

第5章 传输网

传输网的目标是建成一个大容量、高生存能力、高灵活性、高传输质量、有智能功能、可集中管理的通信传输网络，它相对独立于各种业务网，是能满足各种业务和信号传输的统一平台，能够有效地支持现有各种业务网、支撑网和未来的综合网。未来的传输仍是以光纤通信为基本传输网，其他介质的传输网络也会有较大的发展。本章主要阐述 SDH、波分复用、数字微波等基于时分复用的有关技术及系统组成，而基于分组的传输网（PTN）则放在第 13 章单独介绍。

5.1 SDH

5.1.1 传输网基础

传输网的定义：以光或电为载体传送信息，实现信息的可靠发送、整合、收敛、转发等功能，由各种节点和物理电路组成的网络。传输网的高速、大容量、长距离是光纤通信系统的特征，基于光通信的传输网络也是当今传输网的主流。

1. PCM 帧结构

PCM 技术是根据香农定理，对模拟信号进行抽样、量化、编码，变换成 64kbit/s 的数字信号，再复接成 2048kbit/s 的基群信号，就形成了时分复用的 30/32 路 PCM 系统，如图 5.1 所示。

具体来讲，在通信中对语音的抽样频率为 8kHz，也就是说每隔 125μs 抽样一次，对每个话路来说，每次抽样值经过量化后可编成 8 位的 PCM 码组，这就是“时隙”。帧是指这样一组相邻的数字时隙，其中各数字时隙的位置可根据帧定位信号来识别。有时根据需要，由几个帧构成一个复帧，或者把一个帧分成几个子帧。一帧内主要包含以下内容。

① 帧定位信号及服务比特，帧定位信号即帧同步信号，是用来保证获得并保持帧同步的特征信号。服务比特是指保障设备正常工作并能提供各种方便的一些数字信号，如告警信号及其他指示或控制信号。

② 信息位是帧中传递的主要内容，占用一帧中的时隙数也最多。

③ 信令位。信令是指在通信网络中与接续的建立和控制以及网络管理有关的信息位。信令总是和话路配合使用的，在基群设备中占有规定的时隙。

从时间上讲，1 个复帧为 2ms；1 帧占 125μs；而一个时隙占 3.9μs。每时隙 8 位比特码，即每比特位占 488ns。

从码率上讲，抽样频率为 8000Hz，也就是每秒传送 8000 帧，每帧有 $32 \times 8 = 256\text{bit}$ ，因此总码率为 $256 \text{ 比特/帧} \times 8000 \text{ 帧/秒} = 2048\text{kbit/s}$ 。对于每个话路来说，每秒 8000 个时隙，每时隙 8bit，所以可得 $8 \times 8000 = 64\text{kbit/s}$ 。

2. PDH

上述的 PCM 基群（或称一次群）显然不能满足要求，因此出现了 PCM 高次群系统。但在复接成二次群以上时却采用了正码速调整的异步复接，而且为了复接的方便，规定了各支路时钟之间允许的偏差标称值范围，即称为准同步数字系列（PDH，Presynchronous Digital Hierarchy）。

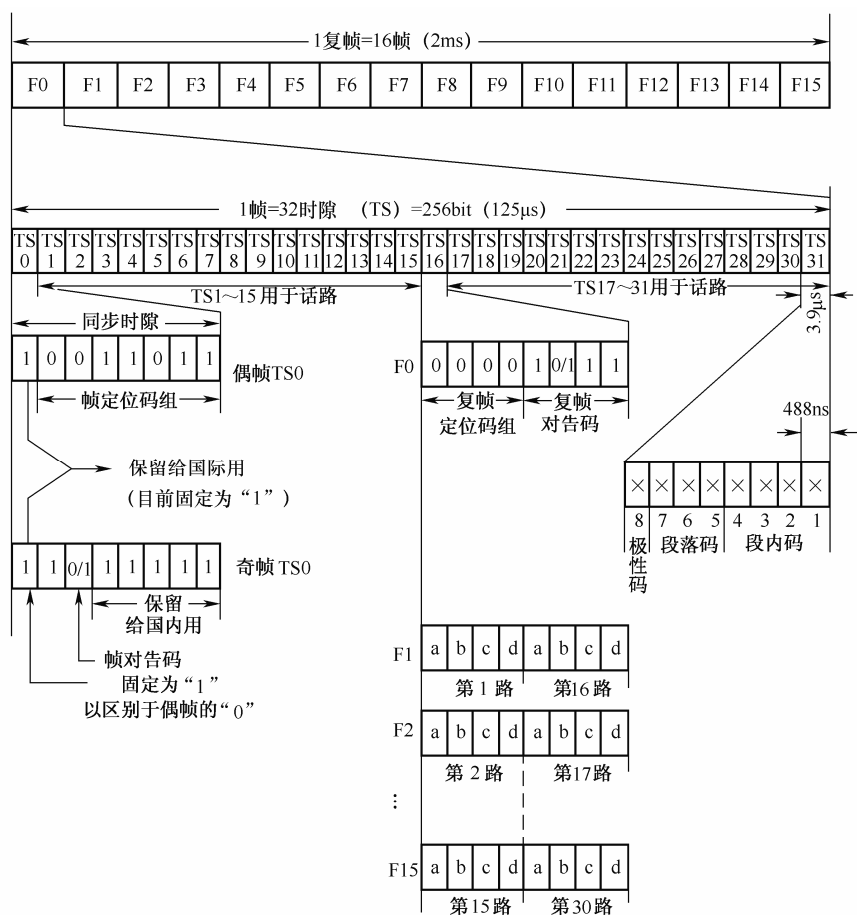


图 5.1 30/32 路 PCM 基群帧结构

ITU-T 推荐了两类准同步数字复接系列。北美和日本等国采用 24 路系统，即以 1.544Mbit/s 作为一次群（基群）的数字速率系列；欧洲和中国等国家采用 30/32 路系统，即以 2.048Mbit/s 作为一次群的数字速率系列。所以，形成了世界上的两大互不兼容的 PDH 体系。我国原邮电部也对 PCM 高次群做了规定，采用 A 率，并只规定了一次群至四次群，没有规定五次群。图 5.2 是各个高次群的速率，因我国采用 PDH 各次群的码速属欧洲体系，又称为 E 标准。由于 PDH 存在较多技术上的缺陷，现已逐步被 SDH 技术所取代。

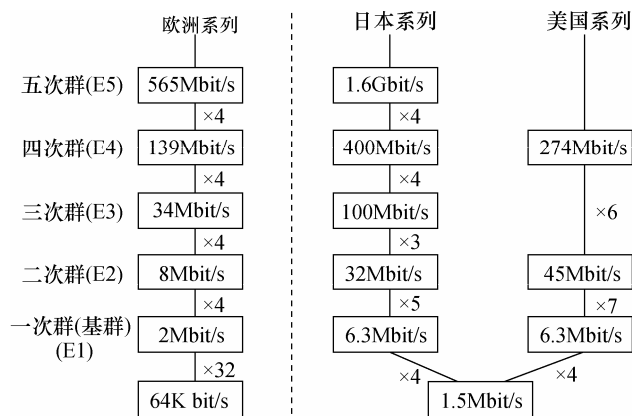


图 5.2 高次群的速率

在时分复用系统中，高次群是由若干个低次群通过数字复用设备汇总而成的。对于 32 路 PCM 系统来说，其基群的速率为 2.048kbit/s。其二次群则由 4 个基群汇总而成，速率为 8448kbit/s。对于速率更高、路数更多的三次群以上的系统，尚无统一的建议标准。

