-6 也表示出最先进的属于第二代网络的 FDDI 环网总站数与节点比特率的关系。

由图可见，未来光纤网络的容量比现有的网络容量要大得多。其它一些优点，如协议的透明性、高可靠性（因为网络是无源的）和潜在的低成本（因结构简单）将在以后讨

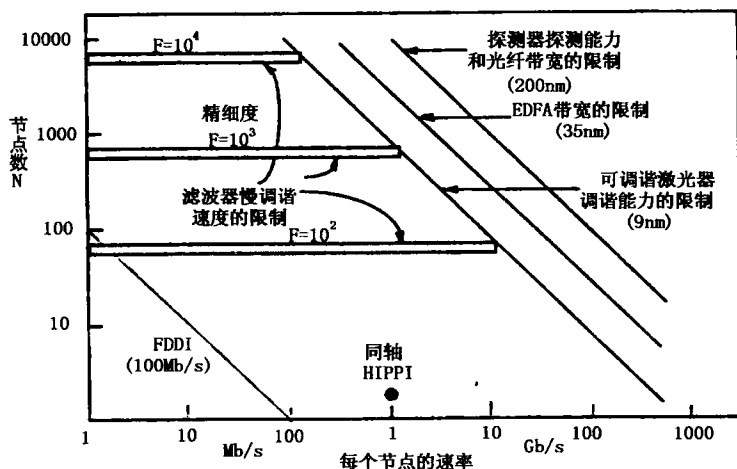


图 3-1-1-6 光纤通信网络总容量受到的限制

FDDI—属于第二代光纤网络的光纤分配数据接口

HIPPI—同轴电缆并行千兆比特接口

论。但是，这里要特别指出的是：第三代网络能够充分利用光纤介质的极大带宽来扩大传输容量，建立未来广泛应用的网络。

## 二、网络性能参数及千兆比特网络的应用

### （一）网络性能参数

现在我们介绍网络的性能参数，它们与对网络的要求有关。在网络的不同应用中，对性能参数有不同的要求，比如一般来说网络的可扩展性是比比特率更为重要的参数，然而在某些情况下也并非如此。尽管这样，我们仍然列出网络的一些性能参数并讨论它们的重要性。

#### 1. 网络可扩展性

理想情况下，网络应该连接任一地方的任一用户，这就是网络的可扩展性。

每天世界上都在敷设大量的光缆，以美国为例，每天要新敷设 1280 公里光纤（多股光纤光缆以单根光纤计算）。1990 年底以前已敷设了八百万公里光纤，其中 50% 是没有接任何终端的，所谓的“黑光纤”。三百多万公里的光纤用于城市间干线的连接，五百多万公里的光纤用于本地交换。后者被放置在地下铁道管道里，高压动力线上的中孔导管里以及没有使用的油气管道里。

光纤的另一个主要用户是电缆电视工业。普遍认为光纤到路边更具有经济吸引力。光缆正在从卫星地面站开始敷设到设在共用电杆上的一个光缆节点，然后从这里开始用同轴电缆再连接到千家万户。

不管是电话公司的光纤到路边，还是 CATV 的光纤到光纤节点，总之几年内单模光纤总是要连接到大中城市的大多数家庭和办公室里。光纤也要很快地被安装到新建的摩天大厦、工业区以及大学校园内。许多现有的同轴电缆将要被光缆所取代。

基于这种快速增长的趋势，第三代光纤网络的许多基础设施正在建立起来。按照现有

的标准,城市范围内和城市间的通信设施拥有者,不管是电话公司还是有线电视公司正在使用 25.000GHz 中的几 GHz 提供高质量的数字通信服务,其目的并不在于充分利用光纤介质的带宽而是想从中获得最大的利润,因为高速大容量光传输设备的使用,使通信系统每话路公里成本大大地降低。就像第一章我们已提到的那样,随着全光网络技术变得更经济,更能满足多种需求,以及大家对已敷设的“暗光纤”都感兴趣时,我们可以有把握的预见,那时人们就会逐渐承认现在对“暗光纤”的投资是有远见的。

由上可知,存在着一个网络可扩展性的要求。而且随着光纤技术的发展,对这种要求就更加迫切。除生产光缆、安装光缆这些基础设施外,人们还应该利用现有的技术如蜂窝电话等,把这些像汽车、船艇等不能用电线或光缆连接在一起的用户,组成一个射频和红外自由空间传输网络。因此,很明显正在出现一个两级通信世界,即用光缆连接的固定点世界,以及用无线电话和红外电话连接的固定点之外的任意点世界。

