

第6章 带宽利用率：多路复用和扩频

实际生活中，链路都是有限带宽，合理运用带宽将是电子通信亟待解决的主要问题。然而，所谓合理是与应用有关。有时我们需要将一些低带宽信道组合在一起形成一条高带宽信道，有时为达到某种目的又需要扩展信道带宽，如保密、抗干扰等。本章将讨论带宽合理使用的两大类型：多路复用与扩频。在复用中，目标是效率，将一些信道合并为一个信道；在扩频中，目标是保密、抗干扰；扩展信道以插入冗余，这是为实现这些目标所必需的。

本章分为两个部分：

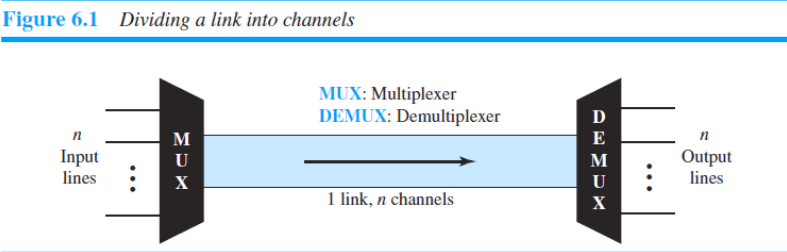
□第1节讨论复用。这节描述的第一种方法称为**频分复用**(*frequency-division multiplexing, FDM*)，这意味着将几个模拟信号组合成一个。第二种方法是**波分复用**(*wavelength-division multiplexing, WDM*)，这意味着将几个光信号组合成一个。第二种方法是**时分复用**(*time-division multiplexing, TDM*)，这意味着将几个数字信号同时共享一个信道。

□第2节讨论扩频，合成不同信道之前，出于更加安全传输目的，首先扩展信号带宽以增加冗余。这节描述的第一种方法称为**跳频扩频**(*frequency hopping spread spectrum, FHSS*)，不同时间段使用不同调制频率。第二种方法称为**直接序列扩频**(*direct sequence spread spectrum, DSSS*)，原始信号中的一位在传输前被转换成一个序列。

6.1 复用

只要连接两台设备的介质带宽比设备间传输所要求的带宽高时，该链路就可以被共享。**复用（multiplexing）**就是允许同时通过一条数据链路传输多个信号的一组技术。随着数据和电信应用的增加，通信量也不断增加。当然可以通过每需要一条新的信道就建立一条单独链路的方式来满足这种增长，也可以安装更高带宽的链路，并在这些链路上采用复用技术。如第 7 章所述，目前的技术包括诸如光纤、地面微波和卫星微波等高带宽介质。每一种介质都具有远超过平均传输需求的承载能力。如果一条链路的带宽比连接在它的上面的设备所需的带宽要大，那么多余的带宽就被浪费。一个高效的系统是可以最大限度地使用所有设备的资源，而带宽是在数据通信中最为昂贵的资源之一。

在复用的系统中， n 条线路共享一条链路的带宽。图 6-1 说明了复用系统的基本形式。左侧的 4 条线路将它们的传输流量送到**复用器（multiplexer, MUX）**，复用器将这些流量组成一个单独的传输流（多对一）。在接收端，这个传输流量被**分离器（demultiplexer, DEMUX）**接收，并分解成原来几个独立的传输流（一对多），并直接发送到对应的线路上。图 6-1 中的**链路（link）**一词是指的是物理通路。**信道（channel）**一词是指在给定一对设备之间传送传输信号的链路那部分。一条链路可能有多个（ n ）信道。

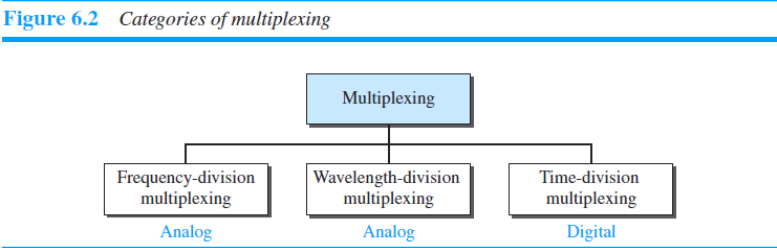


原书 156 页 图中的英文词对照标记

multiplexing	复用
n input lines	n 输入线
n output lines	n 输出线
multiplexer	复用器
demultiplexer	多路分用器
1 link, n channel	1 个链路 n 个信道

图 6-1 链路划分为信道

有三种基本复用技术：频分复用（frequency-division multiplexing, FDM），波分复用（wave-division multiplexing, WDM）和时分复用（time-division multiplexing, TDM）。前两种技术用于模拟信号，第三种技术用于数字信号（见图 6-2）。



原书 156 页 图中的英文词对照标记

multiplexing 复用
frequency-division multiplexing 频分复用
wave-division multiplexing 波分复用
time-division multiplexing 时分复用

图 6-2 复用类型

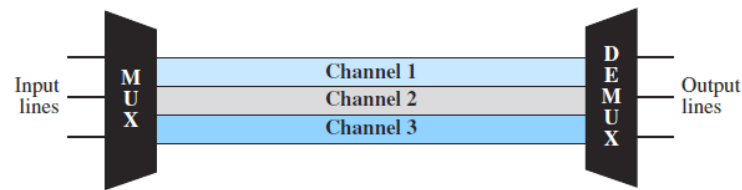
虽然有些教科书将码分复用接入（CDMA）看作是第四种技术，但我们还是把它作为接入方法讨论（见第 12 章）。

6.1.1 频分复用

频分复用（Frequency-division multiplexing, FDM）是一种模拟技术，在链路带宽（以 Hz 为单位）大于要传输的信号的带宽之和时采用。在 FDM 中，每个发送设备生成的信号用于调制不同的载波频率。调制后的信号再被合并为一个可以通过链路传输的复合信号。载波频率之间的频率差必须能够容纳调制信号的带宽。这些带宽的范围就是不同信号通过的信道。信道之间由狭长的未使用的带宽，即**防护频带（guard band）**进行分隔，以防止信号重叠。另外，载波频率必须不会影响原始的数据频率。不符合以上任一条件就会导致原始信号的不可恢复。

图 6-3 给出了 FDM 的概念描述。图中传输通路分为三部分，每一部分都是传输某一个流量的信道。

Figure 6.3 Frequency-division multiplexing



原书 157 页 图中的英文词对照标记

Input lines 输入线路

Channel 信道

Output lines 输出线路

图 6-3 频分复用

我们认为 FDM 是模拟复用技术，但这不是说 FDM 不能把源端的发送数字信号组合在一起。在 FDM 使用复用之前，数字信号可以转换成模拟信号（有关技术在第 5 章中已讨论）。

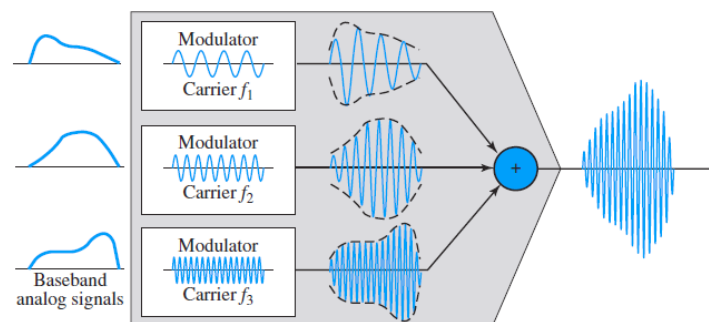
FDM is an analog multiplexing technique that combines analog signals.

FDM 是用来组合模拟信号的模拟多路复用技术。

复用过程

图 6-4 是多路复用过程的示意图。FDM 是一个模拟过程。每一个源端产生频率范围类似的信号。在复用器中，这些类似信号被调制到不同的载波频率上 (f_1 、 f_2 和 f_3)。然后，将调制后的信号合成为一个复合信号，并通过具有足够带宽的介质链路发送出去。

Figure 6.4 FDM process



原书 158 页 图中的英文词对照标记

Baseband analog signal 基带模拟信号

Modulator 调制器

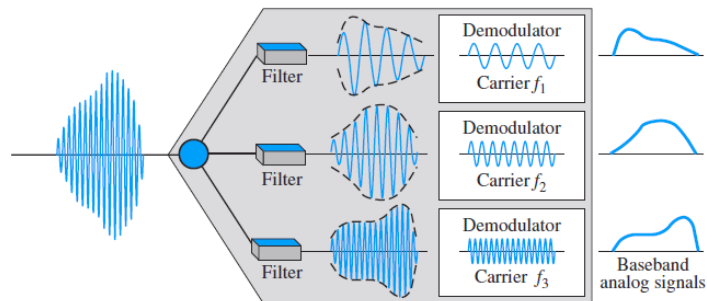
Carrier 载波

图 6-4 FDM 过程

多路分解过程

分离器使用一系列滤波器来将复用信号分解为组成它的各个信号。每个信号随后被传送到解调器，解调器将它们与载波分离并转发给等待的接收端。图 6-5 是 FDM 多路分解过程的示意图。