3. 光纤通信基本模型

图 5.3 所示为数字光纤通信基本模型（单向），包括两个光端机和若干个光中继器，以及由光纤构成的光缆线路。以下简要说明其各个组成部分的作用。

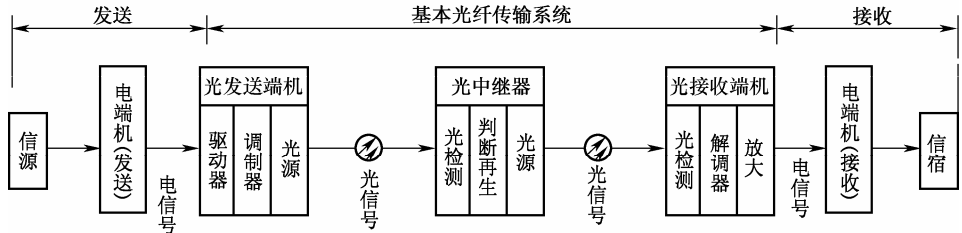


图 5.3 数字光纤通信基本模型（单向）

光发送端机：是将电端机输入的电信号转换为光信号，并将光信号最大限度地注入耦合到光纤或光缆中传输，是完成电/光转换的光端机。它主要由光源、驱动器和调制器组成。

光接收端机：是将光纤或光缆传输来的光信号，经光检测器转变为电信号，然后再将电信号经放大到足够的电平，送入接收电端机，是完成光/电转换的光端机。它主要由光检测器、解调器和放大电路组成。

光纤或光缆：是传送光信号的传输介质。

光中继器：起补偿光衰减和矫正波形失真的作用。它主要由光检测器、判决再生和光源组成，兼有收/发光端机两种功能。光信号经过光缆长距离传输之后，光能量被衰减，波形也发生畸变。为保证通信质量，光中继器将收到的微弱光信号转换成电信号，经过判决再生处理器后，又驱动光源产生光信号，耦合到光缆线路中继器传输。

电端机：主要作用是将各低速的支路信号进行复接，从而达到提高传输效率的目的。

传输与传送：这两个概念通常都是混用的，也可以理解为传输是指点到点的物理链路可靠送达，而传送更强调端到端的组网。

5.1.2 SDH 帧结构

SDH 是一种通信传输的国际标准，最突出的特点有两个方面：SDH 传输系统在 STM-1 上统一了世界上原有的数字传输系列，实现了数字传输体制上的世界标准及多厂家设备的横向兼容；有国际通信的统一网络节点接口（NNI），从而简化了信号的互通以及信号的传输、交叉连接和交换过程。图 5.4 给出了 PDH 系列和 SDH 系列分插低速支路信号的过程。

SDH 采用同步复接方式和灵活的复用映射结构，只需利用软件即可从高速率信号一次直接分插出低速率支路信号，这样既不影响其他的支路信号，又避免了需要对全部高速复用信号进行解复用的做法，省去了全套“背靠背”的复用设备，使上下电路的业务十分容易，并省去了大量的电接口。

SDH 可对 NNI 进行统一的规范，使得 SDH 能实现横向兼容。SDH 信号的基本模块是速率为 155.420Mbit/s 的同步传送模块（STM-1），更高速率等级的同步数字系列信号是 STM-N（N=1、4、16、64），可通过简单地将 STM-1 信号进行字节间插入同步信号复接而成，简化了复接和分接过程，使 SDH 适合于高速大容量光纤通信系统，便于通信系统的扩容和升级换代。

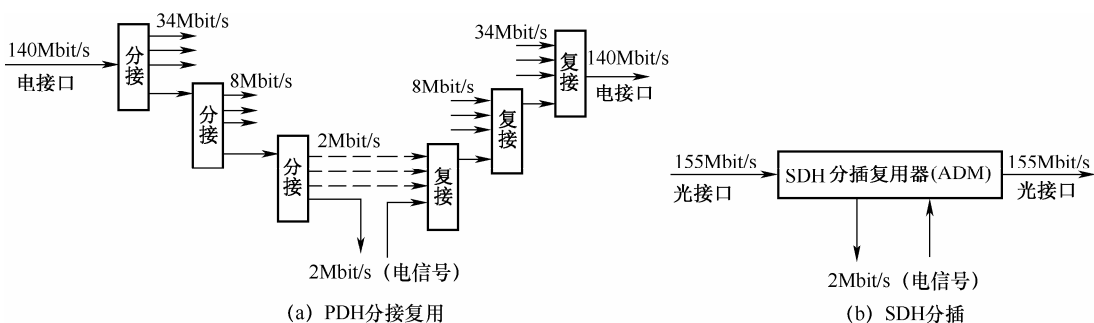
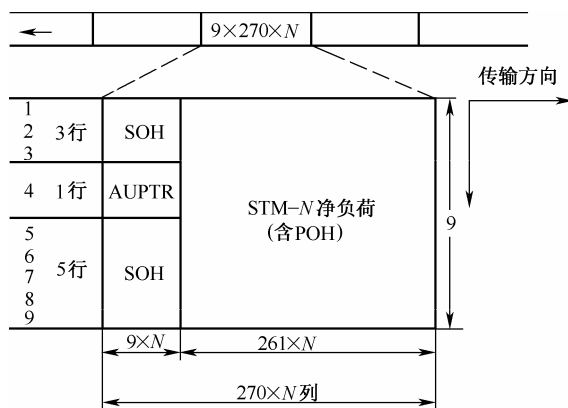


图 5.4 PDH 系列和 SDH 系列分插低速支路信号的过程

1. SDH 帧结构

SDH 的帧结构比较复杂, 图 5.5 所示的是 STM- N 帧结构, 由 $270 \times N$ 列、9 行的字节组成, 字节的传输顺序是从左到右、从上到下。图中 N 的取值范围是以 1 为基数、以 4 为等比的级数, 如 1、4、16、64。但是, ITU-T 只对 STM-1、STM-4、STM-16、STM-64 做出了规定。SDH 的基础设备是同步传送模块 (STM), 下面列出了 $N=1、4、16、64$ 时的线路码速和通路容量。



SOH: 帧开销 (Section Overhead) AUPTR: 管理单元指针

图 5.5 STM- N 帧结构

第 1 级为 STM-1, 线路码速为 155.420Mbit/s 1920CH

第 2 级为 STM-4, 线路码速为 622.080Mbit/s 7680CH

第 3 级为 STM-16, 线路码速为 2488.320Mbit/s 30720CH

第 4 级为 STM-64, 线路码速为 9953.280Mbit/s 122880CH

例如 $N=1$ 时, 为 STM-1, 则帧长 $= 270 \times 9 = 2430\text{B}$, 一帧的比特数 $= 2430 \times 8 = 19440\text{bit}$, 一帧时间的长度为 $125\mu\text{s}$, 即速率为 155.420Mbit/s。

SDH 结构中包括段开销 (SOH)、管理单元指针 (AUPTR)、STM- N 净负荷 (Payload) 等。

(1) STM- N 净负荷 (Payload) 区域

STM- N 净负荷区域是存放待传送信息码的地方, 并包含 POH。POH 是用于通道性能监视、管理和控制的通道开销字节。

(2) 段开销 (SOH) 区域

SDH 帧结构中安排了丰富的开销比特。这些开销比特包括段开销 (SOH) 和通道开销 (POH), 因而网络的运行、维护和管理 (OAM) 能力得到加强。SOH 主要提供网络运行、管理和维护使用的字节段, SOH 分为再生段开销 (RSOH) 和复用段开销 (MSOH) 两部分, 其中

RSOH 在帧中位于 $1\sim 9\times N$ 列、 $1\sim 3$ 行；MSOH 在帧中位于 $1\sim 9\times N$ 列、 $5\sim 9$ 行。

(3) 管理单元指针区域

管理单元指针 (AUPTR) 在帧结构中位于 $1\sim 9\times N$ 列、4 行, 用来指示信息净负荷的第一字节在帧内的准确位置。由于低速的支路信号在高速 SDH 帧中的位置是有规律的, 接收端可根据指针的指示, 找到信息净负荷第一字节的位置, 并将其正确地分离出来。