## 2. 可到达性

网络可到达性是指任一用户可与世界上其他地区的任一用户进行通信。当今世界上的电话系统就是可到达性的最好例子。

与此类似,第三代网络也必须找到一种把独立的局域网或者城域网全部连接在一起的途径同时第三代网络也必须提供一种像电话号码簿那样的适合于第三代网络的人名地址录给任一想要与其他用户通信的用户。

另一方面,可到达性是指多少用户可同时与同一个用户通信。如以前指出的那样,分组交换的优点不在于提供给用户可共享带宽容量的时间段,实现用户突发信息量传递的线路经济性它的真正价值在于使用时间段允许一个用户同时与其他许多用户进行通信,因为这许多用户的信息都由一个数据流携带。这种每个物理端口支持许多逻辑端口的能力正是大多数计算机应用所要求的。今天,即使一部台式计算机,也要求它具有多种功能,完成多项任务,通信网络也不能例外,它也必须具有实时通信要求的同时提供多个虚通道的能力。

## 3. 比特率

第一章我们已提到单根光纤具有约 25,000GHz 的带宽容量,这是非常之大的,一个第三代的局域网或城域网可足够支持比特率为 1Gb/s 的许多节点,如图 3-1-1-6 所示。这种情况第一代或者第二代网络是不可能实现的。然而,若构成一个像公用网或者用户网这样的宽域网(WAN),如此之大的带宽容量却仍然是不够的。为此有必要把一个系统划分成相对独立的支网,以便每个支网仍可重新使用这同一个带宽。

于是比特率要求就与可到达性要求紧密地联系在一起了。每个用户的比特率越高,一个网络可支持的用户数就越少。

## 4. 实时性

所谓实时性就是要求传输的延迟要小。许多应用要求延迟不能太大。尽管信息流在光纤中以光的速度传输,但仍然是有延迟的,对此我们无能为力。我们可以做的只能是使路径协议交接过程最快,接入存储时间(约毫秒数量级)最短,而使通信码的执行速度最快,以及这种码的软件流程长度也最短。

## 5. 误码率

一些应用对允许的最大误码率限制很严格,而另一些应用则对此并不很在意。幸运的

是, 光纤通信系统有可能达到非常小的误码率, 而无须特别的编码。与此相反, 双绞电话线路或者同轴电缆若没有附加编码, 各种电磁干扰就有可能使误码率增大。光纤网络误码率通常是由线路本身或人为造成的, 如脉冲形状畸变, 存储器溢出引起的错判决等。换句话说, 误码率是在网络使用过程中产生的, 而不是由自然环境随机引起的。

#### 6. 有效利用率

有效利用率是指网络的可利用率和不间断工作的能力。这种能力对某些应用, 如医疗手术应用是绝对必要的。近来越来越多的单位进行连续不断的数据处理和记录, 对此也有严格的要求。幸运的是全光网络具有可有效利用的固有特性, 因为整个网络是无源的, 不需供电的, 如图 3-1-1-4 所示。

#### 7. 保密性

遗憾的是图 3-1-1-4 表示的全光网络不能满足保密性和隐私性的要求。即使是广播式工作的总线结构也产生严重的失密。因此, 未来的全光网络与第一代和第二代网络相比, 在较高协议层进行加密是必要的, 因为即使是网孔状连接的全光网络, 一个节点也能自由接收网络中所有信息量的一小部份。

### (二) 对三种基本通信系统要求的差异

随着通信量的不断增加, 通信系统已从点对点通信发展到网络通信, 很显然三种基本通信系统的重要差别就在于应用范围的不断扩大。

#### 1. 点对点通信

点对点通信的典型范例是海底光缆通信, 或者城市间的干线通信。对这种系统的基本要求是以最大的无中继距离、最小的误码率传输最大可能的数据率。这种点对点通信系统, 不管是传声音、数据或者电视信号, 还是传任何其他种类的信号, 在信息量爆炸的今天都已显得无能为力。

正如第一章指出的那样, 回顾光纤通信发展史, 其突出的一点就是比特速率和中继距离的不断增加。

#### 2. 一点对多点通信

一点对多点通信的主要应用是多媒体分布系统。它的起初应用不是商业使用, 而是分配娱乐节目到各个家庭。然而也有一些例外, 如传送股市行情信息等, 但与家庭电视、音乐和多媒体娱乐和教育节目相比是相当有限的。