Figure 6.5 FDM demultiplexing example



原书 158 页 图中的英文词对照标记

Filter 滤波器

Demodulator 解调器

Carrier 载波

Baseband analog signals 基带模拟信号

图 6-5 FDM 多路分解示例

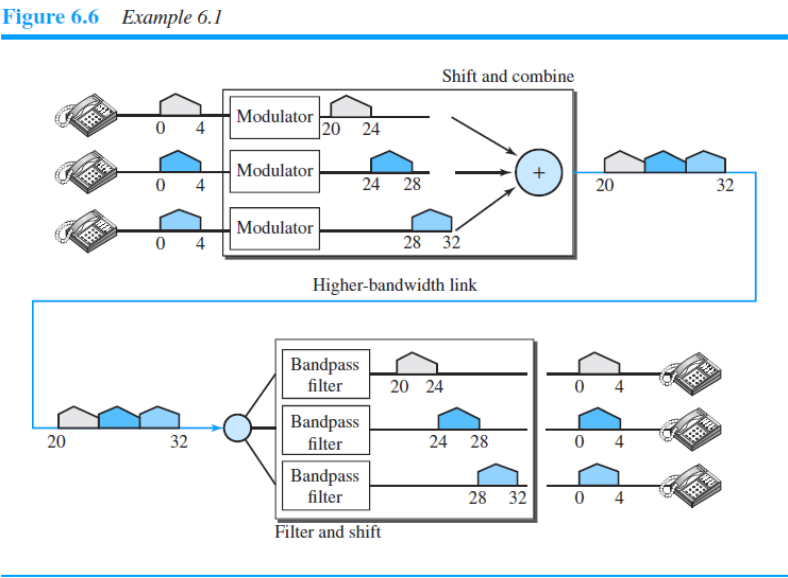
例 6-1

假定一个语音信道占用的带宽是 4kHz。要将三个语音信道合并到一条带宽为 12 kHz（20~32 kHz）的链路。使用频域图表示这一配置过程，这里假定不使用防护频带。

解答

将三个语音信道平移（调制）到不同的带宽，如图 6-6 所示。第一个信道使用 20~24kHz 的带宽，第二个信道使用 24~28kHz 的带宽，第三个信道使用 28~32kHz 的带宽。然后，如图 6-6 所示将它们合并。在接收端，每个信道接收到完整信号后，使用滤波器将自己的信

号分离出来。第一个信道使用能够通过 20~24kHz 频率成分的滤波器，并丢弃任何其他频率成分。第二个信道使用能够通过 24~28kHz 频率成分的滤波器，而第三个信道使用能够通过 28kHz~32kHz 频率成分的滤波器。最后，每一个信道将频率平移到从 0 开始的起点。



原书 159 页 图中的英文词对照标记

Modulator 调制器

Shift and combine 转移和合并

Higher-bandwidth link 高带宽链路

Bandpass filter 带通滤波器

Filter and shift 过滤和转移

图 6-6 例 6-1

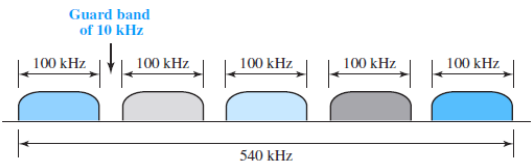
例 6-2

有 5 个信道，每个信道的带宽是 100 kHz，全部进行多路复用。如果信道之间需要 10kHz 的防护频带以防止干扰，则链路的最小带宽是多少？

解答

对于 5 个信道，至少需要 4 个防护频带。这意味着至少需要带宽 $5 \times 100 + 4 \times 10 = 540\text{kHz}$ ，如图 6-7 所示。

Figure 6.7 Example 6.2



原书 160 页 图中的英文词对照标记

Digital 数字

Analog 模拟

图 6-7 例 6-2

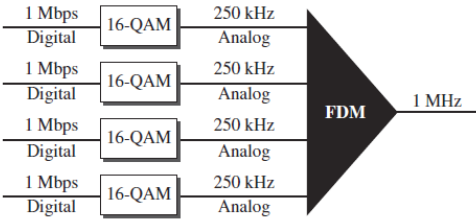
例 6-3

有 4 个数据信道（数字的），每一个信道的传输速率是 1Mbps，使用 1MHz 的卫星信道。使用 FDM 设计一种合理的配置。

解答

卫星信道是模拟的。将其划分为 4 个信道，每个信道的带宽是 250kHz。对每个 1Mbps 的数字信道进行调制，每 4 位调制为 1Hz。一种解决方案是 16-QAM 调制。图 6-8 描述了一种可能的配置方案。

Figure 6.8 Example 6.3



原书 160 页 图中的英文词对照标记

图 6-8 例 6-3

模拟载波系统

电话公司为了最大限度地提高基础设施的效率，传统方式是来自低带宽线路的信号复用 到更高带宽的线路上。通过这种方式，许多交换和专用线路可以合并为更少但是容量更大的信道。对于模拟线路来说，使用的是 FDM 技术。

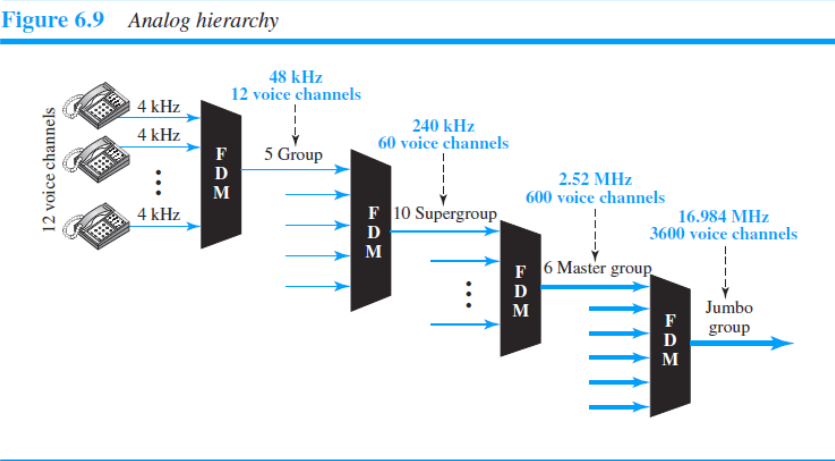
其中一种 AT&T 采用层次结构的系统是由群、超群、主群和巨群组成（见图 6-9）。

在这个**模拟层次结构**（**analog hierarchy**）中，12 个语音信道复用到一个更高带宽的线路上构成一个**群**（**group**）。一个群的带宽为 48kHz，并支持 12 个语音信道。

在下一层，最多可以复用 5 个群产生一个称为**超群**（**supergroup**）的复合信号。一个超群的带宽是 240kHz，而且支持多达 60 个语音信道。超群可以由 5 个群构成或者由 60 个独立的语音信道构成。

在下一层，10 个超群复用为一个**主群**（**master group**）。一个主群必须有 2.40MHz 的带宽，但是由于超群之间需要防护频带，使得总带宽上升到 2.52MHz。主群最多支持 600 个语音信道。

最后，6 个主群组合成一个**巨群**（**jumbo group**）。巨群必须有 15.12MHz（ $6 \times 2.52\text{MHz}$ ）的带宽，但是为了容纳主群之间防护频带而调整为 16.984MHz。



原书 161 页 图中的英文词对照标记

voice channels 语音信道

5 Group

Supergroup 超群

Master group 主群

Jumbo group 特大群

图 6-9 模拟层次结构

FDM 的其他应用

FDM 的一个最常见的应用是 AM 或者 FM 广播。无线电使用空气作为传输介质。将一个特定波段（530~1700kHz）分配给了 AM 无线电广播，所有的无线电台需要共享这一波段。如第 5 章讨论的那样，每个 AM 电台都需要 10kHz 带宽，每个电台使用不同的载波频

率，这意味着它要平移它的信号并进行复用。空气中传播的信号是所有信号的组合。接收机会接收到所有这些信号，但是能够滤波（通过微调）想要接收的信号。如果没有复用，那么就只会会有一个 AM 电台可以向公共链路即空气中广播信号。然而，我们需要知道这里有物理的复用器或分离器，在第 12 章将会看到复用是在数据链路层完成的。

这种情况与 FM 广播类似。但是 FM 使用的带宽更高，为 88~108MHz，这是因为每个电台需要更高的带宽，即 200kHz。

FDM 的另一个常见应用是电视广播，每一个电视频道的带宽是 6MHz。

第一代移动电话（仍然在运行）也使用 FDM。为每一用户分配两个 30kHz 的信道，一个用于发送语音而另一个用于接收。语音信号的带宽是 3kHz（300~3300Hz），使用调频进行调制。要记住：FM 信号的带宽是调制信号的 10 倍，因此每个信道有 30kHz（ 10×3 ）的带宽。这样，每一个用户在呼叫时，由基站提供某个可用范围内的带宽是 60kHz。

例 6-4

高级移动电话系统（AMPS）使用两个波段。第一个波段是（824~849MHz），用于发送，而 869~894MHz 用于接收。每一个用户在每个方向上都有 30kHz 的带宽。3kHz 语音使用 FM 调制，生成 30kHz 的调制信号。试问可以有多少人同时使用移动电话？

解答

每一个波段是 25MHz。如果将 25MHz 按 30kHz 划分，可以得到 833.33 个。实际上，波段划分为 832 个信道。在这些信道中，42 个信道用于控制，意味着只有 790 个信道可用于移动电话用户。第 16 章会更详细地讨论 AMPS。

实现

FDM 的实现非常容易。和无线电或电视广播一样，在多数情况下不需要物理的复用器和分离器。只要所有电台使用不同的载波频率向空气中广播，就可以实现多路复用。其他情况下，例如移动电话系统，基站需要为用户分配载波频率。在一个信元内，由于没有足够的可用带宽，所以不能为每一个电话用户分配永久的带宽。当某个用户挂断时，带宽就会分配给其他的呼叫者。

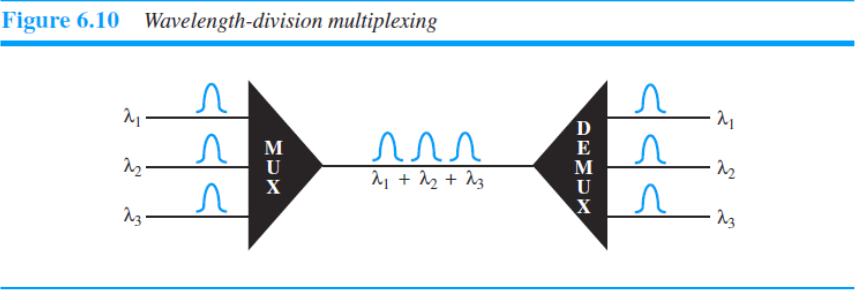
6.1.2 波分复用

波分复用（Wavelength-division multiplexing, WDM）用于具有高数据速率传输能力的

光缆。光缆的数据速率比金属传输介质的数据速率高。将光缆用作单一线路浪费了可用带宽。复用允许将多条线路连接为一条线路。

除了复用和多路分离包括通过光纤信道传输的光信号以外，波分复用概念上与 FDM 相同。其原理是一样的，都是将不同频率的不同信号合并。但其差别是这些频率非常高。

图 6-10 给出了波分复用的复用器和信号分离器的示意图。来自不同源端的窄波段的光合并生成一种波段更宽的光。在接收器端，信号通过信号分离器进行分离。



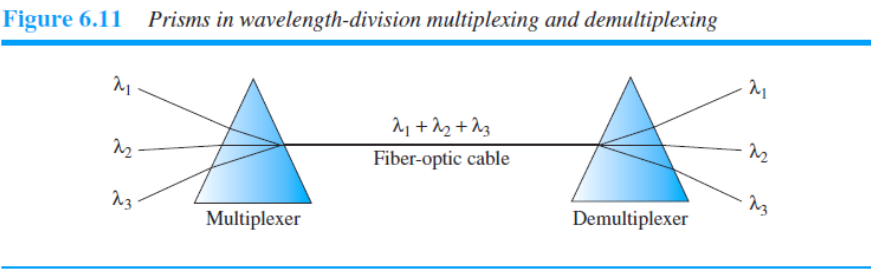
原书 162 页 图中的英文词对照标记

图 6-10 波分复用

WDM is an analog multiplexing technique to combine optical signals.

