

续表

线路速率 (Mbit/s)	线路速率 的近似值	SONET 符号	ITU-T 符号	相当的话路数 (每个话路 64 kbit/s)
2488.320	2.5 Gbit/s	OC-48/STS-48	STM-16	38880
4976.640	—	OC-96/STS-96	STM-32	77760
9953.280	10 Gbit/s	OC-192/STS-192	STM-64	155520
39813.120	40 Gbit/s	OC-768/STS-768	STM-256	622080

现在可以在网上查到 OC-1920/STM-640（对应于 100 Gbit/s）和 OC-3840/STM-1234（对应于 200 Gbit/s）的记法，但未见更多有关应用的报道。

SDH/SONET 定义了标准光信号，规定了波长为 1310 nm 和 1550 nm 的激光源。在物理层定义了帧结构。SDH 的帧结构是以 STM-1 为基础的，更高的等级是用 N 个 STM-1 复用组成 STM- N ，如 4 个 STM-1 构成 STM-4，16 个 STM-1 构成 STM-16。

SDH/SONET 标准的制定，使北美、日本和欧洲这三个地区三种不同的数字传输体制在 STM-1 等级上获得了统一。各国都同意将这一速率以及在此基础上的更高的数字传输速率作为国际标准。这是第一次真正实现了数字传输体制上的世界性标准。现在 SDH/SONET 标准已成为公认的新一代理想的传输网体制，因而对世界电信网络的发展具有重大的意义。SDH 标准也适合于微波和卫星传输的技术体制。

2.6 宽带接入技术

在第 1 章中已讲过，用户要连接到互联网，必须先连接到某个 ISP，以便获得上网所需的 IP 地址。在互联网的发展初期，用户都是利用电话的用户线通过调制解调器连接到 ISP 的，经过多年的努力，从电话的用户线接入到互联网的速率最高只能达到 56 kbit/s。为了提高用户的上网速率，近年来已经有多种宽带技术进入用户的家庭。然而目前“宽带”尚无统一的定义。很早以前，有人认为只要接入到互联网的速率远大于 56 kbit/s 就是宽带。后来美国联邦通信委员会 FCC 认为只要双向速率之和超过 200 kbit/s 就是宽带。以后，宽带的标准也不断提高。2015 年 1 月，美国联邦通信委员会 FCC 又对接入网的“宽带”进行了重新定义，将原定的宽带下行速率调整至 25 Mbit/s，原定的宽带上行速率调整至 3 Mbit/s。

从宽带接入的媒体来看，可以划分为两大类。一类是有线宽带接入，而另一类是无线宽带接入。由于无线宽带接入比较复杂，我们将在第 9 章中讨论这个问题。下面我们只限于讨论有线宽带接入。

2.6.1 ADSL 技术

非对称数字用户线 ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) 技术是用数字技术对现有模拟电话的用户线进行改造，使它能够承载宽带数字业务。虽然标准模拟电话信号的频带被限制在 300 ~ 3400 Hz 的范围内（这是电话局的交换机设置的标准话路频带），但用户线本身实际可通过的信号频率却超过 1 MHz。ADSL 技术把 0 ~ 4 kHz 低端频谱留给传统电话使用，而把原来没有被利用的高端频谱留给用户上网使用。ADSL 的 ITU 的标准是 G.992.1（或称 G.dmt，表示它使用 DMT 技术，见后面的介绍）。由于用户当时上网主要是从互联网下载各种文档，而向互联网发送的信息量一般都不太大，因此 ADSL 的下行（从 ISP 到用户）带

宽都远远大于上行（从用户到 ISP）带宽。“非对称”这个名词就是这样得出的。

ADSL 的传输距离取决于数据率和用户线的线径（用户线越细，信号传输时的衰减就越大）。例如，0.5 mm 线径的用户线，传输速率为 1.5~2.0 Mbit/s 时可传送 5.5 km；但当传输速率提高到 6.1 Mbit/s 时，传输距离就缩短为 3.7 km。如果把用户线的线径减小到 0.4 mm，那么在 6.1 Mbit/s 的传输速率下就只能传送 2.7 km。此外，ADSL 所能得到的最高数据传输速率还与实际的用户线上的信噪比密切相关。