5.1.3 复用技术

在 SDH 中采用了净负荷指针技术, 比较圆满地结合了正比特塞入法和固定位置映射法的特点。低阶的 SDH 信号复用成高阶的 SDH 信号是通过字节间插入同步复用的方式来完成, 在时分复用的过程中, 保持帧频不变 (8000 帧/秒)。这就意味着高一级的 STM- N 信号是低一级的 STM- N 信号速率的 4 倍。SDH 网要求 SDH 的复用方式既能满足准同步复用 (如将 PDH 信号复用进 STM- N), 又能满足同步复用 (如 STM-1 同步复用 STM-4)。

1. 复用结构

ITU-T 规定的复用结构示意图如图 5.6 所示。图中, VC 表示虚容器; C、C-12、C-3、C-4 表示容器; TU 表示支路单元; AU 表示管理单元; AUG 表示管理单元组; TUG 表示支路单元组。

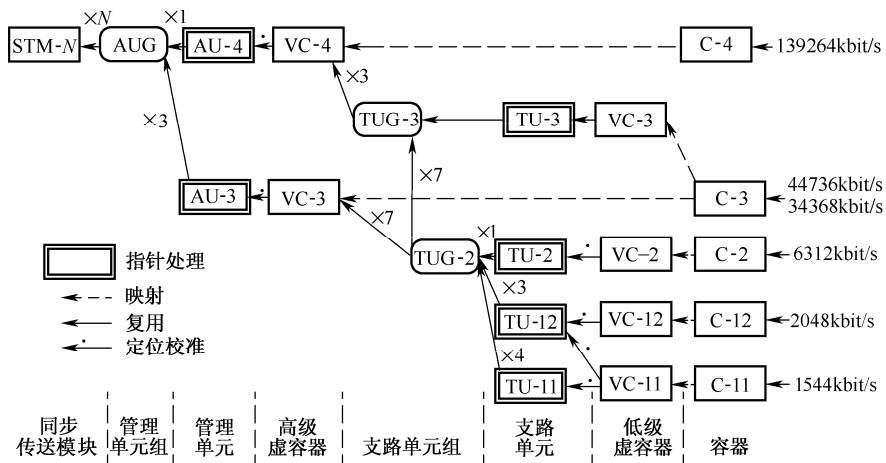


图 5.6 SDH 复用结构

(1) 容器 (C)

容器是一种信息结构, 主要完成速率适配功能。容器是用来装载 PDH 信号的标准信息结构, 主要作用是进行速率调整。让那些最常用的 PDH 信号能够装载进有限数量的标准容器中。ITU-T 建议 G. 709 根据 PDH 速率系列规定了 C-11、C-12、C-2、C-3、C-4 五种标准容器, 其中“-”后第 1 位数字代表 PDH 传输系列等级, 第 2 位数字表示同一等级内较高和较低的速率。参与 SDH 复用的各种速率信号都应首先通过码速调整等适配技术装入一个标准容器。已装载的标准容器是虚容器的净负荷。

(2) 虚容器 (VC)

虚容器是支持 SDH 通道层连接的信息结构。VC 由信息净负荷 (C 的输出) 和通道开销 (POH) 组成。VC 的输出为 TU 或 AU 的信息净负荷。VC 是 SDH 中重要的一种信息结构。VC 的包封速率与 SDH 网络同步, 因而不同 VC 的包封相互同步, 而包封内部却允许装载各种不同容量的准同步支路信号。除了在 VC 的组合点和分解点 (即 PDH/SDH 网边界处) 外, VC 在 SDH 网中传输时总保持不变, 因而可以作为一个独立实体在通道中任一点取出或插入, 进行同步复用

和交叉连接，十分方便和灵活。其中，VC-11、VC-12、VC-2 称为低阶虚容器；VC-3、VC-4 称为高阶虚容器。

(3) 支路单元、支路单元组 (TU、TUG)

支路单元提供低阶通道层和高阶通道层之间适配的信息结构。支路单元由一个相应的 VC 和一个相应的支路单元指针 (TUPTR) 组成。一个或多个在高阶 VC 净负荷中占有固定位置的 TU 组成支路单元组 (TUG)。

(4) 管理单元、管理单元组 (AU、AUG)

AU 是为高阶通道层和复用段层提供适配功能的信息结构。AU 由一个相应的高阶 VC 和一个相应的管理单元指针 (AUPTR) 组成。一个或多个在 STM 帧中占有固定位置的 AU 组成管理单元组 (AUG)。指针的作用就是定位，定位是将帧偏移信息收进支路单元或管理单元的过程。

2. 复用原理

在 SDH 网络的边界处，各种速率的信号 (PDH 或 ATM 等) 先分别经过码速调整装入相应的标准容器 (C-*n*)。所谓装入容器，就是按容器的字节安排将 PDH 信号排列好。即经过速率适配，PDH 信号适配成标准容器信号时，就已经与 SDH 传输网同步；由标准容器出来的数字流间插入通道开销 (POH) 且形成虚容器 (VC-*n*)，这个过程称为“映射”，图中用虚线表示。复用单元的下标表示与此复用单元相应的信号级别。

低阶 VC 在高阶 VC 中的位置和高阶 VC 在 AU 中的位置，由支路单元指针 (TU-*n* PTR) 和附加在相应 AU 上的管理单元指针 (AU-*n* PTR) 描述，即以附加于 VC 上的指针指示低阶 VC 在净荷中的位置。通过定位使接收端能正确地从 STM-*N* 中拆离出相应的 VC，进而通过拆 VC、C 的封装分离出 PDH 低速信号，即实现从 STM-*N* 信号中直接下载低速支路信号的功能。

TU、AU 的主要功能就是进行指针调整。当发生相对的帧相位偏移时，指针值也随之调整，从而保证指针值准确指示 VC 帧起点位置，图中定位用校准线表示。在 TUG、AUG 的复用是按字节进行的同步复用。

SDH 信号的基本传送模块可以容纳现有的北美、日本和欧洲数字信号速率等级系列。包括 1.5Mbit/s、2Mbit/s、6.3Mbit/s、34Mbit/s、45Mbit/s 及 140Mbit/s 在内的 PDH 速率信号均可装入“虚容器”，然后经复接安排到 155.420Mbit/s 和 SDH STM-1 信号帧的净负荷内，使新的 SDH 能支持现有的 PDH，体现了 SDH 的后向兼容性。

3. 映射

各种速率的信号进入 SDH 帧都要经过映射（相当于信号打包）、定位（相当于指针调整）、复用（相当于字节间插复用）3 个步骤，下面通过 PCM 四次群 (139.264Mbit/s) 组成 STM-1 进行说明。

映射是使各支路信号与相应的虚容器 (VC) 容量同步，以便使 VC 成为可以独立进行传送、复用和交叉连接的实体。图 5.7 所示的是 139.264Mbit/s 支路信号异步映射结构。从图中可以看出，PDH 的 139.264Mbit/s 信号采用正码速调整异步装入 C-4，再在 C-4 的 9 行之前加上 VC-4 的通道开销 (VC-4POH)，就构成了 VC-4，完成了四次群向 VC-4 的映射，这就是一个映射过程。

VC-4 由 (1 列×9 行) 的 POH 和 (260 列×9 行) 的净负荷组成。其中，每 1 行分为 20 个字节块，每 1 字节块由 13 字节组成。而字节块的第 1 个字节都是由 W、Y、X、Z 字节组成的，如图 5.8 所示。W 字节表示 8 个信息比特码 (I)；Y 字节表示 8 个固定塞入比特 (R)；X 字节内含有 1 个调整控制比特 (C 码)，每一行有 5 个 X 字节，即每一行共有 5 个 C 码；Z 字节内含有 1 个调整机会比特 (S 码)，每一行只有 1 个 Z 字节，即每一行有 1 个 S 码。