一点对多点通信对比特率的要求是适中的, 例如美国全国电视系统委员会 (NTSC) 规定非压缩数字电视 100Mb/s, 压缩数字电视 1.5Mb/s, 非压缩高清晰度电视 (HDTV) 是 1.2Gb/s, 压缩 HDTV 至少要 150Mb/s。非压缩袖珍高质量立体声唱盘要求 4.32Mb/s。

一点对多点通信要求可扩展性要好, 但对延时和快速交换的要求除分组交换外并不高。

#### 3. 网络

今天普遍认为作为真正的千兆比特网络的应用是指每个用户要求 1Gb/s。表 3-1-1-2 列出四种最普遍的应用及其对网络性能参数的要求。

表 3-1-1-2 千兆比特应用对网络的要求

|        | 比特率<br>(Gb/s) | 可扩展性和<br>延迟性 | 对分组交换<br>的要求 | 对延迟的要求 | 误码率        |
|--------|---------------|--------------|--------------|--------|------------|
| 超级计算机  | $> 1$         | 低            | 不要求          | 小      | $10^{-9}$  |
| 医疗图像   | $< 1$         | 低            | 不要求          | 不要求    | $10^{-15}$ |
| 多媒体会议  | 1             | 高            | 要求           | 不要求    | $10^{-9}$  |
| CPU 互连 | 1             | 低            | 要求           | 小      | $10^{-15}$ |

### (三) 千兆比特网络的出现及其应用

普遍认为最成功的网络并不是那些分配最大带宽给较少用户的网络，而是那些使用方法简单、具有广大用户的网络。我们可以举两个例子来说明。早期的以太网是一种窄带网，只有 10Mb/s，供跨接其上的所有用户以多路访问的方式使用，虽然有严格的性能限制，但是它进网容易、成本低、访问灵活、服务范围广，因此使它获得历史性的成功。相反，以宽带服务的电视电话仅局限于图像传送，应用却非常狭窄。

从本节以后各章可以看到，目前第三代光纤网络技术仍然处于发展阶段，其费用一时还降不下来。然而，到处敷设的光缆仍有许多带宽未被利用，第三代网络技术的简单性肯定将会使成本得到极大的降低。于是连接简单、易于使用的全光网络，随着时间的推移肯定会得到广泛的应用。因此，可以预见全光网络首先将满足千兆比特应用的要求，然后随着成本的降低向用户群体的广度发展。

#### 1. 超级计算机应用

超级计算机广泛地被化学家、物理学家、气象学家以及其他科学家所应用，因为它有许多特点。

首先，计算机模拟已相当精确。通常用计算机做实验比建立一个实际的实验系统又容易又经济。于是计算机就变成一个实验室。

其次，在实验室做实验由于测量仪器和实验过程中总是动态变化的，所以常常包含实验者和实验对象之间的相互影响。

最后，如果超级计算机以动态彩色图像取代数字输出的话，那么它理解数据的意义，并从中得到新的启发，使创造性思维的能力得到了极大的增强。

综合以上三种情况，超级计算机就要求非常小的延迟和千兆比特的工作速率（如传送彩色图像，每秒 24 帧，每帧  $2000 \times 2000$  个 12 比特，总共就超过 1Gb/s）。它对误码率的要求并不高，系统只要求每个超级计算机同时支持几十个用户。今天 4 字节并行点对点同轴电缆连接的 1Gb/s 高速并行接口（HIPPI）就用于这种通信。

#### 2. 医疗照片的查找和传送

在医疗照片的查找和传送过程中，主要碰到的问题是数据库的规模，访问速度以及与遥控终端连接的问题。任何规模的医院都有可能需要查找 X 射线和其他形式的照片，有时候还要求以非常快的速度查找。在病人生命垂危的情况下，召集几位内科专家同时观看一套快速送来的一幅幅彩色或黑白照片，以便于在几分钟内做出决定是会经常碰到的。显然现在用电话征求一个远在外地的专家的意见是不能满足要求的。

今天, 传送图片广泛采用的技术是将图像直接变成数字信号, 然后存储起来用网络在必要时传送出去。传输医疗照片的速度并不像超级计算机要求那么高, 因为每秒没有那么多帧。然而, 超级计算机的图像压缩技术在这种应用中是不允许的, 因医疗专业要求不能对数字图像作任何改变, 也不允许丢失照片中的最小细节。

### 3. 多媒体会议

多媒体电话会议系统的研究和模型机设计已进行多年。早期生动活泼的可视会议电话曾是交互式通信的梦想。通过多媒体会议, 相距遥远的双方可以很容易实现沟通。但进展是缓慢的, 惟一的成功似乎是电话会议, 尽管仍有不足之处。