ADSL 在用户线（铜线）的两端各安装一个 ADSL 调制解调器。这种调制解调器的实现方案有许多种。我国采用的方案是离散多音调 DMT（Discrete Multi-Tone）调制技术。这里的“多音调”就是“多载波”或“多子信道”的意思。DMT 调制技术采用频分复用的方法，把 40 kHz 以上一直到 1.1 MHz 的高端频谱划分为许多子信道，其中 25 个子信道用于上行信道，而 249 个子信道用于下行信道，并使用不同的载波（即不同的音调）进行数字调制。这种做法相当于在一对用户线上使用许多小的调制解调器并行地传送数据。由于用户线的具体条件往往相差很大（距离、线径、受到相邻用户线的干扰程度等都不同），因此 ADSL 采用自适应调制技术使用户线能够传送尽可能高的数据率。当 ADSL 启动时，用户线两端的 ADSL 调制解调器就测试可用的频率、各子信道受到的干扰情况，以及在每一段频率上测试信号的传输质量。这样就使 ADSL 能够选择合适的调制方案以获得尽可能高的数据率。可见 ADSL 不能保证固定的数据率。对于质量很差的用户线甚至无法开通 ADSL。因此电信局需要定期检查用户线的质量，以保证能够提供向用户承诺的最高的 ADSL 数据率。图 2-21 显示的是 DMT 技术的频谱分布。

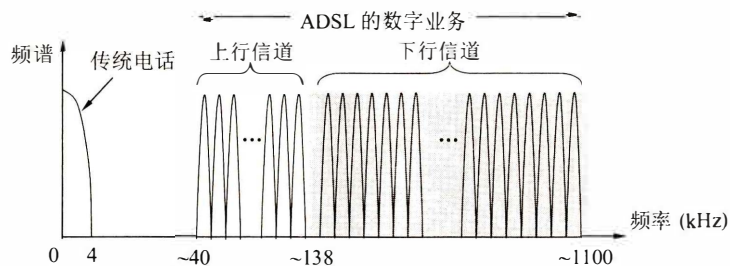


图 2-21 DMT 技术的频谱分布

基于 ADSL 的接入网由以下三大部分组成：数字用户线接入复用器 DSLAM (DSL Access Multiplexer)、用户线和用户家中的一些设施（见图 2-22）。数字用户线接入复用器包括许多 ADSL 调制解调器。ADSL 调制解调器又称为接入端接单元 ATU (Access Termination Unit)。由于 ADSL 调制解调器必须成对使用，因此把在电话端局（或远端站）和用户家中所用的 ADSL 调制解调器分别记为 ATU-C（C 代表端局(Central Office)）和 ATU-R（R 代表远端(Remote)）。用户电话通过电话分离器(Splitter)和 ATU-R 连在一起，经用户线到端局，并再次经过一个电话分离器把电话连到本地电话交换机。电话分离器是无源的，它利用低通滤波器将电话信号与数字信号分开。将电话分离器做成无源的是为了在停电时不影响传统电话的使用。一个 DSLAM 可支持多达 500~1000 个用户。若按每户 6 Mbit/s 计算，则具有 1000 个端口的 DSLAM（这就需要 1000 个 ATU-C）应有高达 6 Gbit/s 的转发能力。由于 ATU-C 要使用数字信号处理技术，因此 DSLAM 的价格较高。

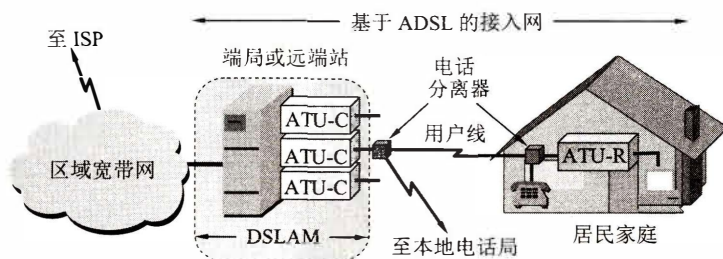


图 2-22 基于 ADSL 的接入网的组成

ADSL 最大的好处就是可以利用现有电话网中的用户线（铜线），而不需要重新布线。有许多老的建筑，电话线都早已存在。但若重新铺设光纤，往往会对原有建筑产生一些损坏。从尽量少损坏原有建筑考虑，使用 ADSL 进行宽带接入就非常合适了。到 2006 年 3 月为止，全世界的 ADSL 用户已超过 1.5 亿户。

最后我们要指出，ADSL 借助于在用户线两端安装的 ADSL 调制解调器（即 ATU-R 和 ATU-C）对数字信号进行了调制，使得调制后的数字信号的频谱适合在原来的用户线上传输。用户线本身并没有发生变化，但给用户的感觉是：加上 ADSL 调制解调器的用户线好像能够直接把用户计算机产生的数字信号传送到远方的 ISP。正因为这样，原来的用户线加上两端的调制解调器就变成了可以传送数字信号的数字用户线 DSL。