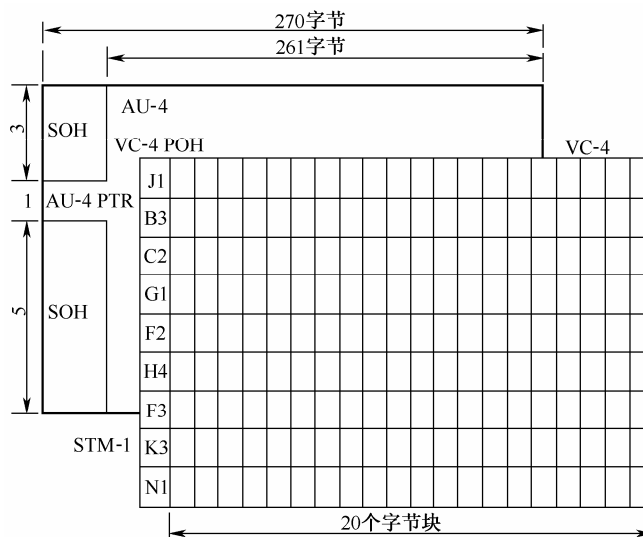
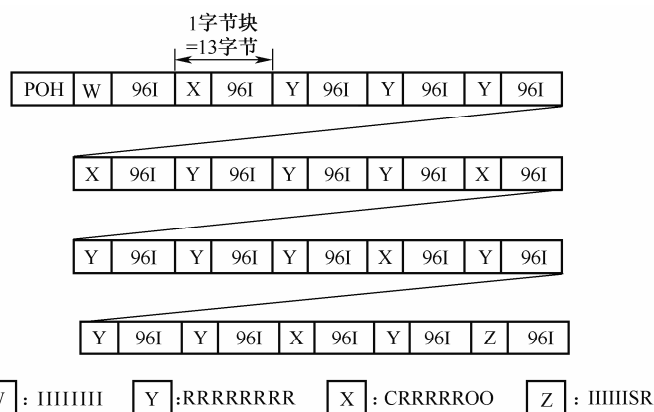


图 5.7 139.264Mbit/s 支路信号异步映射结构



I: 信息比特 R: 固定塞入比特 O: 开销比特 S: 调整机会比特 C: 调整控制比特

图 5.8 VC-4 的行结构

C 码用来控制 S 码，确定 S 码是信息比特 I 还是调整比特 R'，接收端对 R' 不予理睬。在发送端，CCCC=00000 时，S=I；CCCC=11111 时，S=R'。在接收端，根据多数判决的原则，当全部或多数 C 为 0 时，判定 S=I；当全部或多数 C 为 1 时，判定 S=R'。一行中所含的信息比特数为：信息比特(I)=(96×20)+8+6=1934bit。

当 S 全为 I 和全为 R' 时，就可算出 C-4 容器的信息速率 IC 的上、下限，即

$$IC=(1934+1) \times 9 \times 8000=139320 \text{ kbit/s}$$

$$IC=(1934+0) \times 9 \times 8000=139248 \text{ kbit/s}$$

四次群支路信号的速率范围是 139261~139266kbit/s，处于 C-4 能容纳的负荷速率范围之内，故可以装入 C-4。

5.1.4 SDH 组网

1. SDH 传输网结构

SDH 传输网的组成如图 5.9 所示。SDH 灵活的同步复用方式也使数字交叉连接（DXC）

功能的实现大为简化。

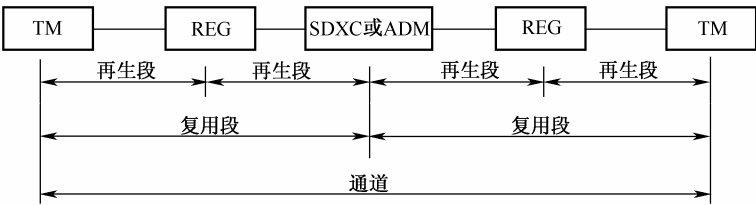


图 5.9 SDH 传输网示意图

SDH 的基本网络单元有同步光缆线路系统、同步复用器 (SM)、终端复用器 (TM)、数字交叉连接设备 (DXC)、光中继器 (REG)、分插复用器 (ADM) 和同步数字交叉连接设备 (SDXC) 等。虽然其功能各异，但都有统一的标准光接口，能够在基本光缆端上实现横向兼容，即允许不同厂家的设备在光路上互通。如图 5.10 所示为常用的 SDH 网络单元。

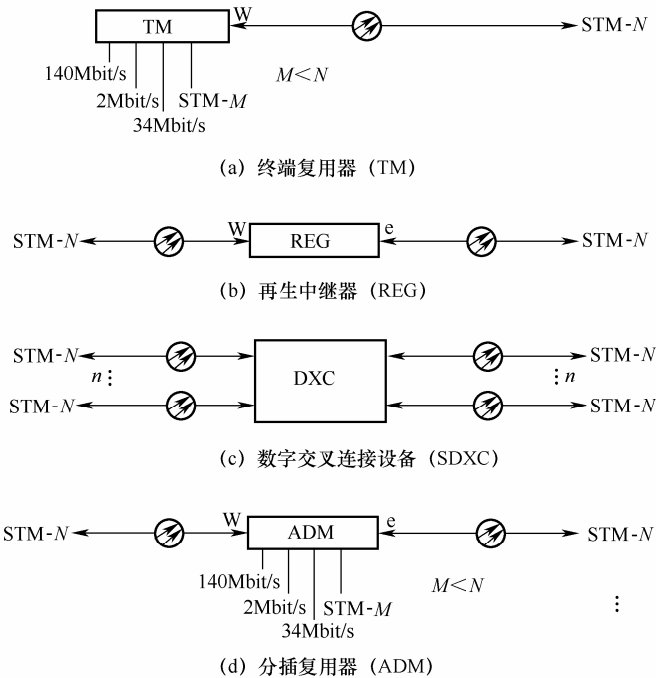


图 5.10 SDH 网络单元

① 终端复用器 (TM)：如图 5.10 (a) 所示，是双端口器件，用于网络终端站。将低速支路信号复用进 STM-N 帧上的任意位置，或完成相反的变换。

② 再生中继器 (REG)：如图 5.10 (b) 所示。REG 有两种：一种是纯光的再生中继器，主要进行光功率放大，以延长光传输距离；另一种是电再生中继器，属双端口器件，只有两个线路端口。它通过光/电转换、电信号抽样判决再生整形、电/光转换，以达到消除线路噪声积累的目的，保证线路上传送信号波形的完好。

③ SDH 数字交叉连接设备 (DXC)：如图 5.10 (c) 所示，适用于 SDH 的 DXC，称为 SDXC。SDXC 是能在接口端间提供可控 VC 的透明连接和再连接的设备，其端口速率既可以是 SDH 速率，也可以是 PDH 速率。此外，它具有一定的控制、管理功能。SDXC 的输入/输出端口与传输系统相连。

DXC 的核心部分是交叉连接功能，参与交叉连接的速率一般等于接入速率。交叉连接速率与接入速率之间的转换需要由复用和解复用功能来完成。例如，将若干个 2Mbit/s 信号复用至 155Mbit/s 中或从 155Mbit/s、140Mbit/s 中解复用出 2Mbit/s 信号；分离本地交换业务和非本地交换业务，为非本地交换业务迅速提供可用路由由数字交叉连接设备，是一种环间互连设备。

④ 分插复用器 (ADM)：如图 5.10 (d) 所示，用于 SDH 传输网络的转接站点处，它是一个三端口的器件。ADM 有两个线路端口和一个支路端口。两个线路端口各接一侧的光缆（每侧收/发共两根光纤）。ADM 的作用是将低速支路信号交叉复用进两侧线路（即上电路），或从线路端口接收的线路信号中拆分出低速支路信号（即下电路）。

利用 ADM 还可以构成自愈环，提供有效的线路和通道保护。

2. SDH 传输网的保护措施

随着光纤传输容量的增大，传输网络的可靠性、可用性和对线路故障的应变能力至关重要。因此，在 SDH 传输网中采取了一系列保护机制，图 5.11 所示为链状网（或线状网）和环状网采用简单的主/备用方式（即 1+1）保护措施。