可视会议电话系统由于各种因素可能千差万别。这些因素可能是有互不相同要求的特别布置的会议室, 也可能是具有多重任务多个窗口的个人计算机。但真正影响多媒体会议的因素是通信带宽和误码率。假设甲地会议室的一组人与乙地会议室的另一组人开会, 以下的信息量是需要传送的:

- ◆为每个人配置的摄像机和遥控监视器产生的图像信号 (每人 100Mb/s);
- ◆由袖珍盒式录音机产生的与图像信号同步的高质量四声道立体声 (5Mb/s);
- ◆会议用图片资料, 如每人每分钟传送一幅 24 比特彩色图片 (1Mb/s);
- ◆以浏览的速度显示一页页文字材料 (1Mb/s)。

以上各项传输速率相加就可以达到每个会议 (以 8~10 个人计算) 1Gb/s, 显然这就是今天长距离通信的一般数字流。或许我们可以说当多媒体会议系统最终成功地实现时, 不仅需要千兆比特通信的基础设施, 而且也需要人们更好地认识它和管理使用它, 这也就是本书的目的之一。

### 4. CPU 互连

任意规模的大多数公司总有一个机房, 里边安装着一个或者多个主机, 几十个直接访问存储设备 (DASD) 以及打印机。对于缺少办公室空间的公司来说这可能是一个较好的安排。有时候公司把小型机器分散到各个办公室以利于雇员的方便使用。传统上使用有限长度 (如几十米) 的并行电缆把机器以及机器与外围设备连接起来。

全光网络允许从异地数据库中随时调出和调入数据。这在传输距离有限的同轴电缆系统中是不可能实现的, 所以数据在这种系统中总是存储在直接访问存储设备中, 通常就是大容量的磁盘驱动器, 但是这些数据一旦在机房遭到灾难性的损坏后就被丢失。惟一的办法是把这些有保存价值的数据在一天工作完之后转存到一个安全的地方, 一旦需要时再从这个地方快速调出来, 就好象在同一个机房一样。很显然它的实现只能靠工作速率为每秒千兆比特的全光网络了。

## 三、光纤通信网络分类

光纤通信网络的分类没有统一的标准, 但是通常可以从网络的主要性能、网络的技术特征以及技术体制三方面来进行分类。

### (一) 按主要性能分类

#### 1. 从网的最大覆盖范围 (或网径) 分类

依据网径的大小可分为宽域网 (WAN, Wide Area Network)、城域网 (MAN, Metropoli-

tan Area Network) 和局域网 (LAN, Local Area Network)。现简要介绍如下:

### (1) 宽域网 (WAN)

WAN 指的是在信道集中点、电话交换局、交换中心或者上/下话路之间的长距离传输, 传输距离在一个国家内部, 通常可达几千公里, 可包括通信卫星以及长距离微波和光纤干线。图 3-1-1-7 表示宽域网及其与 MAN 和 LAN 的互连。