ADSL 技术也在发展。现在 ITU-T 已颁布了更高速率的 ADSL 标准，即 G 系列标准，例如 ADSL2（G.992.3 和 G.992.4）和 ADSL2+（G.992.5），它们都称为第二代 ADSL，目前已开始被许多 ISP 采用和投入运营。第二代 ADSL 改进的地方主要是：

(1) 通过提高调制效率得到了更高的数据率。例如，ADSL2 要求至少应支持下行 8 Mbit/s、上行 800 kbit/s 的速率。而 ADSL2+ 则将频谱范围从 1.1 MHz 扩展至 2.2 MHz（相应的子信道数目也增多了），下行速率可达 16 Mbit/s（最大传输速率可达 25 Mbit/s），而上行速率可达 800 kbit/s。

(2) 采用了无缝速率自适应技术 SRA (Seamless Rate Adaptation)，可在运营中不中断通信和不产生误码的情况下，根据线路的实时状况，自适应地调整数据率。

(3) 改善了线路质量评测和故障定位功能，这对提高网络的运行维护水平具有非常重要的意义。

这里我们要强调一下，ADSL 并不适合于企业。这是因为企业往往需要使用上行信道发送大量数据给许多用户。为了满足企业的需要，ADSL 技术有几种变型。例如，对称 DSL，即 SDSL (Symmetric DSL)，它把带宽平均分配到下行和上行两个方向，很适合于企业使用，每个方向的速率分别为 384 kbit/s 或 1.5 Mbit/s，距离分别为 5.5 km 或 3 km。还有一种使用一对线或两对线的对称 DSL 叫作 HDSL (High speed DSL)，用来取代 T1 线路的高速数字用户线，数据速率可达 768 kbit/s 或 1.5 Mbit/s，距离为 2.7~3.6 km。

还有一种比 ADSL 更快的、用于短距离传送（300~1800 m）的 VDSL (Very high speed DSL)，即甚高速数字用户线，也很值得注意。这也就是 ADSL 的快速版本。VDSL 的下行速率达 50~55 Mbit/s，上行速率是 1.5~2.5 Mbit/s。2011 年 ITU-T 颁布了更高速率的 VDSL2（即第二代的 VDSL）的标准 G.993.2。VDSL2 能够提供的上行和下行速率都能够达到 100 Mbit/s。用这样的速率能够非常流畅地观看视频节目。

以上这些不同的高速 DSL 都可记为 xDSL。

近年来, 高速 DSL 技术的发展又有了新的突破。2011 年 ITU-T 成立了 G.fast 项目组。这个项目组致力于短距离超高速接入新标准的制定, 目标是使用单对直径为 0.5 mm 的铜线在 100 m 距离提供 900 Mbit/s 的接入速率, 而 200 m 距离的速率为 600 Mbit/s, 300 m 距离的速率为 300 Mbit/s。我国的华为公司积极参加了此标准的制定工作, 是该标准的主要技术贡献者之一。在龙国柱博士的领导下, 华为公司于 2012 年首先研制成功 Giga DSL 样机, 使用时分双工 TDD (Time Division Duplex) 和 OFDM 技术, 有效地降低了辐射干扰和设备功耗, 实现了超高速的 DSL 接入。现在新的建议标准 G.mgfast 已被提出 (这里的 mg 表示几个吉比特 Multi-Gigabit 的高速接入), 其目标是在近期商用化。

目前在欧洲, 这种超高速 DSL 的接入方式很受欢迎。这是因为在欧洲, 具有历史意义的古老建筑非常多, 而各国政府都已制定了很严格的保护文物的法律。在受保护的古老建筑的墙上钻洞铺设光缆, 在法律上是被严格禁止的 (即使是在朝街面的阳台上放置空调室外机也是不允许的)。但这些国家的电话普及率很高, 进入这些建筑的电话线都早已铺设好了。因此, 利用现有电话线来实现高速接入, 在欧洲就特别具有现实意义。

在我国, 情况有些不同。在建设新的高楼时, 就已经把各种电缆的管线位置预留好了。因此, 高楼中的用户可以根据自己的需要选择合适的接入方式 (不一定非要采用 xDSL 技术)。因此上述这种超高速的 DSL 接入方式在国内使用得还较少。