WDM 是合并多个光信号的模拟多路复用技术。

尽管 WDM 这种技术非常复杂，但其想法是非常简单的。在复用器上将多个光源组成单一光信号，而在分离器上做相反的处理。光源组合与分离由棱镜完成。普通物理知识告诉我们，棱镜可以根据入射角和频率将几束光合成一道光。利用这项技术，复用器可组合几束输入光（每束光包含窄带频率）为一束输出光（宽带频率）。分离器做相反的过程。其概念如图 6-11 所示。



原书 163 页 图中的英文词对照标记

Multiplexer 复用器

Demultiplexer 分离器

Fiber-optic cable 光纤电缆

图 6-11 波分复用和多路分解中的棱镜

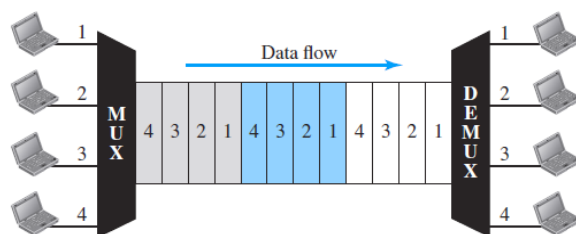
WDM 的一种应用是同步光纤网络 (SONET)，其中多条光纤线路进行复用和信号分离。
第 14 章会讨论 SONET。

有一种新方法，称为密集波分复用 (dense WDM, DWDM)，这种方法通过使相邻信道之间的频率更接近的方法来复用大量的信道，从而获得非常高的效率。

6.1.3 时分复用

时分复用 (time-division multiplexing, TDM) 是一个数字化过程，它允许多个连接共享一条高带宽链路，与 FDM 共享一部分带宽不同的是，TDM 是在时间上共享，每个连接占用链路的一个时间段。图 6-12 给出了 TDM 的示意图。注意：同一条链路都用于 FDM，但是这里表示的链路分割是时间上而不是频率上的。在时分复用图中，信号 1、2、3 和 4 依次占用链路。

Figure 6.12 TDM



原书 163 页 图中的英文词对照标记

Data flow 数据流

图 6-12 TDM

注意：图 6-12 只涉及复用而不是交换，这就是说来自源 1 的报文中的所有数据总有一个特定的目的地，它可能是 1、2、3 或 4。传送到固定目的地是不变的，这与交换是不同的。

从理论上讲，TDM 是数字复用技术。它将不同源端的数字数据合并到一个时间共享的链路上。然而，这并不是说源端不能生成模拟数据，模拟数据可以被采样改变成数字数据，然后用 TDM 进行复用。

TDM is a digital multiplexing technique for combining several low-rate channels into one high-rate one.

TDM 是组合多个低速的信道为一个高速信道数据的复用技术。

我们可将 TDM 划分成两种方案:同步的与统计的。首先讨论同步的时分复用 (synchronous TDM), 然后说明它与统计的时分复用 (statistical TDM) 有那些不同。

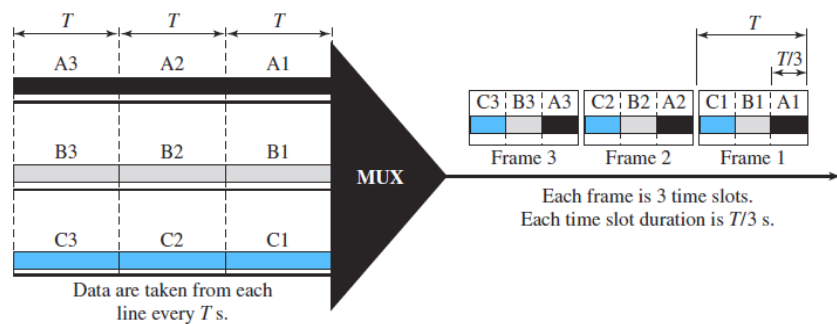
同步 TDM

在同步的 TDM 中, 即使没有发送数据, 每个输入连接也在输出端分配一个时隙。

时隙和帧

在同步 TDM 中, 每个输入连接的数据流被划分为多个单元, 其中每个输入占用一个输入时隙。一个单元可以是一位, 一个字符或一个数据块。每个输入单元成为一个输出单元, 占用一个输出时隙。然而, 每个输出单元的持续时间是输入单元持续时间的 n 分之一。如果输入时隙是 T 秒, 则输出时隙是 T/n 秒, 其中 n 是连接数。换言之, 输出连接单元具有较短的持续时隙, 输出速率更快。图 6-13 显示了同步 TDM 一个实例, 其中 n 为 3。

Figure 6.13 Synchronous time-division multiplexing



原书 164 页 图中的英文词对照标记

Data are taken from each line every T s. 每 T 秒从各个线路上取数据

Each frame is 3 time slots. 每个帧是 3 个时隙

Each time slot duration is $T/3$ s. 每个时隙持续时间为 $T/3$ 秒

Frame 帧

图 6-13 同步时分复用

在同步 TDM 中,每个输入连接的全部数据单元组成一个帧(不久我们将会看到其理由)。如果有 n 条连接线,则一帧划分成 n 个时隙,一个时隙分配给每个单元。如果输入单元持续 T 秒,则每个时隙持续时间是 T/n ,而每个帧持续时间是 T (除非帧携带其他信息,这不久我们将会看到)。

输出的链路的数据速率必须是单个连接的数据速率的 n 倍,以确保数据流动。在图 6-13 中,链路数据速率是一条连接的数据速率的 3 倍。同样,一条连接中的一个单元的持续时间是时隙(链路中一个单元的持续时间)的 3 倍。图中,将复用之前的数据表示为复用后数据大小的 3 倍。这只是表达一种思想,即每个单元在复用之前的持续时间是复用后的 3 倍。

**In synchronous TDM, the data rate of the link is n times faster,
and the unit duration is n times shorter.**

在同步 TDM 中,链路速率是数据速率的 n 倍,并且比单元持续时间短 n 倍。

时隙分组为多个帧。帧由多个时隙组成的一个完整的循环构成,每个时隙专用于每一个发送设备。在具有 n 条输入线路的系统中,每个帧有 n 个时隙,分配每个时隙用于传送来自特定输入线路的数据。

例 6-5

在图 6-13 中,每个输入连接的数据速率是 1kbps,复用单元为 1 位。试确定下面的时间:

1. 每个输入单元的时隙;
2. 每个输出单元的时隙;
3. 每个帧的时隙。

解答

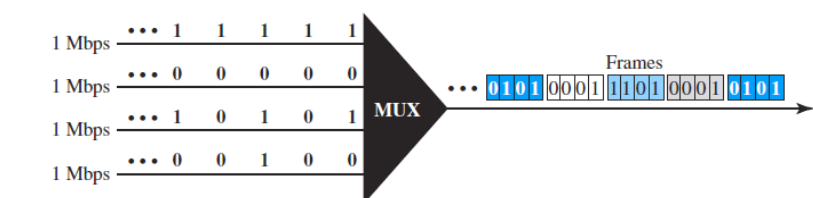
这些问题回答如下:

1. 每个输入连接的数据速率是 1kbps,这就是说位持续时间是 $1/1\ 000$ 秒,即 1ms。
输入时隙的持续时间是 1ms (与位持续时间相同);
2. 每个输出时隙的持续时间是输入时隙的三分之一,这说明输出时隙的持续时间是 1/3ms。
3. 每个帧具有三个输出时隙,因此一个帧持续时间是 $3 \times 1/3\text{ms}$,即 1ms。一个帧的持续时间与一个输入单元的持续时间相同。

例 6-6

图 6-14 表示了 4 个输入数据流和 1 个输出数据流的同步 TDM，数据单元是一位。试求
(1) 输入位的持续时间；(2) 输出位的持续时间；(3) 输出比特率；(4) 输出帧的速率。

Figure 6.14 Example 6.6



原书 165 页 图中的英文词对照标记

Frames 帧

图 6-14 例 6-6

解答

这些问题回答如下：

1. 输入位的持续时间是速率的倒数： $1/1\text{Mbps}=1\text{ }\mu\text{s}$ ；
2. 输出位持续时间是输入位持续时间的四分之一，即 $1/4\text{ }\mu\text{s}$ ；
3. 输出比特率是输出位持续时间的倒数， $1/4\text{ }\mu\text{s}$ ，即 4Mbps 。这也可从输出速率比输入速率快 4 倍这一事实推出，即输出速率= $4\times 1\text{Mbps}=4\text{Mbps}$ ；
4. 帧速率常与任一输入速率相同，因此帧速率是每秒 1000000 帧。因为我们发送每帧 4 位，所以我们可用复用证明前一结论，用每帧位的个数证明帧速率。