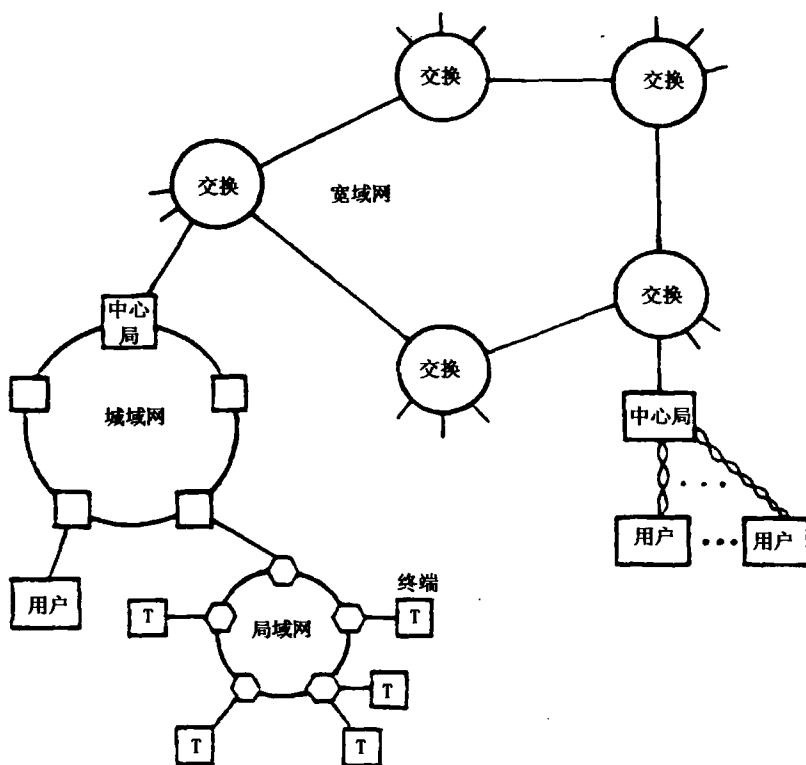


图 3-1-1-7 宽域网及其与 MAN 和 LAN 的互连

### (2) 城域网 (MAN)

MAN 是在信息量集中的区域内, 例如在一个城市内, 两个建筑物内, 两个 LAN 之间传输信息的网络, 或者用于宽域网 (WAN) 的本地分配网络。传输距离最远可达 100km。这种网络通常被认为是夹在 WAN 和 LAN 之间的网络, 可认为是到 WAN 的网关。它可包括电话本地网络、商业网络、CATV 用户和社区网络, 以及在有限的区域内连接建筑物的专用商业网络。

### (3) 局域网 (LAN)

LAN 是一种小范围内多用户传输网络, 它可能仅仅是在一个办公室、一个建筑物内、或者在一个建筑群内的网络, 其传输距离最多也只有 10km。它包括连接主机、存储设备、数据终端以及其他外围设备的专用计算机网络, 例如可包括以太网、IBM 信令环及光纤分布数据接口 (FDDI)。

## 2. 从通信业务种类分类

可粗略分为计算机网（或数据网）和综合业务数字网两大类。

### （1）计算机网络

计算机网络是为相互交换信息而互连在一起，但又独立的计算机的集合。使用计算机网络时，用户必须指定在哪台机器上登陆；远程操作时必须指定把任务交给哪台机器；传输信息时，必须指明从哪里到哪里。一般来说，必须由使用者来处理网络管理的问题。

### （2）综合业务数字网（ISDN）

由数字电话发展演变而成的通信网能够实现用户终端数字信号进网，并且能提供端对端的数字连接，从而可以用同一个网络来承载各种话音和非话音业务，如数据、传真、可视图文、电子信箱、可视电话及会议电视等，这就是综合业务数字网（ISDN, Integrated Services Digital Network）。ISDN 可分为窄带和宽带两类。窄带的含义是提供信息业务的数据率均不超过 2.048Mb/s。

### 3. 按网的数据速率（或频带）分类

一般分为低速、中速和高速（超高速）网络。低速通常指数据速率低于或等于 10Mb/s，中速指 10~50Mb/s，高速指大于 50Mb/s。数据速率高于 1Gb/s 的有时称作超高速网络。对于综合业务数字网来说，数据速率的高低当然是和宽带和窄带直接相关的。中、低速网只能提供窄带业务。按 CCITT 关于 SDH（SONET）公用网的标准，宽带综合业务光纤数据网的数据率至少应该是 155.52Mb/s。

### （二）按技术特征分类

一般是按网的拓扑结构和媒质接入控制（MAC）子层的特征分类。

#### 1. 按网的拓扑结构分类

光纤通信网络的基本拓扑结构通常有总线形、环形、星形、树形以及它们的组合。

#### 2. 按媒质接入控制（MAC）子层的特征分类

这一层的分类是最复杂的，它包括了不同的复接方式和交换方式。基本的复接方式有：时分、波分（频分）、空分和码分四类，如图 3-1-1-5 所示。还可以采用混合复接方式，如波分/时分，波分/空分，及波分/副载波网络等。当前，光纤通信网中采用最多的是时分复接方式，但是波分复接方式以及波分与时分、波分与微波副载波相结合的复接方式已受到人们的普遍重视，特别是在超高速网中。而空分和码分采用较少。

基本的交换方式有：电路交换、分组交换以及集两者之长处的异步传送模式（ATM），也可以采用混合交换方式。在通信网中，通常采用分布式交换技术，而不像电话交换机那样采用集中式交换。分布式交换的控制协议又可分为随机型和控制型两大类，每一类又可细分为许多种。

以 802.3 CSMA/CD 总线网（以太网）为例，它采用的是时分复接、分组交换方式，其媒质接入控制是随机的，只要总线空闲即可发送数据帧，无需等待发送控制信号。

### （三）按技术体制分类

光纤通信网络从技术体制上可分为准同步数字（PDH）光传输网络和同步数字（SDH）光传输网络两类。

PDH 网络可分为基群、二次群、三次群、四次群及五次群网络。目前我国长途干线网络绝大部分均使用四次群网络。

SDH 网络可分为 STM-1（155Mb/s）、STM-4（622Mb/s）及 STM-16（2.5Gb/s）网