2.6.2 光纤同轴混合网 (HFC 网)

光纤同轴混合网 (HFC 网, HFC 是 Hybrid Fiber Coax 的缩写) 是在目前覆盖面很广的有线电视网的基础上开发的一种居民宽带接入网, 除可传送电视节目外, 还能提供电话、数据和其他宽带交互型业务。最早的有线电视网是树形拓扑结构的同轴电缆网络, 它采用模拟技术的频分复用对电视节目进行单向广播传输。但以后有线电视网进行了改造, 变成了现在的光纤同轴混合网 (HFC 网)。

为了提高传输的可靠性和电视信号的质量, HFC 网把原有线电视网中的同轴电缆主干部分改换为光纤 (如图 2-23 所示)。光纤从头端连接到光纤节点 (fiber node)。在光纤节点光信号被转换为电信号, 然后通过同轴电缆传送到每个用户家庭。从头端到用户家庭所需的放大器数目也就减少到仅 4~5 个。连接到一个光纤节点的典型用户数是 500 左右, 但不超过 2000。

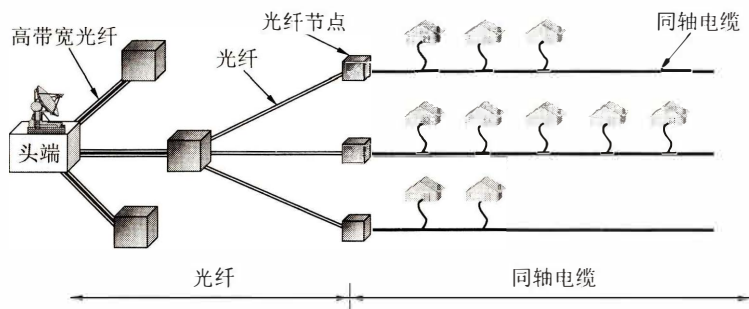


图 2-23 HFC 网的结构图

光纤节点与头端的典型距离为 25 km, 而从光纤节点到其用户的距离则不超过 2~3 km。

原来的有线电视网的最高传输频率是 450 MHz, 并且仅用于电视信号的下行传输。但现在的 HFC 网具有双向传输功能, 而且扩展了传输频带。根据有线电视频率配置标准 GB/T

1978-1999, 目前我国 HFC 网的频带划分如图 2-24 所示。

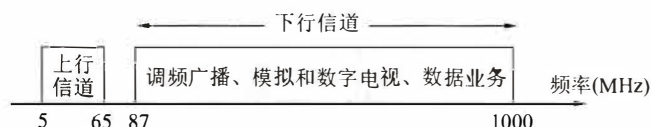


图 2-24 我国的 HFC 网的频带划分

要使现有的模拟电视机能够接收数字电视信号, 需要把一个叫作机顶盒(set-top box)的设备连接在同轴电缆和用户的电视机之间。但为了使用户能够利用 HFC 网接入到互联网, 以及在上行信道中传送交互数字电视所需的一些信息, 我们还需要增加一个为 HFC 网使用的调制解调器, 它又称为**电缆调制解调器(cable modem)**。电缆调制解调器可以做成一个单独的设备(类似于 ADSL 的调制解调器), 也可以做成内置式的, 安装在电视机的机顶盒里面。用户只要把自己的计算机连接到电缆调制解调器, 就可方便地上网了。

美国的有线电视实验室 CableLabs 制定的**电缆调制解调器规约 DOCSIS(Data Over Cable Service Interface Specifications)**的第一个版本 DOCSIS 1.0, 已在 1998 年 3 月被 ITU-T 批准为国际标准。后来又有了 2001 年的 DOCSIS 2.0 和 2006 年的 DOCSIS 3.0 等新的标准。

电缆调制解调器不需要成对使用, 而只需安装在用户端。电缆调制解调器比 ADSL 使用的调制解调器复杂得多, 因为它必须解决共享信道中可能出现的冲突问题。在使用 ADSL 调制解调器时, 用户计算机所连接的电话用户线是该用户专用的, 因此在用户线上所能达到的最高数据率是确定的, 与其他 ADSL 用户是否在网上无关。但在使用 HFC 的电缆调制解调器时, 在同轴电缆这一段用户所享用的最高数据率是不确定的, 因为某个用户所能享用的数据率取决于这段电缆上现在有多少个用户正在传送数据。有线电视运营商往往宣传通过电缆调制解调器上网可以达到比 ADSL 更高的数据率(例如达到 10 Mbit/s 甚至 30 Mbit/s), 但只有在很少几个用户上网时才可能会是这样的。然而若出现大量用户(例如几百个)同时上网, 那么每个用户实际的上网速率可能会低到令人难以忍受的程度。