例 6-7

将 4 个 1kbps 的连接一起复用，每个单位为 1 位，试求：(1) 复用前一位持续的时间；
(2) 链路传输速率；(3) 时隙持续时间；(4) 一帧持续时间。

解答

1. 复用前一位持续时间是 $1/1\text{kbps}$ ，即 0.001s (1ms)；
2. 链路速率是连接速率的 4 倍，即 4kbps ；
3. 每个时隙持续时间是复用前每位持续时间的四分之一，即 $1/4\text{ms}$ 或 $250\text{ }\mu\text{s}$ 。注意：我们也可以从链路数据速率 4kbps 来计算。位持续时间是数据速率的倒数， $1/4\text{kbps}$ ，

即 $250\ \mu\text{s}$;

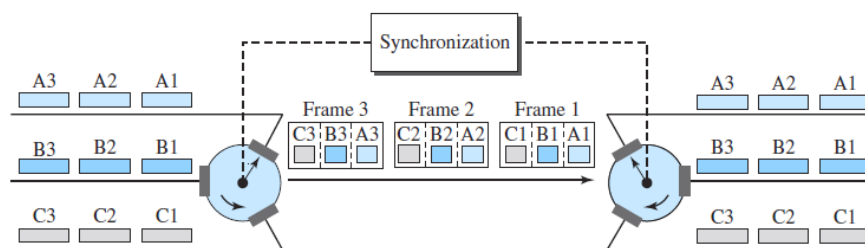
4. 帧持续时间总是与复用前一个单元持续时间相同, 即 1ms 。我们也可以从另一个方法计算, 此时每帧有 4 个时隙, 所以一个帧持续时间是 $250\ \mu\text{s}$ 的 4 倍, 即 1ms 。

交织

TDM 可以看作是两个快速旋转的开关, 一个位于复用一侧, 另一个位于信号分离一侧。两个开关是同步的, 以相同的速度旋转, 但是方向相反。在复用一侧, 当开关在一个连接前打开时, 连接即有机会向通路上发送一个单元。这个过程称为**交织 (interleaving)**。在信号分离一侧, 当开关在某个连接前打开时, 连接即有机会从通路中接收一个单元。

图 6-15 画出了图 6-13 所示连接的交替过程。图中暂时不考虑切换, 假定来自复用器一端的第一个连接的数据传输到信号分离器一端的第一个连接中。我们将第 8 章讨论交换。

Figure 6.15 Interleaving



原书 167 页 图中的英文词对照标记

Synchronization 同步

frame 帧

图 6-15 交织

例 6-8

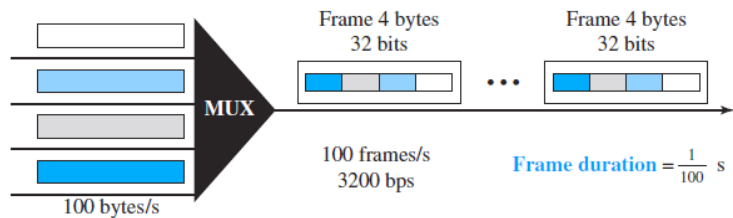
4 个信道使用 TDM 实现复用。如果每个信道的发送速度是 100 字节/秒, 每个信道复用 1 字节, 试画出链路中帧的传输情况, 说明帧的大小、帧的持续时间、帧传输速率以及链路的比特率。

解答

复用器如图 6-16 所示。每帧从每个信道中传送 1 字节。所以每个帧的大小是 4 字节, 即 32 位。因为每个信道发送速率是 100 字节/秒, 一帧从每个信道中运送一个字节, 帧传输速率必须是每秒 100 帧。所以, 每帧的持续时间是 $1/100$ 秒。链路每秒钟运送 100 帧, 每帧

包含 32 位，所以比特率是 100×32 ，即 3200bps。这实际上是每个信道的比特率（每个信道的比特率是 $100 \times 8 = 800 \text{ bps}$ ）的 4 倍。

Figure 6.16 Example 6.8



原书 167 页 图中的英文词对照标记

Frame duration 帧持续时间

frames/s 帧/秒

图 6-16 例 6-8

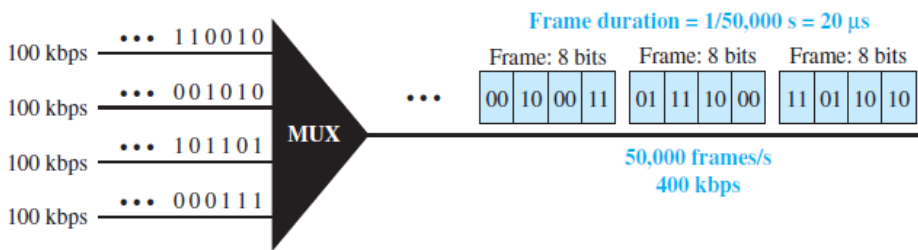
例 6-9

复用器使用 2 位的时隙合并 4 个 100kbps 的信道。试画出任意 4 种输入的输出结果。帧速率是多少？帧的持续时间是多少？比特率是多少？位持续时间是多少？

解答

图 6-17 画出了任意 4 种输入的输出结果。由于每帧包含每个信道的 2 位，所以链路每秒钟传输 50000 帧。每帧的持续时间是 $1/50000$ 秒，即 $20 \mu\text{s}$ 。帧速率是 50000 帧/秒，每帧运送 8 位，比特率是 $50000 \times 8 = 400000$ 位，即 400kbps。位持续时间是 $1/400000\text{s}$ ，即 $2.5 \mu\text{s}$ 。注意：帧的持续时间是位持续时间的 8 倍，因为每帧运送 8 位。

Figure 6.17 Example 6.9



原书 168 页 图中的英文词对照标记

Frame duration 帧持续时间

frames/s 帧/秒

Frame 帧

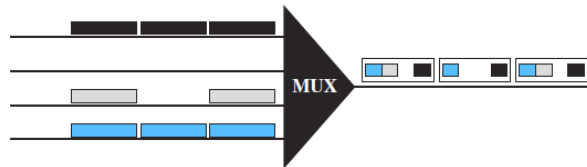
图 6-17 例 6-9

空时隙

同步 TDM 的频率并不高。当某一源端没有数据发送时，输出帧中对应的时隙是空的。图 6-18 表示了其中一条输入线没有数据发送而另一输入线中一个时隙有不连续数据的情况。

第一个输出帧填有三个时隙，第二个帧填有两个时隙而第三个帧填有三个时隙，没有一个帧是填满的。下一节讨论通过除去帧中空时隙来提高效率的统计 TDM。

Figure 6.18 Empty slots



原书 168 页 图中的英文词对照标记

图 6-18 空时隙

数据速率管理

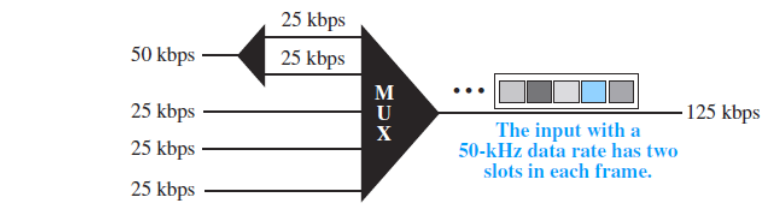
TDM 中的一个问题是如何处理输入数据速率的差异。直到目前为止，都假定所有输入数据的速率都是相同的。当数据速率不同时，可用三种策略或这三种策略的组合。它们是**多级复用 (multilevel multiplexing)**，**多时隙分配 (multiple-slot allocation)** 和 **脉冲填充 (pulse stuffing)**。

多级复用 当一条输入数据线的速率是其他一些输入数据线速率的整倍数时，可采用多级复用技术。例如，在图 6-19 中，有两条 20kbps 的输入线和三条 40kbps 的输入线，前面两条输入线可一起复用提供的速率等于后面的三条，两级复用产生 160kbps 的输出。

多时隙分配 有时在一个帧中允许对一条输入线分配多个时隙更为有效率。例如，可能有一条输入线的速率是其他输入线速率的倍数。图 6-20 中，具有 50kbps 速率的输

入线在输出中可分配两个时隙，这可通过插入串并行转换使原输入线分成两个输入线实现。

Figure 6.20 Multiple-slot multiplexing



原书 169 页 图中的英文词对照标记

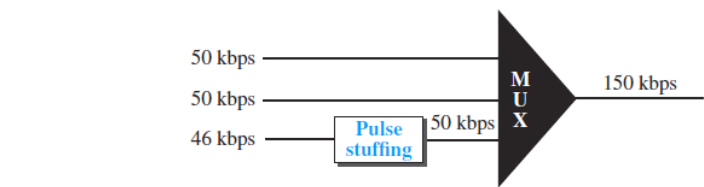
The input with a 50-kHz data rate has two slots in each frame.