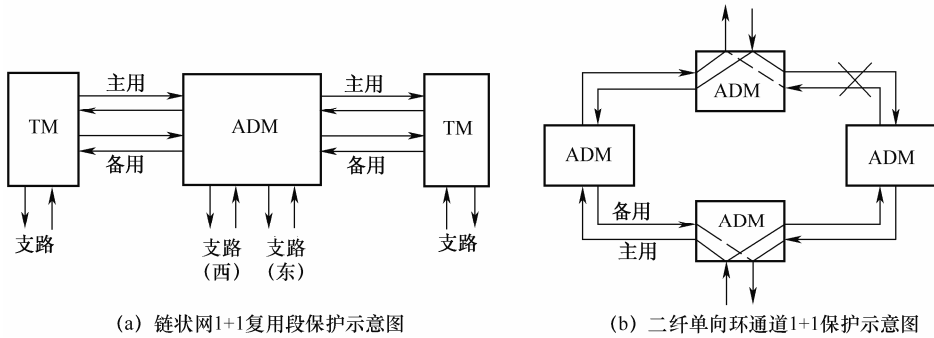


图 5.11 1+1 保护网络

首先是 SDH 网络拓扑的选择应综合考虑网络的生存性，作为一般性原则，星型和环型适用于用户网，线型和环型适用于中继网，树型和网孔型及其二者的结合适用于长途网。其次是倒换环的选择，通道倒换环的业务量保护是以通道为基础的，复用段倒换环的业务量是以复用段为基础的。前者根据离开环个别通道的信号质量优劣决定是否倒换，后者根据每一对节点间的复用段信号质量的优劣来决定是否倒换。

SDH 环网保护又分几种类型。二纤单向通道保护环：发端桥接，收端倒换，如图 5.16 (b) 所示。二纤单向复用段保护环：一纤工作，一纤保护，需要保护倒换协议的支持。二纤双向复用段保护环：每根纤的工作时隙和保护时隙各占一半，不支持区间保护倒换。四纤双向复用段保护环：两根工作纤，两根保护纤，支持区间保护倒换，不会损失环上的业务，但保护协议的操作复杂，不倾向采用。

SDH 环型网络已经广泛应用在电信网络包括长途骨干网、本地网和城域网在内的各个部分，传输速率从 155Mbit/s、622Mbit/s、2.5Gbit/s 到 10Gbit/s，并正向 40Gbit/s 乃至更高速率发展。特别是 SDH 环网技术和 WDM 技术的结合，已经成为基础传输平台的主要技术。

3. SDH 框架结构

我国已建成能覆盖全国省会和大部分地市的所谓的“八纵八横”的吉比特级的 SDH 光缆传输干线，并对 DXC 节点和 SDH 设备的设置做了原则性的规定（参见图 5.12）。

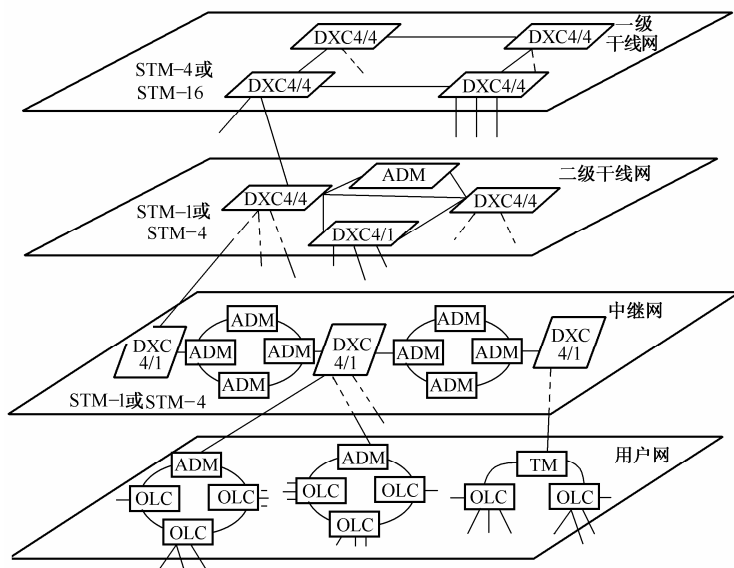


图 5.12 SDH 传输网的基本框架结构

5.2 WDM

在 WDM（Wavelength Division Multiplexing）平台上组网克服了再生段、复用段等距离因素的限制，组网灵活、接口丰富、应用方便。

5.2.1 WDM 结构

WDM 就是将多个波道的信号放到同一条光纤中进行传送，可根据波道间隔大小分为两类：波道间隔为 20nm，为稀疏波分，又称粗波分；波道间隔小于等于 0.8nm，为密集波分。

WDM 传输带宽和 SDH 相比，得到了成倍增加，现在的 WDM 不仅在城市主干道网使用（城域波分），还用在了跨市、省的骨干网上（长途波分）。

波分复用系统由光发射机、光接收机、光中继放大器、光监控信道和网络管理系统 5 部分组成，总体系统结构如图 5.13 所示。它的具体工作方式使各种类型的业务信号都按照预先分配的波道传输，中间还设置了光放站（OLA）、中继站，以及维护所需要的光监控（OSC）或电监控（ESC）。

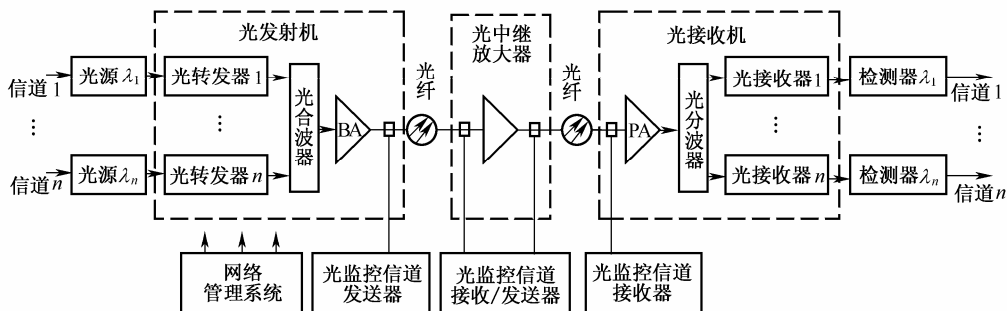


图 5.13 总体系统结构示意图

随着人们的需求和技术的进步，WDM 波道数也由刚开始的 16 或 32 个，扩充到 40、80、160 个，目前已经突破 200 个波道，但还是受到了管理水平的限制。

1. 光合波器和分波器

波分复用系统的核心部件是光合波器和分波器（也称光复用器和光解复用器），均为光学滤波器。光学滤波器的类型很多，按照其制造的方法可以分为 3 大类，即角色散器件、干涉滤波器和光纤耦合器。前两者属于轴向对准型；光纤耦合器属于横向对准型。其余类型往往是上述两种类型的结合。常用的器件有光栅型波分复用器、布拉格光栅滤波器、介质薄膜型波分复用器、集成光波导波分复用器等。

2. WDM 系统的监控

现在实用的 WDM 系统都是 WDM+EDFA，EDFA 用作功率放大器或前置放大器时，传输系统自身的监控信道就可对它们进行监控。但对于线路放大的 EDFA 的监控管理，就必须采用单独的光信道来传输监控管理信息，有带外波长监控技术和带内波长监控技术。

3. 光纤传输

为适应不同的光传输系统，人们开发了多种类型的光纤光缆，系统设计时要参考光缆的最大衰减系数和最小波长范围的对应关系。

在 DWDM 系统中，由于采用波分复用器件引入的插入损耗较大，减少了系统的可用光功率，需要使用光放大器来对光功率进行必要的补偿。由于光纤中传送光功率提高，光纤的非线性问题变得突出。另外，光纤的色散问题也是不可忽视的一个重要考虑因素。