2.6.3 FTTx 技术

由于互联网上已经有了大量的视频信息资源, 因此近年来宽带上网的普及率增长得很快。但是为了更快地下载视频文件, 以及更加流畅地欣赏网上的各种高清视频节目, 尽快地对用户的上网速率进行升级就成为 ISP 的重要任务。从技术上讲, **光纤到户 FTTH(Fiber To The Home)**应当是最好的选择, 这也是广大网民最终所向往的。所谓光纤到户, 就是把光纤一直铺设到用户家庭。只有在光纤进入用户的家门后, 才把光信号转换为电信号。这样做就可以使用户获得最高的上网速率。

现在还有多种宽带光纤接入方式, 称为 FTTx, 表示 Fiber To The ...。这里字母 x 可代表不同的光纤接入地点。实际上, 光电进行转换的地方, 可以在用户家中(这时 x 就是 H), 也可以向外延伸到离用户家门口有一定距离的地方。例如, 光纤到路边 FTTC(C 表示 Curb)、光纤到小区 FTTZ(Z 表示 Zone)、光纤到大楼 FTTB(B 表示 Building)、光纤到楼层 FTTF(F 表示 Floor)、光纤到办公室 FTTO(O 表示 Office)、光纤到桌面 FTTD(D 表示 Desk), 等等。截至 2019 年 12 月, 我国光纤接入 FTTH/O 的用户, 已占互联网宽带接入用户总数的 92.9%, 说明光纤接入已在我们互联网宽带接入中占绝对优势。

其实, 信号在陆地上长距离的传输, 现在基本上都已经实现了光纤化。在前面所介绍

的 ADSL 和 HFC 宽带接入方式中,用于远距离的传输媒体也早就使用了光缆,只是到了临近用户家庭的地方,才转为铜缆(电话的用户线和同轴电缆)。我们知道,一个家庭用户远远用不了一根光纤的通信容量。为了有效地利用光纤资源,在光纤干线和广大用户之间,还需要铺设一段中间的转换装置即**光配线网 ODN (Optical Distribution Network)**,使得数十个家庭用户能够共享一根光纤干线。图 2-25 是现在广泛使用的无源光配线网的示意图。“无源”表明在光配线网中无须配备电源,因此基本上不用维护,其长期运营成本和管理成本都很低。无源光配线网常称为**无源光网络 PON (Passive Optical Network)**。

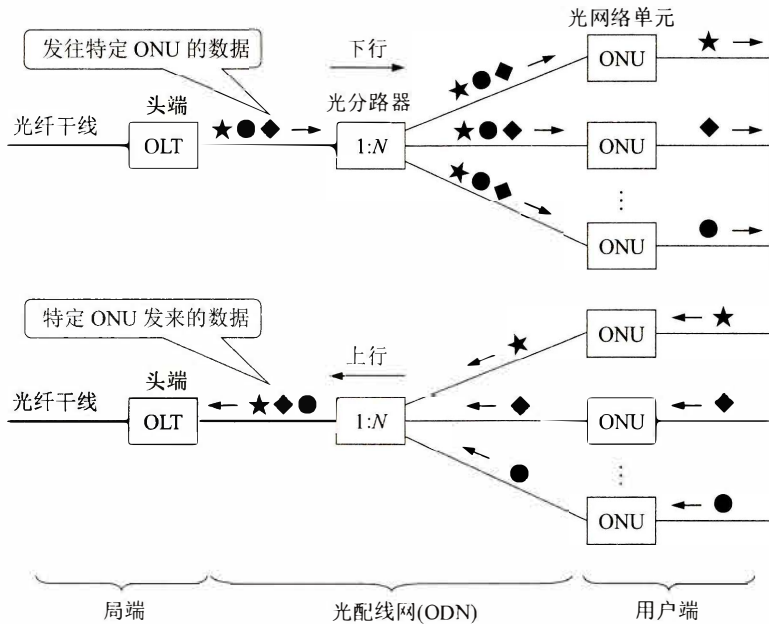


图 2-25 无源光配线网的组成

在图 2-25 中,光线路终端 OLT (Optical Line Terminal)是连接到光纤干线的终端设备。OLT 把收到的下行数据发往无源的 1:N 光分路器(splitter),然后用广播方式向所有用户端的光网络单元 ONU (Optical Network Unit) 发送。典型的光分路器使用分路比是 1:32,有时也可以使用多级的光分路器。每个 ONU 根据特有的标识只接收发送给自己的数据,然后转换为电信号发往用户家中。每一个 ONU 到用户家中的距离可根据具体情况来设置,OLT 则给各 ONU 分配适当的光功率。如果 ONU 在用户家中,那就是光纤到户 FTTH 了。