具有 50kbps 数据速率的输入线在每帧中分配两个时隙

图 6-20 多时隙复用

脉冲填充 有时源输入线的比特率不是其他每个输入线比特率的整数倍，上面两种技术都不能使用，此时解决办法是选取输入线最高速率作为主要速率，然后将所有低速率的输入线添加虚位。这种技术称为**脉冲填充**，或称为**位填充**。其想法如图 6-21 所示，具有 46kbps 的输入线填充脉冲使其速率增加到 50kbps，此时就可以复用了。

Figure 6.21 Pulse stuffing



原书 169 页 图中的英文词对照标记

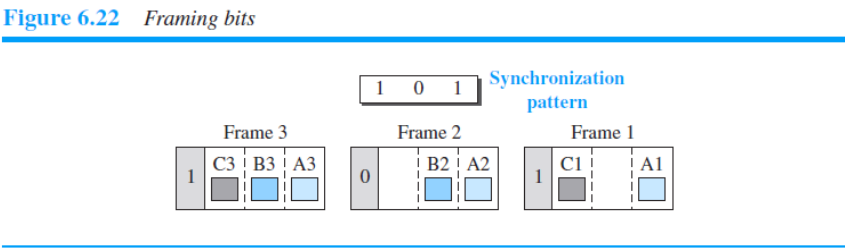
Pulse stuffing 脉冲填充

图 6-21 脉冲填充

帧同步

TDM 的实现不如 FDM 简单。复用器和分离器之间的同步是一个主要问题。如果复用器和分离器失去同步，则属于某一个信道的位可能会被错误的信道所接收。由于这个原因，通常在每帧的开始增加一个或者多个同步位。这些位称为成帧位（framing bit）。成帧位按照某种模式逐帧发生变化，使分离器与输入流同步，以准确地分离时隙。多数情况下，每帧的

同步信息由 1 位构成，交替变化为 0 和 1，如图 6-22 所示。



原书 170 页 图中的英文词对照标记

Synchronization pattern 同步模式

Fame 帧

图 6-22 成帧位

例 6-10

有 4 个数据源，每个数据源每秒种产生 250 个字符。如果交替的单元是 1 个字符，每帧增加 1 个同步位。试确定：（1）每个数据源的数据速率；（2）每个数据源中每个字符的持续时间；（3）帧速率；（4）每帧的持续时间；（5）每帧的位数；（6）链路的数据速率。

解答

回答问题如下：

1. 每个数据源的数据速率是 $250 \times 8 = 2000\text{bps} = 2\text{kbps}$ 。
2. 每个数据源每秒发送 250 个字符，所以每个字符的持续时间是 $1/250\text{ s}$ ，即 4ms 。
3. 每帧含有每个数据源的 1 个字符，意味着链路需要每秒发送 250 帧，以保持每个数据源的传输率。
4. 每帧的持续时间是 $1/250\text{s}$ ，即 4ms 。注意，每帧的持续时间与来自各个数据源的每个字符的持续时间相同。
5. 每帧传送 4 个字符和 1 个附加的同步位。这表示每帧是 $4 \times 8 + 1 = 33$ 位。
6. 链路每秒钟发送 250 帧，每帧包含 33 位。这表示链路的数据速率是 250×33 ，即 8250bps 。该链路的数据速率高于 4 个信道的比特率之和。若将 4 个信道的比特率相加，结果是 8000bps 。由于每秒传输 250 帧，同时每一帧包含附加的 1 位用于同步，所以要在结果中再加上 250，即得到 8250bps 。

例 6-11

两个信道，一个信道的比特率是 100kbps，而另一个信道的比特率是 200kbps，对它们实现多路复用。如何实现？帧速率是多少？每帧的持续时间是多少？链路的比特率是多少？

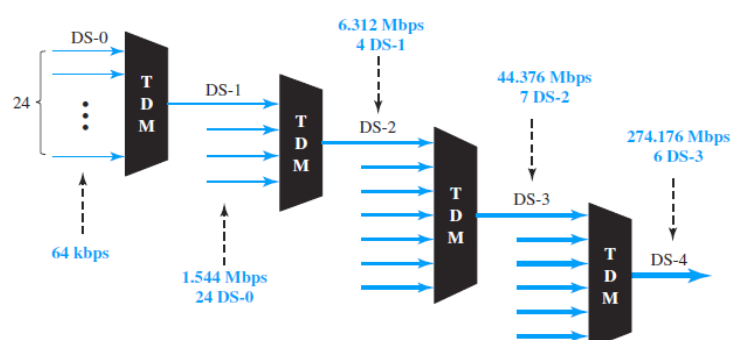
解答

可以为第一个信道分配一个时隙而为第二个信道分配两个时隙。每帧传送 3 位。由于它从第一个信道中传送 1 个位，所以帧速率是 100000 帧/s。每帧的持续时间是 1/100000s，即 10ms。比特率是 100000 帧/s \times 3 位/帧，即 300kbps。注意，由于每帧从第一个信道中传送 1 个位，第一个信道的比特率得到保持。因为每帧从第二个信道中传送 2 个位，所以第二个信道的比特率也得到保持。

数字信号服务

电话公司通过一种数字信号的层次结构实现 TDM，称为**数字信号（digital signal, DS）服务**或**数字层次结构（digital hierarchy）**。图 6-23 说明了每一级支持的数据速率。

Figure 6.23 Digital hierarchy



原书 171 页 图中的英文词对照标记

图 6-23 数字层次结构

- **DS-0** 服务是 64kbps 的单一数字信道。
- **DS-1** 是一种 1.544Mbps 的服务。1.544Mbps 是 24 \times 64kbps 加上 8kbps 的开销得到的。可以用做单一的 1.544Mbps 传输服务，或者作为 24 个 64kbps 信道的多路复用，或者用户需要时，还可以用于适合于 1.544Mbps 容量的其他服务类型的组合形式。
- **DS-2** 是一种 6.312Mbps 服务。6.312Mbps 是 96 \times 64kbps 加上 168kbps 的开销得到的。可以用做单一的 6.312Mbps 传输服务，或者用做 4 个 DS-1 信道的多路复用，或者用做 96 个 DS-0 信道，或者用做这些服务类型的组合形式。

- ❑ **DS-3** 是一种 44.376Mbps 服务。44.376Mbps 是 $672 \times 64\text{kbps}$ 加上 1.368Mbps 开销得到的。可以用做单一的 44.376Mbps 传输服务，或者用做 7 个 DS-2 信道的多路复用，或者用做 28 个 DS-1 信道，或者用做 672 个 DS-0 信道，或者用做这些服务类型的组合形式。
- ❑ **DS-4** 是一种 274.176Mbps 服务，274.176 是 $4\,032 \times 64\text{kbps}$ 加上 16.128Mbps 开销得到的。可以用做 6 个 DS-3 信道的多路复用，或者用做 42 个 DS-2 信道，或者用做 168 个 DS-1 信道，或者用做 4 032 个 DS-0 信道，或者用做这些服务类型的组合形式。

T 线路

DS-0、DS-1 等是服务的名称。为了实现这些服务，电话公司使用 T 线路（T lines，T-1 到 T-4）。这些线路的容量与 DS-1 到 DS-4 的数据速率是精确匹配的（见表 6-1）。

Table 6.1 DS and T line rates

Service	Line	Rate (Mbps)	Voice Channels
DS-1	T-1	1.544	24
DS-2	T-2	6.312	96
DS-3	T-3	44.736	672
DS-4	T-4	274.176	4032

原书 172 页 图中的英文词对照标记

表 6-1 DS 和 T 线路速率

服务	线路	速率（Mbps）	语音信道
DS-1	T-1	1.544	24
DS-2	T-2	6.312	96
DS-3	T-3	44.736	672
DS-4	T-4	274.176	4032

T-1 线路用于实现 DS-1，T-2 线路用于实现 DS-2 等。从表 6-1 中可以看出，DS-0 实际上没有作为服务提供，但是它被定义为用于参考的基础。

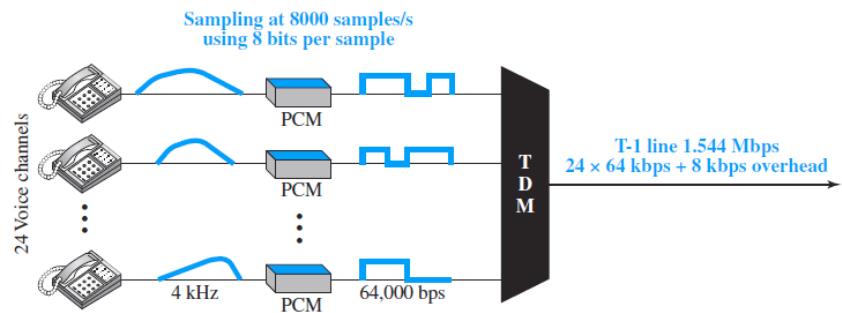
用于模拟传输的 T 线路

T 线路是为数字数据、音频或者视频设计的数字线路，但它也可以用于模拟传输（常规的电话连接）。前提是要先对模拟信号采样，然后使用 TDM。

能够使用 T 线路作为模拟信号载体为电话公司开启了新的服务时代。早期，如果某个

组织机构需要 24 条单独的电话线路，需要从公司到中心交换机安装 24 条双绞线电缆（你是否还记得一些老电影中，繁忙的行政长官的桌子上有 10 部电话，或者连接有粗电缆的老式办公室电话？那些粗电缆中有很多根电话线）。现在，那些组织机构可以把 24 条线路合并为一条 T-1 线路，并且只靠这一条 T-1 线路即可进行数据交换。图 6-24 说明了如何将 24 个语音信道多路复用为一条 T-1 线路（参考第 4 章的 PCM 编码）。

Figure 6.24 T-1 line for multiplexing telephone lines



原书 172 页 图中的英文词对照标记

Sampling at 8000 samples/s 以 8000 samples/s 采样

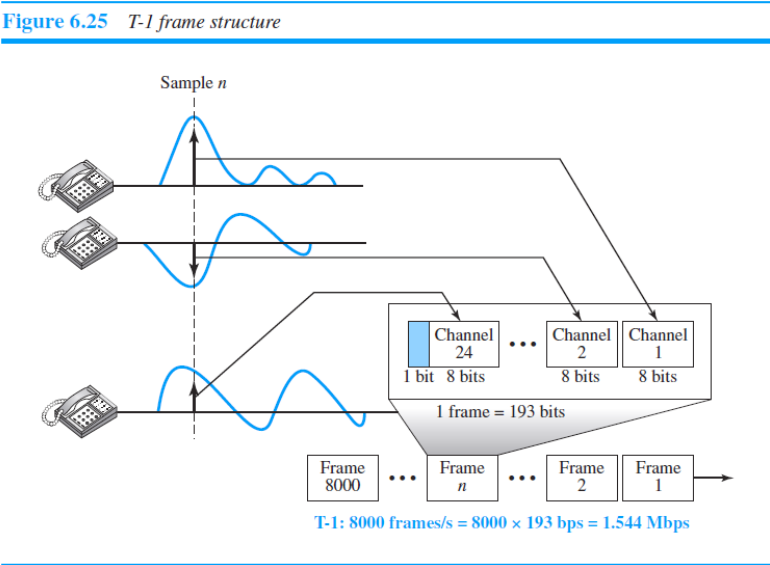
using 8 bits per sample 每个采样使用 8 位

24 Voice channels 24 个信道

图 6-24 用于电话线路多路复用的 T-1 线路

T-1 帧 上面提到过，DS-1 需要 8kbps 的开销。为了理解这种开销是如何计算出来的，必须考查 24 条语音信道的帧的格式。

用于 T-1 线路的帧通常是 193 位，分为 24 个 8 位的时隙，每帧附加 1 位用于同步（ $24 \times 8 + 1 = 193$ ），见图 6-25。换句话说，每个时隙包含来自每个信道的信号片段。24 个片段在帧中交替排列。如果一条 T-1 线路传送 8000 帧，那么数据速率（即线路的容量）是 1.544Mbps（ $193 \times 8000 = 1.544\text{Mbps}$ ）。