下面介绍几种常见光纤。

G. 652 光纤：即常规光纤（SMF），如果使用色散调制技术（如 DCF 法），则可有效地抵消光纤的色散，实现超过千千米的长距离安全光传输。

G. 653 光纤：又称色散位移光纤（DSF），是最佳的应用于单波长远距离传输的光纤。

G. 655 光纤：又称非零色散位移光纤（NZDSF），它不太适合于 WDM 系统，而后来开发的 G. 653 光纤更适合于 WDM 系统的应用。

大有效面积光纤：是为了适应大容量、长距离的密集波分复用系统应用的一种新型的大有效面积光纤，可以减轻色散的线性和高功率的非线性影响，提高入纤功率，增加波分复用数，代表着光纤发展的方向。

4. 标称中心频率

为了保证不同 WDM 系统之间的横向兼容性，需要对各个通路的中心频率进行规范。所谓标准中心频率，指的是光波分复用系统中每个通路对应的中心波长。目前国际上规定的通路频率是基于参考频率为 193.1THz、最小间隔为 100GHz 的频率间隔系列。对于频率间隔系列的选择，应满足以下要求。

① 至少应提供 16 个波长，因为当单通路比特速率为 STM-16 时，一根光纤上的 16 个通路就可以提供 40Gbit/s 的业务。

② 波长的数量不能太多，因为对这些波长进行监控将是一个庞杂而又难以应付的问题。波长数的最大值可以从经济和技术角度予以限定。

③ 所有波长都应位于光放大器（OAF）增益曲线相对比较平坦的部分，使得 OAF 在整个波长范围内提供相对较均匀的增益，这将有助于系统设计。

④ 所有通路在这个范围内均应保持均匀间隔，而且应在频率而不是波长上保持均匀间隔，以便与现存的电磁频谱分配保持一致并允许使用按频率间隔规范的无源器件。

5.2.2 WDM 系统

1. 承载 SDH 用户层的 WDM 系统

承载 SDH 信号的 WDM 系统使用了光放大器，带光放大器的光缆系统在 SDH 再生段层以下又引入了光通道层、光复用段层和光传输段（光放大段）层，如图 5.14 所示。

光通道层：为各种业务信息提供光通道上端到端的透明传输。其主要功能有：为网络路由提供灵活的光通道层连接重排；具有确保通道层适配信息完整性的光通道开销处理能力；具有确保网络运营与管理功能得以实现的光通道层监测能力。

光复用段层：为多波长光信号提供联网功能，包括开销处理能力、光复用段监测功能等。

光传输段层：为光信号提供在各种类型的光纤（如 G. 652、G. 655 等）上传输的功能，包括对光传输段层中的光放大器、光纤色散等的监视与管理功能。

图 5.15 给出了承载 SDH 的长途 WDM 系统组成，分界点是逻辑功能的参考点，根据 WDM 线路系统中是否设置有掺饵光纤放大器（EDFA），可将 WDM 线路系统分成有线路放大器 WDM 系统和无线路放大器 WDM 系统。



图 5.14 WDM 系统的分层结构示意图

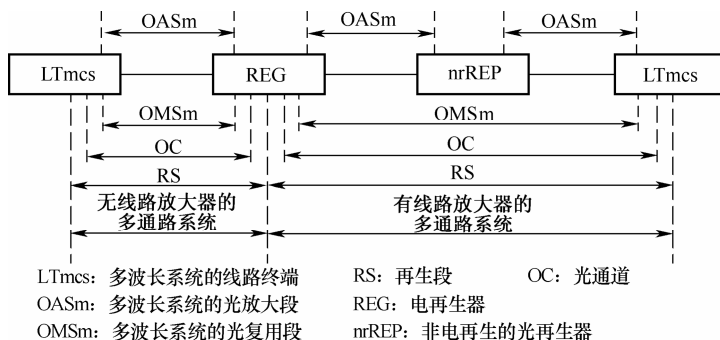


图 5.15 WDM 系统的功能组成

例如一个完整的 IP over WDM 系统，由光纤、激光器、EDFA、光耦合器、电再生中继器、转发器、光分插复用器、交叉连接器与交换机等器件和设备组成。非零色散偏移光纤（NZDSF）因其色度色散的非线性效应小，最适宜 WDM。高性能激光器是 WDM 系统中最贵的器件。EDFA 多数都是宽带的，能同时放大 WDM 的所有波长，因对平坦增益的要求很高，在经过 6 个光放大器之后就需要做一次电放大。光耦合器用来把各波长组合在一起和分解开来，起到复用和解复用的作用。在长途 WDM 系统中需要电再生中继器，再生分三级：R1、R2、R3。R1 再生是数据透明的，并对脉冲重新整形；R2 再生对脉冲重新整形，对时钟重新定位；R3 再生对数据分组重新形成格式。转发器用来变换来自路由器或其他设备的光信号，并产生要插入光耦合器的正确波长光信号。光分插复用器、光交叉连接设备在长途 WDM 系统中被广泛使用。光交换机可以使 ADM 和交叉连接设备做动态配置。WDM 的不足之处，主要表现在以下几个方面。

① OAM（操作维护管理）消息传递不畅：WDM 的初衷是为了解决带宽不够问题，但带宽提高后，管理要跟上是个难题，现在最大的问题就是信道多了，OSC（光监控信道）就感到有点力不从心，而 SDH 会对每条电路状态做到了如指掌。

② 调度不够灵活：WDM 在设计之初就有一个严重缺陷——比如一路信号要从郑州到西安，预先分配的是第 6 波道，中途是不能更改的，除非中间经过洛阳的光再生段，才可以有更换波道的机会，这种更换波道的代价是洛阳要布放专门光纤，而 SDH 会通过洛阳调度中心解决所有的问题。

③ 维护不完善，容易堵死：一旦发生某路段拥堵或事故，业务就容易出现中断，而 SDH 会通过迂回路由、灵活调度等手段得到有效解决。

ITU-T 根据问题所在，从以下几个方面进行改革：增加 OAM 开销；在交通枢纽节点增设调度，如波道间的光层调度和业务间的电层调度；依托调度枢纽，加上在道路上预留一部波道或电路，为所有业务提供完善的保护机制。

OTN（Optical Transport Network，光传输网）是在 WDM 基础上，融合了 SDH 的一些优点，如丰富的 OAM 开销、灵活的业务调度、完善的保护方式等。OTN 对业务的调度分为：光层调度和电层调度，光层调度可以理解为 WDM 的范畴；电层调度可以理解为 SDH 的范畴，所以简单来说：OTN=WDM+SDH。但 OTN 的电层调度工作方式与 SDH 还是有些区别的。

2. 两类 WDM 系统

WDM 系统可分为集成式 WDM 系统和开放式 WDM 系统两大类。

集成式 WDM 系统是指 SDH 中断必须具有满足 G. 692 的光接口，包括标准的光波长和满足长距离传输的光源。这两项指标都是当前 SDH 系统（G. 957 接口）不要求的，即需把标准的光波长和长色散受限距离的光源集成在 SDH 系统中。对于集成式 WDM 系统中的 TM、ADM 和 REG 设备，都应具有符合 WDM 系统要求的光接口（S_x），以满足传输系统的要求，整个系统构造没有增加多余设备，如图 5.16（a）所示。

开放式 WDM 系统是指发送端设备有光波长转发器（OTU），它的作用是在不改变光信号数据格式的情况下，把光波长按照一定的要求重新转换，以满足 WDM 系统的设计要求，如图 5.16（b）所示。