当 ONU 发送上行数据时,先把电信号转换为光信号,光分路器把各 ONU 发来的上行数据汇总后,以 TDMA 方式发往 OLT,而发送时间和长度都由 OLT 集中控制,以便有序地共享光纤主干。

光配线网采用波分复用,上行和下行分别使用不同的波长。

无源光网络 PON 的种类很多,但最流行的有以下两种,各有其优缺点。

一种是以以太网无源光网络 EPON (Ethernet PON),已在 2004 年 6 月形成了 IEEE 的标准 802.3ah,较新的版本是 802.3ah-2008。EPON 在链路层使用以太网协议,利用 PON 的拓扑结构实现了以太网的接入。EPON 的优点是:与现有以太网的兼容性好,并且成本低,扩展性强,管理方便。在第 3 章 3.5.4 节还要讨论这个问题。

另一种是吉比特无源光网络 GPON (Gigabit PON),其标准是 ITU 在 2003 年 1 月批准的

ITU-T G.984。之后更新多次，目前最新的是 2010 年的 G.984.7。GPON 采用通用封装方法 GEM (Generic Encapsulation Method)，可承载多业务，对各种业务类型都能够提供服务质量保证，总体性能比 EPON 好。GPON 虽成本稍高，但仍是很有潜力的宽带光纤接入技术。

采用光纤接入时，究竟把光网络单元 ONU 放在什么地方，应通过详细的预算对比才能确定。从总的趋势来看，光网络单元 ONU 越来越靠近用户的家庭，因此就有了“光进铜退”的说法。

需要注意的是，目前有些网络运营商所宣传的“光纤到户”，往往并非真正的 FTTH，而是 FTTx，对居民来说就是 FTTB 或 FTTF。有的运营商把这种接入方式叫作“光纤宽带”或“光纤加局域网”，这样可能较为准确。

本章的重要概念

- 物理层的主要任务就是确定与传输媒体的接口有关的一些特性，如机械特性、电气特性、功能特性和过程特性。
- 一个数据通信系统可划分为三大部分，即源系统、传输系统和目的系统。源系统包括源点（或源站、信源）和发送器，目的系统包括接收器和终点（或目的站、信宿）。
- 通信的目的是传送消息。话音、文字、图像、视频等都是消息。数据是运送消息的实体。信号则是数据的电气或电磁的表现。
- 根据信号中代表消息的参数的取值方式不同，信号可分为模拟信号（或连续信号）和数字信号（或离散信号）。代表数字信号不同离散数值的基本波形称为码元。
- 根据双方信息交互的方式，通信可以划分为单向通信（或单工通信）、双向交替通信（或半双工通信）和双向同时通信（或全双工通信）。
- 来自信源的信号叫作基带信号。信号要在信道上传输就要经过调制。调制有基带调制和带通调制之分。最基本的带通调制方法有调幅、调频和调相。还有更复杂的调制方法，如正交振幅调制。
- 要提高数据在信道上的传输速率，可以使用更好的传输媒体，或使用先进的调制技术。但数据传输速率不可能被任意地提高。
- 传输媒体可分为两大类，即导引型传输媒体（双绞线、同轴电缆或光纤）和非导引型传输媒体（无线、红外或大气激光）。
- 常用的信道复用技术有频分复用、时分复用、统计时分复用、码分复用和波分复用（光的频分复用）。
- 最初在数字传输系统中使用的传输标准是脉冲编码调制 PCM。现在高速的数字传输系统使用同步光纤网 SONET（美国标准）或同步数字系列 SDH（国际标准）。
- 用户到互联网的宽带接入方法有非对称数字用户线 ADSL（用数字技术对现有的模拟电话用户线进行改造）、光纤同轴混合网 HFC（在有线电视网的基础上开发的）和 FTTx（即光纤到……）。
- 为了有效地利用光纤资源，在光纤干线和用户之间广泛使用无源光网络 PON。无源光网络无须配备电源，其长期运营成本和管理成本都很低。最流行的无源光网络是以太网无源光网络 EPON 和吉比特无源光网络 GPON。