原书 173 页 图中的英文词对照标记

Sample n 采样 n

Channel 信道

Frame 帧

frame/s 帧/秒

图 6-25 T-1 帧结构

E 线路

欧洲使用的 T 线路版本称为 **E 线路 (E line)**。这两种系统在概念上是相同的，但是容量不同。表 6-2 列出了 E 线路及其容量。

Table 6.2 E line rates

Line	Rate (Mbps)	Voice Channels
E-1	2.048	30
E-2	8.448	120
E-3	34.368	480
E-4	139.264	1920

原书 173 页 图中的英文词对照标记

表 6-2 E 线路速率

line 线路

Rate (Mbps) 速率 (Mbps)

Voice Channel 语音信道

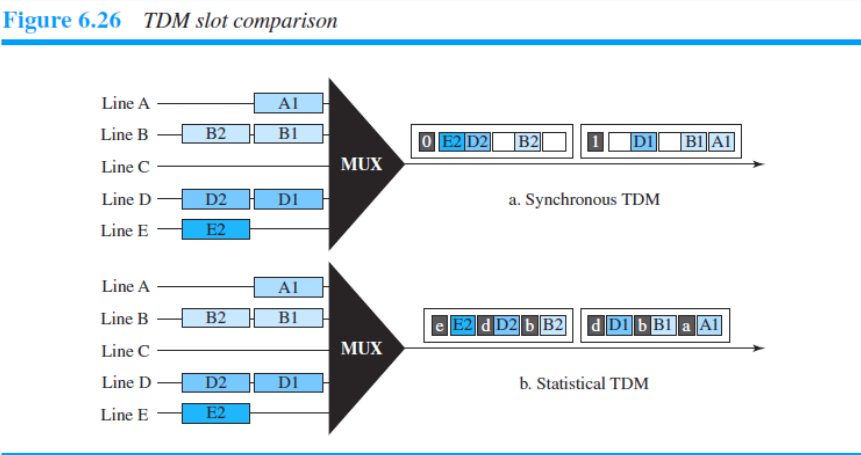
更多同步 TDM 应用

一些第二代移动电话公司使用同步 TDM。例如，前面讨论过的移动电话数字版本，仍然将可用带宽划分为多个 30kHz 的波段。对于每一个波段，使用 TDM 使 6 个用户可以共享这一波段。这表示每个 30kHz 的波段现在由 6 个时隙构成，用户的数字化语音信号就插入到这些时隙中。使用 TDM，每个区域的电话用户的数量现在增加到 6 倍以上。我们将在第 16 章讨论第二代移动电话。

统计时分复用

在上一节看到，在同步 TDM 中每个输入在输出帧中都占有一个时隙，如果有些输入线没有数据发送，那么效率就不高。在统计时分复用中，动态地分配时隙以提高带宽的效率。仅当输入线有发送数据，时隙才有意义并在输出帧中给予一个时隙。在统计复用中，每个帧中时隙的个数小于输入线的条数。复用器循环顺序地检测每条输入线，如果输入线有数据发送，则对输入线分配一个时隙，否则跳过这条线检测下一条线。

图 6-26 表示了一个同步和一个统计 TDM 的例子，前一个例子由于对应的线没有数据发送，某些时隙是空的。然而在后一个例子中，只要有一条输入线有数据要发送，那么就没有空的时隙。



原书 174 页 图中的英文词对照标记

Synchronous TDM 同步 TDM

Statistical TDM 统计 TDM

line 线路

图 6-26 TDM 时隙对比

寻址

图 6-26 也表明了同步 TDM 和统计 TDM 时隙之间的主要差别。在同步 TDM 中，输出时隙全部由数据占用；而在统计 TDM 中，输出时隙需要携带数据和目的地址。在同步 TDM 中不需要寻址，作为输入和输出的地址之间关系是同步的和指定的。例如，我们知道输入线 1 后转向输入线 2，如果复用器与分离器是同步的，这是可以保证的。在统计 TDM 中，由于输入和输出之间不存在指定或预定的时隙，它们之间没有固定的关系，需要在每个时隙中包含接收方地址以表明将要传送的地方。寻址最高简单形式可用定义 N 个不同输出线的 n 位表示，其中 $n = \log_2 N$ 。例如，对于 8 条输出线，需要 3 位地址。

时隙大小

因为在统计 TDM 中时隙携带数据和地址，为了传输的效率，数据长度与地址长度之比必须合理。例如，每个时隙发送 1 位数据而地址是 3 位，这样做效率很低。这就是说开销是百分之三百。在统计 TDM 中，通常一个数据块有许多字节而地址只有很少字节。

没有同步位

统计 TDM 与同步 TDM 还有一个不同，它没有同步位。这是由于此时，它是处于帧级，不需要同步。

带宽

在统计 TDM 中，链路的容量通常小于每个信道容量之和。统计 TDM 的设计者按照每条信道负载的统计确定链路的容量。如果输入时隙平均百分之 x 就认为满了，那么链路的容量反映这一情况。当然，高峰时某些时隙需要等待。

6.2 扩频

复用把来自某些源端的信号组合在一起获得带宽的效率，链路的有用带宽在各个源端之间划分。在扩频（spread spectrum, SS）中，也把来自某些源端的信号组合在一起形成一个更宽的带宽，可是目的略有不同。扩频是为无线应用而设计的（LAN 与 WAN）。在这些类型应用中，我们所关注的比带宽效率更为重要。在无线应用中，所有站点都以空气（或真空）作为通信传输介质，共享这介质需要没有窃听者拦截，也需要没有恶意的入侵者的干扰（例如，军事行动）。

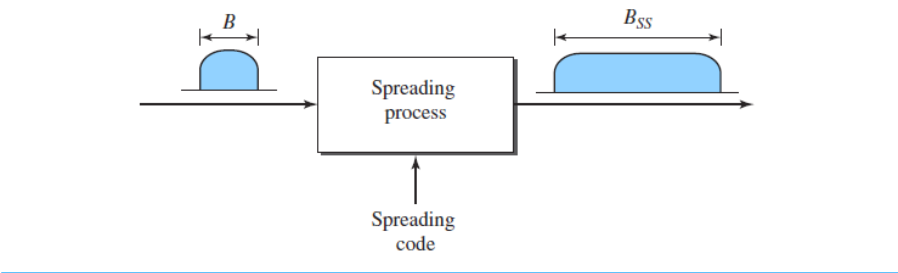
为达到此目的，扩频技术增加了冗余部分，扩展原始信号的频带满足每个站的需要。如果每个站要求的带宽是 B ，扩频将带宽扩展到 B_{ss} ，这里 $B_{ss} \gg B$ 。扩大的带宽允许源端用有防护的封装将它的报文进行更安全的传输，类似发送精美的礼品，把它放在特制礼盒中防止

在运输过程中受到损坏，可用一种优先级传递服务保证包装安全。

图 6-27 表示了扩频的思想，扩频通过两个原则达到它的目的：

1. 对每个站点需要分配的带宽显然要比它所需要的带宽更大；
2. 原来的带宽 B 扩大到 B_{ss} 必须由一个与原来的信号无关的过程来做。换言之，信号由源端生成后，扩频过程才发生。

Figure 6.27 Spread spectrum



原书 176 页 图中的英文词对照标记

Spreading process 扩频过程

Spreading code 扩频码

图 6-27 扩频

信号由源端生成后，扩频过程利用扩频代码并扩大带宽，图中表示了原来的带宽 B 和扩大的带宽 B_{ss} 。扩频代码是伪随机二进制数据流，但它实际上是一种模式。

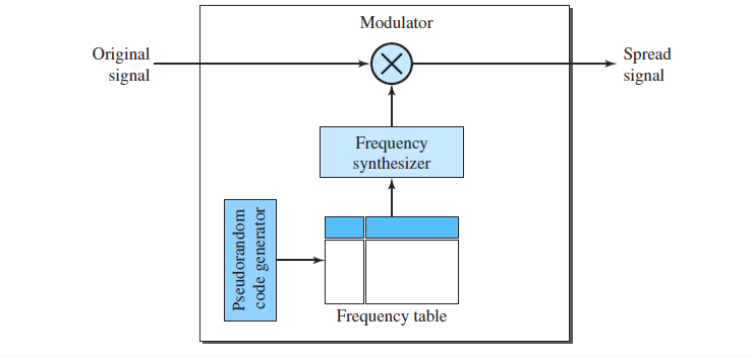
有两种技术扩展带宽：跳频扩频（FHSS）和直接序列扩频（DSSS）。

6.2.1 跳频扩频（FHSS）

跳频扩频（frequency hopping spread spectrum, FHSS）是用源信号调制 M 个不同的载波频率。在某一时刻用信号调制 1 个载波频率，在下一时刻信号调制另一个频率。虽然调制是一次使用一个频率，但在最终用了 M 个频率。源信号扩展后占用的带宽是 $B_{FHSS} \gg B$ 。