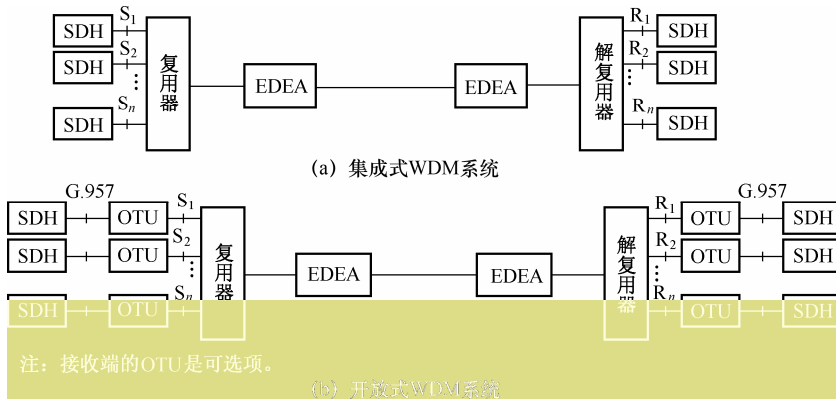


图 5.16 两类 WDM 系统示意图

OTU 对输入端的信号波长没有特殊要求，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。OTU 输出端满足 G. 692 的光接口，即标准的光波长和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。OTU 可看作是 WDM 系统的网元，通过 WDM 的网元管理系统进行配置和管理。

5.3 其他传输系统

5.3.1 数字微波

数字微波是用微波作为载波传送数字信号，需将基带数字信号对载波进行调制，实现数字信号的频带传输。为了充分利用线路资源，通常在微波通信中采用频分复用的方式，即利用载波的方法在发信端把基带信号搬到各个不同的载频上形成载波来传输，到了收信端再将基带信号从载波上卸下来。微波是波长为 1~1mm 或频率为 300MHz~300GHz 的电磁波。ITU 对每个频段的应用都有严格的规定，表 5.1 是整个无线电波频率的划分。

表 5.1 无线电波频率划分表

频段名称		频率范围	波长范围
长波		30~300kHz	1000~10 000m
中波		300~3000kHz	100~1000m
短波		3~30MHz	10~100m
超短波		30~3300MHz	1~10m
微波	分米波	300~3000MHz	1~10dm
	厘米波	3~30GHz	1~10cm
	毫米波	30~300GHz	1~10mm

由于微波频率高，波长短，这就使得微波器件和电路具有它固有的特性。在微波波段，电磁波的传播是直线视距的传播方式。要进行远距离通信，必须采用中继通信方式，即每隔 50km 左右设置一个中继站，将前站的信号接收下来，经过放大，再向下一站传输下去。

微波是一种波长很短的无线电波，具有类似光波的传输特性即直线传输，绕射能力弱，会产生折射和反射现象。一条长度为几百千米甚至几千千米的微波通信系统，一般是由距离为 50km 左右的许多微波站连接起来组成的。

数字微波系统方框图如图 5.17 所示，包括发信设备、收信设备、微波天线设备、数字调制设备、数字解调设备、微波跟踪和位同步恢复电路、均衡、切换、勤务、接口及其他辅助电路。个别部分在图上未显示出来，有的部分在前面已介绍，下面只做部分说明。

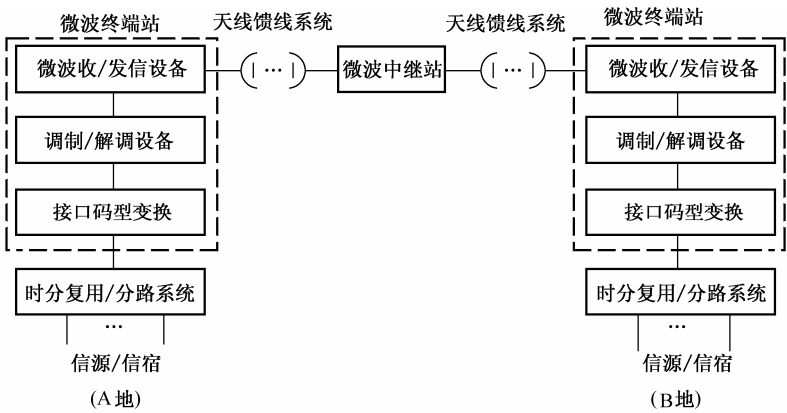


图 5.17 数字微波系统方框图

(1) 接口码型变换

非标准接口码型的处理：为了提高微波设备的频谱利用率，常采用高次谐波分量小的脉冲

波形作为基带数字码型，如 NRZ 码（不归零码）。例如，微波设备和时分复用/分路设备在同一机房时，可以使复用设备不进行码型变换，直接将不归零 PCM 信码脉冲及定时脉冲（占空比为 50%）送到微波系统。

对标准接口码型的处理：标准接口码型为 HDB3 或 CMI 码。因为调制器要求基本码型都是 NRZ 码，所以要将 HDB3 码或 CMI 码变为 NRZ 码。

(2) 微波调制/解调

数字信号的调制与解调是数字微波通信中的关键技术，数字微波的发送端通过调制把基带信号变成微波频带信号，接收端通过解调把频带信号逆变换为基带信号。根据最佳接收理论，采用相干解调方式可以获得最好的性能。相干解调是利用与已调信号载波有固定相位关系的相干载波进行解调的。常用的调制方法有四相移相键控（QPSK）、正交幅度调制（QAM），以及差分移相键控（DPSK）等。

(3) 微波站

微波站分为两大类，即终端站和中继站。终端站是可以分出和插入传输信号的站，因而站上配有多路复接及调制解调设备。中继站是既不分出也不插入传输信号，只起信号放大和转发作用的站。按转接方式的不同，又可分为中频转接站（不需配调制解调器）和再生中继转接站（需配调制解调器）两种。

5.3.2 卫星通信

卫星通信是利用地球卫星作为中继站转发微波信号，在两个或多个地球站之间进行通信。卫星轨道在赤道平面内，它的运行方向与地球自转方向相同，绕地球一周的时间与地球自转周期相等，所以相对于地球处于静止状态，以静止卫星作为中继站构成的通信系统称为（静止）卫星通信系统。

卫星通信系统如图 5.18 所示，通常是由通信卫星、地球站、跟踪遥测指令系统及监控管理系统 4 大部分组成。作为一条卫星通信线路，由发端地球站、上行传播路径、通信卫星转发器、下行传播路径和收端地球站组成。

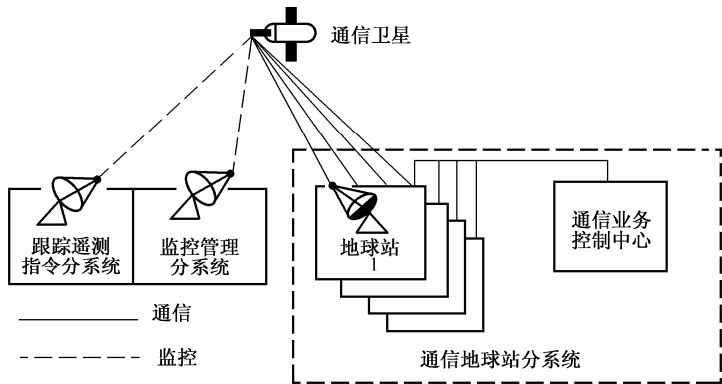


图 5.18 卫星通信系统

1. 系统的分类

① 天线分系统：卫星天线有两类。一类是遥测、遥控和信标天线，一般采用全向天线，以便可靠地接收地面指令和向地面发射遥测数据与信标，卫星接收到的信标信号送入姿态控制设备，以使卫星天线精确地指向地球上的覆盖区；另一类是通信天线，按天线发射电磁波波束覆

盖区的大小，可分为全球波束天线、点波束天线和区域波束天线。

② 通信分系统：卫星上的通信分系统又称转发器，起通信中继器的作用。它实际上是一部宽频带收发信机，对它的基本要求是以最小的附加噪声和失真、足够的功率，安全可靠地为地球站转发无线电信号。

③ 遥测与指令系统：其功能是了解卫星内设备的工作情况；对卫星的工作、位置和姿态进行控制。

④ 控制分系统：共有两种控制：一是姿态控制，二是位置控制。姿态控制主要是保证天线波束始终对准地球及使太阳能电池帆板对准太阳。位置控制可以消除天体引力产生的摄动的影响，使卫星与地球的相对位置保持固定。

⑤ 电源分系统：常用的电源有太阳能电池和化学能电池，主要使用太阳能电池。当卫星进入地球的阴影区时，称为星蚀，此时太阳能电池不能工作，须使用化学能电池。

2. 地球站设备

地球站是卫星通信系统的主要组成部分，所有的用户终端将通过它们接入卫星通信线路。典型的地球站一般包括天馈设备、收/发信机、终端设备、天线跟踪设备以及电源设备等，如图 5.19 所示。

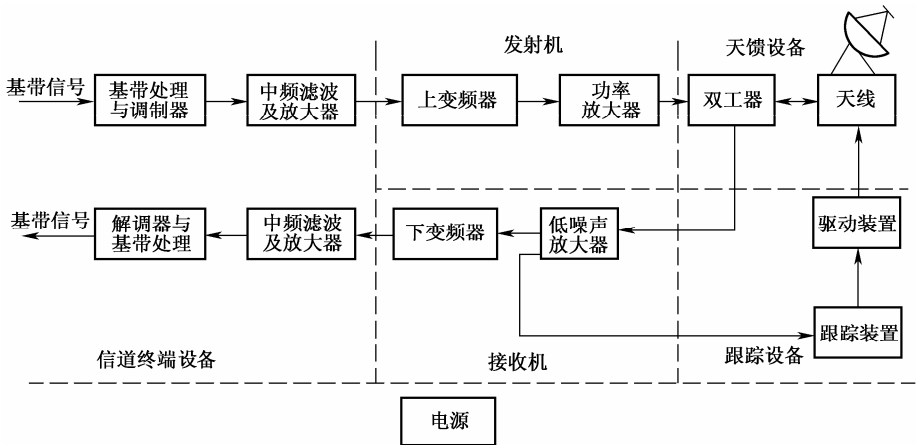


图 5.19 典型的地球站示意图

① 天馈设备。主要作用是将发射机送来的射频信号经天线向卫星方向辐射，同时它又接收卫星转发的信号并送往接收机。通常由于收、发信机共用一幅天线，为了使收、发信号隔离，还需要接入一只双工器。

② 发射机。主要作用是将已调制的中频信号经上变频器变换为射频信号，并放大到一定电平，经馈线送至天线向卫星发射。

③ 接收机。主要作用是接收来自卫星的有用信号，经下变频器变换为中频信号，送至解调器。由于接收到的信号极其微弱，接收机必须使用噪声温度很低的放大器。

④ 信道终端设备。主要作用是将用户终端送来的信息加以处理，形成基带信号；对中频进行调制；同时对接收的中频已调信号进行解调以及进行与发端相反的处理，输出基带信号送往用户终端。

⑤ 跟踪设备。主要用来校正地球站天线的方位和仰角，以便使天线对准卫星。

3. 工作频段

卫星通信工作频段要考虑到以下因素：电波传播衰减；电离层里的自由电子和离子的吸收；

对流层中的氧、水汽和雨、雪、雾的吸收，散射和衰减；足够的可用带宽，以满足信息传输的要求；与地面微波通信、雷达等其他无线系统间的相互干扰要小。因此，卫星通信工作频段选在特高频或微波频段。目前，大多数卫星选择频段如下：

UHF 波段	400/200GHz
L 波段	1.6/1.5GHz
C 波段	6/4GHz
X 波段	8/7GHz
Ku 波段	14/11GHz, 14/12GHz
Ka 波段	30/20GHz

5.3.3 ASON

光网络从 PDH 到 SDH，又从 SDH 到 DWDM，最终实现从 DWDM 向全光网络的过渡。这样，一方面为通信网络提供了巨大的传输带宽，另一方面又极大地增加了网络节点的吞吐容量，使传输网得到了迅速发展和广泛应用。自动交换光网络（ASON，Automatically Switched Optical Network）是指在 ASON 信令网控制之下，完成光传输网内光网络自动交换功能的新型网络。ASON 支持以下 3 种连接类型。

① 交换连接（SC）：交换连接的创立过程由控制平面独立完成，先由源端用户发起呼叫请求，通过控制平面内信令实体间的信令交互建立连接，是一种全新的动态连接类型。

② 永久连接（PC）：是在没有控制平面参与的前提下，由管理平面指配的连接类型，沿袭了传统光网络的连接建立形式，管理平面根据连接要求以及网络资源利用情况预先计算确定连接路径，然后沿着连接路径通过网络管理接口（NMI-T）向网元发送交叉连接命令，进行统一指配，完成 PC 的创建、调整、释放等操作过程。

③ 软永久连接（SPC）：由管理平面和控制平面共同完成，是一种分段的混合连接方式。软永久连接中用户到网络的部分由管理平面直接配置，而网络到网络部分的连接由控制平面完成。

通过这 3 种连接类型，可以支持 ASON 与现存光网络的“无缝”连接，也有利于现有传输网络向 ASON 的过渡和演变。目前关于对 ASON 组网方案较多，以下简单介绍几种。

（1）ASON+DWDM 组网

由于 ASON 节点有足够的带宽容量和灵活的调度能力，DWDM 系统有大容量的传输能力，这样 ASON+DWDM（密集波分复用）就完全可以组成一个功能强大的网络。如用在骨干网中，ASON 节点不仅可以完成 SDH 设备具有的全部功能，还能提供更大的节点宽带容量、灵活和快捷的调度能力，并能缓解网络节点瓶颈问题。这种组网方式建网快、成本低，运营费用也低。

（2）ASON+SDH 混合组网

按照地理位置和运营商的策略等，ASON 可以分成不同的路由域（RA，Routing Area），ASON 和传统的 SDH 混合组网。因为 ASON 可以通过基于 G. 803 规范的 SDH 传输网实现，也可以通过基于 G. 872 的光传输网实现，所以 ASON 可以与现有的网络组成混合网。组网过程中，先将所有的 SDH 网络形成一个个 ASON 小岛，然后逐步形成整个的 ASON。

（3）ASON+MPLS/IP 混合组网

ASON 的混合组网如图 5.20 所示，其中，MPLS 表示多协议标记交换。ASON 的主要目标为提高网络的智能化水平，提升网络的灵活调度能力，增强网络的安全可靠性，降低维护管理运营费用，尽量避免传输资源闲置，提供不同服务质量级别的区分业务，便于引入新的业务类型，促进传统传输网向业务网方向的演进。

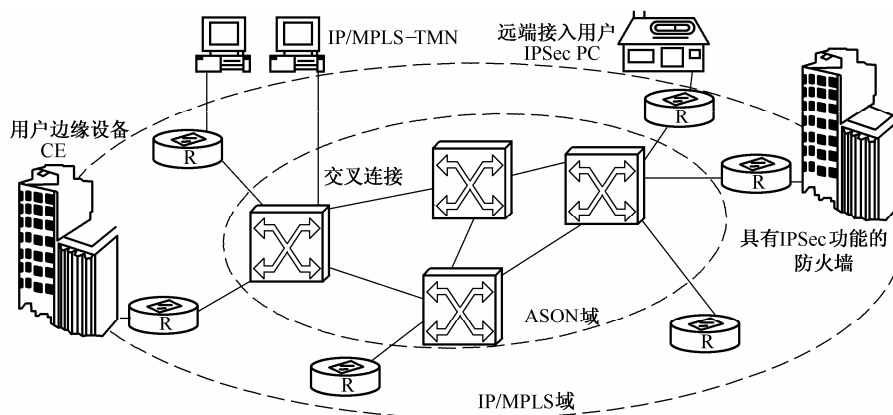


图 5.20 ASON 的混合组网

习 题 5

1. 传输系统的 PDH 系列和 SDH 系列有何特点和不同？
2. 简述 SDH 复用结构。SDH 通常由哪些网络单元组成？并说明各个网络单元的功能。
3. 何为再生段？何为复用段？
4. 用 TM、SDXC、ADM 组成一个环型传输网。
5. 何为 WDM、微波通信、卫星通信？