图 6-28 表示了 FHSS 的总的设计概况。称为**伪随机噪声（pseudorandom noise, PN）**的**伪随机码生成器（pseudorandom code generator）**对**每跳周期 T_h （hopping period, T_h ）**生成一个 k 位模式。频率表使用这个模式查找频率作为这个跳周期的频率，而且通过它传送到频率合成器，频率合成器生成该频率的载波信号，同时源信号调制这个载波。

Figure 6.28 Frequency hopping spread spectrum (FHSS)



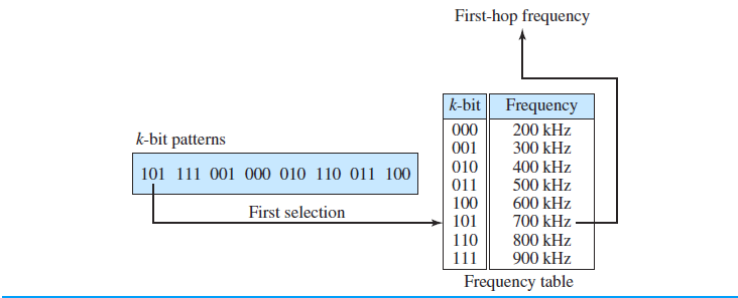
原书 177 页 图中的英文词对照标记

- Modulator 调制器
- Original signal 源信号
- Spread signal 扩展信号
- Frequency table 频率表
- Frequency synthesizer 频率合成器
- pseudorandom code generator 伪随机码生成器

图 6-28 跳频扩频

假定我们决定采用 8 个频率，这是实际应用最简单的例子，但恰好说明问题。此时， M 是 8， k 是 3，伪随机代码生成器将生成 8 个不同的 3 位模式，这些映射到频率表中 8 个不同的频率（见图 6-29）。

Figure 6.29 Frequency selection in FHSS



原书 177 页 图中的英文词对照标记

- First-hop frequency 第 1 跳频率
- k-bit patterns k-位模式
- First selection 第 1 个选择对象

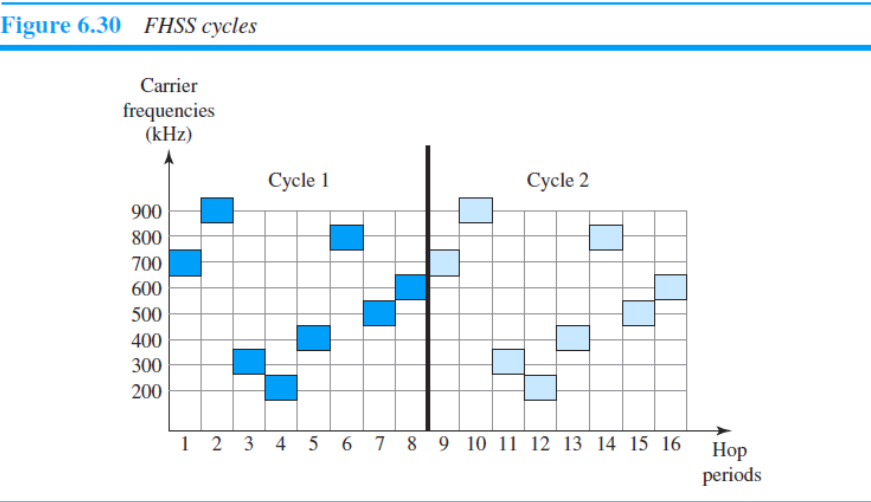
k -bit k -位

Frequency 频率

Frequency table 频率表

图 6-29 FHSS 中的频率选择

这个站点的模式是 101、111、001、000、010、110、011 和 100。注意：模式是伪随机的，它在 8 次跳后重复循环。这就是说，在跳周期 1，模式是 101，所选的频率是 700kHz，源信号调制这个载波频率。所选第 2 个模式是 111，它选中 900kHz 的载波。第 8 个模式是 100，所选的频率是 600kHz。8 次跳频后，模式重复，再从 101 开始。图 6-30 表示了信号如何从载波跳到载波的循环，并假定源信号要求的带宽是 100kHz。



原书 178 页 图中的英文词对照标记

Carrier frequencies 载波频率

Hop periods 跳频周期

Cycle 周期

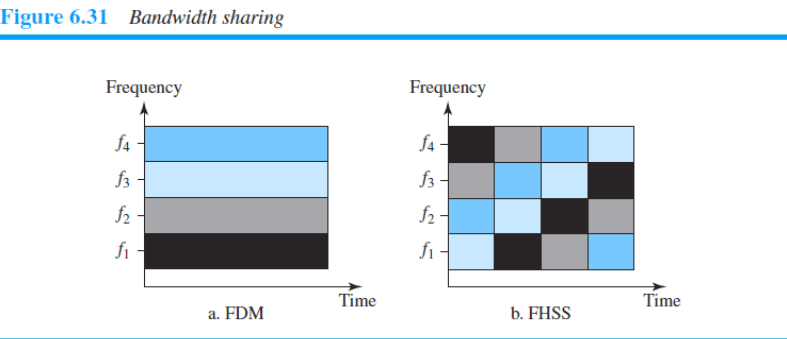
图 6-30 FHSS 循环

该图表示该方案能实现前面提到的目的。当有许多个 k -位组模式而跳频周期短，那么发送方和接收方可具有保密性。如果入侵者企图窃听传输信号，他仅能获取很少一部分数据，因为他不知道扩频序列，不能很快地使他能适应下一跳变。一个怀恶意的发送者可能会将噪声发送到一个跳频周期中（随机地）干扰信号，但不是全部周期。这个方案也有抗干扰的效果。

带宽共享

如果跳频数是 M ，那么可将 M 个信道复用为使用同一带宽 B_{ss} 的一个信道。由于一个站在每跳周期中只用一个频率，其他 $M-1$ 个站点可使用另外的 $M-1$ 个频率。换言之，如果使用适当的调制技术，比如多 FSK (MFSK)， M 个不同站点可用同一带宽 B_{ss} 。FHSS 与 FDM 相似，如图 6-31 所示。

图 6-31 表示了使用 FDM 的 4 个信道与使用 FHSS 的 4 信道的例子。在 FDM 中，每个站点用带宽的 $1/M$ ，但是固定的分配；在 FHSS 中，每个站点占用带宽的 $1/M$ ，但跳到跳改变的分配。



原书 178 页 图中的英文词对照标记

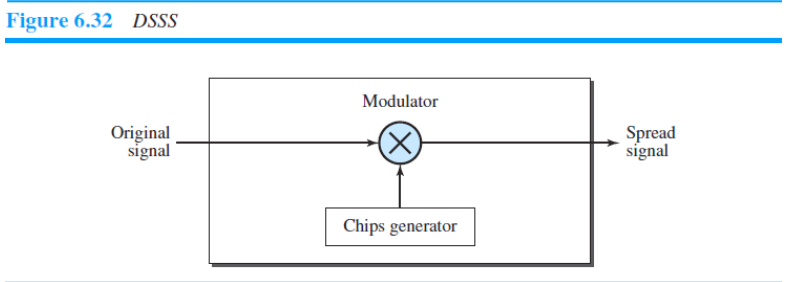
time 时间

Frequencies 频率

图 6-31 带宽共享

6.2.2 直接序列扩频

直接序列扩频 (direct sequence spread spectrum, DSSS) 技术也是扩大源信号的带宽，但方法不同。在 DSSS 中，每个数据位用扩展编码的 n 位代替。换言之，每一位被编码为 n 个比特位，称为**码片 (chip)**，此处码片的速率是数据比特率的 n 倍。图 6-32 表示了 DSSS 的概念。



Original signal 原始信号

Modulator 调制器

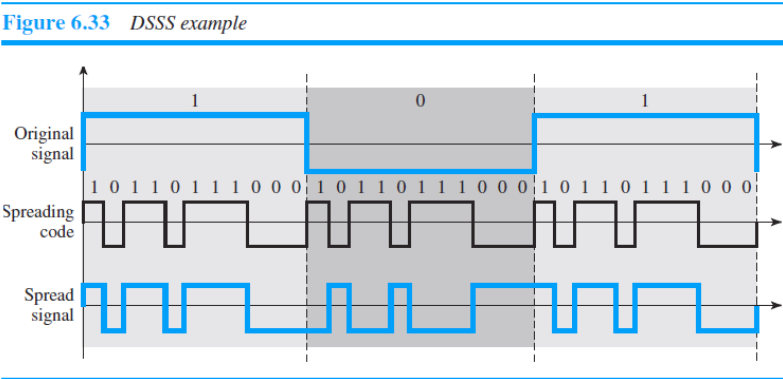
Spread signal 传播信号

Chips generator 码片产生器

图 6-32 直接序列扩频

作为实例，让我们考察无线局域网中所用的直接序列扩频，著名的巴克序列（Barker sequence），此时 $n=11$ 。假定源信号与码片生成器中的码片使用极性 NRZ 编码。图 6-33 表示了码片和用码片复用源信号得到扩频信号的结果。

在图 6-33 中，扩频码是模式 10110111000（该例子中）的 11 位码片。如果源信号的速率是 N ，则扩频信号的速率是 $11N$ 。这就是说，扩频信号要求的带宽比源信号带宽大 11 倍。如果入侵者不知道该编码，扩频信号可提供保密。如果每个站点使用不同的编码，它也可提供抗干扰的能力。



Original signal 原始信号

Spreading code 扩频码

Spread signal 传播信号

图 6-33 DSSS 的例子

带宽共享

在 DSSS 中能否像 FHSS 一样能共享带宽？回答不是，也可能是。如果我们使用一个扩频代码去扩频那些不能组合和分离的信号（来自不同的站），则不能共享带宽。例如，将在

第 15 章中看到，某些无线局域网使用 DSSS，但扩频带宽不能被共享。然而，如果使用一个允许组合和分离的扩频信号的特殊类型的序列代码，则可共享带宽。将在第 16 章看到，一个特殊的扩频代码允许在移动电话中使用 DSSS，某些用户可共享带宽。

6.3 本章结束资料

6.3.1 推荐读物

为了更详细地讨论与本章有关的主题,推荐下列读物与网站,在本书末列出了括号[……]内的参考资料。

书籍

复用在[Pea92]进行了讨论。[Cou01]给出了完整的 TDM 和 FDM 的讨论,更深入资料可参考[Ber96]。在[Sta04]中有复用的讨论。扩频的相关内容可从[Cou01]和[Sta04]中找到。

6.3.2 关键术语

Analog hierarchy	模拟层次结构	link	链路
Barker sequence	巴克序列	master group	主群
Channel	信道	multilevel multiplexing	多级复用
Chip	码片	multiple-slot allocation	多时隙分配
Demultiplexer (DEMUX)	多路分用器	multiplexer (MUX)	复用器
Dense WDM (DWDM)	密集波分复用	multiplexing	复用
digital signal (DS) service	数字信号服务	pseudorandom code generator	位随机码产生器
direct sequence spread spectrum (DSSS)	直接序列扩频	pseudorandom noise (PN)	位随机噪声
E line	E 线路	pulse stuffing	脉冲填充
Framing bit	成帧位	spread spectrum (SS)	扩频
frequency hopping spread spectrum (FHSS)	跳频扩频	statistical TDM	统计 TDM
frequency-division multiplexing (FDM)	频分复用	synchronous TDM	同步 TDM
guard band	防护频带	T line	T 线路
hopping period	跳频周期	time-division multiplexing (TDM)	时分复用
interleaving	交织	wavelength-division multiplexing (WDM)	波分复用
jumbo group	巨群		

6.3.3 本章小结

带宽的利用就是使用有用的带宽达到特殊的目的。复用可达到提高效率的目的;扩频可达到保密和抗干扰的目的。

复用是一组技术，它是指多个信号通过一条单独的数据链路同时传输， n 条线路共享该链路的带宽。名词链路是指物理通路；名词信道是指支持一个传输的链路一个部分。基本复用技术有三种：频分复用、波分复用和时分复用。前两种技术是用于模拟信号，第三种是用于数字信号。频分复用（FDM）是一种模拟技术，当一条链路的带宽（用赫兹表示）大于被传输信号的带宽总和时，可以采用该技术。波分复用（WDM）是为具有高带宽的光纤电缆而设计的，WDM 是组合光信号的一种模拟复用技术。时分复用（TDM）是一种数字处理方法，它允许多个连接共享一条链路的高带宽。TDM 是将一些低速率信道组合为一个高速率信道的数字复用技术。可将 TDM 分为两种不同方案：同步的和统计的。在同步 TDM 中，每个输入连接即使不发送数据也分配输出。在统计 TDM 中，为了提高效率，时隙是动态分配的。

在扩频（SS）中，我们把来自不同源的信号组合在一起形成一个较大带宽。扩频是为无线应用而设计的，每个站点必须能共享没有窃听者拦截、也没有恶意入侵者干扰的介质。跳频扩频（FHSS）是用源信号调制 M 个不同的载波频率。在某一时刻用该信号调制一个载波频率，在下一时刻，用该信号调制另一个频率。直接序列扩频（DSSS）技术也扩大源信号的带宽，每个数据位用扩展编码的 n 位代替。换言之，每一位被编码为 n 个码片。

6.4 练习集

6.4.1 小测试

本书网页上能找到本章的一整套互动测试。强烈推荐，学生继续做习题前，使用这些互动测试检测他们对材料的理解。

6.4.2 问答题

Q6-1. 叙述复用的目的。

Q6-2. 列出本章所提出的主要复用技术。

Q6-3. 区别复用中的链路与信道。

Q6-4. 三种复用技术中哪些技术是用于组合模拟信号？哪些用于组合数字信号？

Q6-5. 解释电话公司使用的模拟结构层次并列出结构层次不同的级。

Q6-6. 解释电话公司使用的数字结构层次并列出结构层次不同的级。

Q6-7. 三种复用技术中哪一种技术经常用于光纤链路？并说明理由。

Q6-8. 区别多级 TDM、多时隙 TDM 与脉冲填充 TDM。

Q6-9. 区别同步 TDM 和统计 TDM。

Q6-10. 解释扩频及其目的，列出本章所讨论的两种扩频技术。

Q6-11. 说明 FFSS 并解释它如何实现带宽扩大。

Q6-12. 说明 DSSS 并解释它如何实现带宽扩大。

6.4.3 习题

P6-1. 假定语音信道带宽为 4kHz, 需要用 FDM 复用 10 个语音信道, 而防护频带为 500Hz, 试计算所要求的带宽。

P6-2. 需要用 20kHz 带通信道传输 100 个数字语音信道。假定没有防护频带, 每赫兹位的比率应该是多少?

P6-3. 在图 6-9 中的模拟信号层次结构中, 求每个层次 (群, 超群, 主群和巨群) 的开销 (额外的防护频带或控制的带宽)。

P6-4. 20 个数字信号源使用同步 TDM 实现多路复用, 每个信号源的速率是 100kbps, 每个输出时隙携带来自每个数字信号源的一位, 但帧需要增加一位用于同步。试回答下列问题:

- a. 以位为单位的输出帧的长度是多少?
- b. 输出帧速率是多少?
- c. 输出帧持续时间多长?
- d. 输出数据的速率是多少?
- e. 系统效率是多少 (有用位与全体位之比)?

P6-5. 如果每个输出时隙携带来自每个信号源的 2 位, 重做习题 16。

P6-6. 14 个数字信号源, 每个信号源每秒生成 500 个字符 (8 位)。因为当前只有一些数字信号源是活跃的, 所以使用字符交替的统计 TDM 实现复用。每帧每次携带 6 个时隙, 但帧对每个时隙需要增加 4 位地址。试回答下列问题:

- a. 以位为单位的输出帧的长度是多少?
- b. 输出帧速率是多少?
- c. 输出帧持续时间多长?
- d. 输出数据的速率是多少?

P6-7. 10 个数字信号源, 其中 6 个比特率为 200kbps, 另外 4 个比特率为 400kbps。使用无同步位多级 TDM 实现复用。对复用的最后一级, 回答下列问题:

- a. 以位为单位帧长度是多少?

- b. 帧速率是多少？
- c. 帧持续时间多长？
- d. 数据速率是多少？

P6-8. 4 个信道，其中 2 个比特率为 200kbps，另外 2 个比特率为 150kbps。使用无同步位多时隙 TDM 实现复用，试回答下列问题：

- a. 以位为单位帧长度是多少？
- b. 帧速率是多少？
- c. 帧持续时间多长？
- d. 数据速率是多少？

P6-9. 2 个信道，一个速率为 190kbps，另一个速率为 180kbps。使用无同步位脉冲填充 TDM 实现复用。试回答下列问题：

- a. 以位为单位帧长度是多少？
- b. 帧速率是多少？
- c. 帧持续时间多长？
- d. 数据速率是多少？

P6-10. 关于 T-1 线回答下列问题：

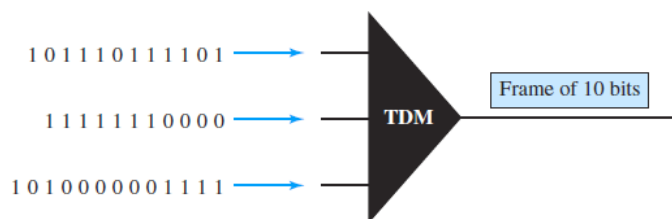
- a. 一帧持续时间多长？
- b. 开销是多少（每秒额外位的个数）？

P6-11. 使用同步 TDM 实现复用，其 4 个信号源按下列发送字符（注意：字符按它们键入的顺序发送，第三个源端不发送数据）。试表示出 5 个输出帧的内容：

- a. 信号源 1 信息：HELLO
- b. 信号源 2 信息：HI
- c. 信号源 3 信息
- d. 信号源 4 信息：BYE

P6-12. 图 6-34 表示了使用同步 TDM 的一个复用器。如果输出时隙长度只有 10 位（每个输入取 3 位加上 1 个成帧位），那么输出流是什么？到达复用器的位的顺序如箭头所示。

Figure 6.34 Problem P6-12



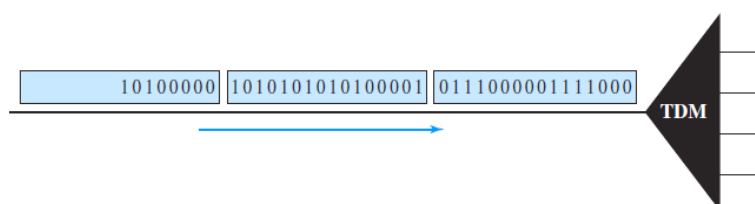
原书 183 页 图中的英文词对照标记

Frame of 10 bits 10 比特位的帧

图 6-34 P6-12

P6-13. 图 6-35 表示了使用同步 TDM 的一个分离器。如果输入时隙长度是 16 位（忽略成帧位），那么每条输出线的位流是什么？到达分离器的位的顺序如箭头所示。

Figure 6.35 Problem P6-13



原书 184 页 图中的英文词对照标记

图 6-35 P6-13

P6-14. 关于图 6-23 的数据层次结构，试回答下列问题：

- 在 DS-1 服务中，开销（附加位的个数）是多少？
- 在 DS-2 服务中，开销（附加位的个数）是多少？
- 在 DS-3 服务中，开销（附加位的个数）是多少？
- 在 DS-4 服务中，开销（附加位的个数）是多少？

P6-15. 如果对于一个带宽 $B = 4\text{kHz}$ 而 $B_{ss} = 100\text{kHz}$ 的信道使用 FHSS，试问 PN 序列最小位的个数是多少？

P6-16. 某个 FHSS 系统使用 4 位 PN 序列。如果 PN 的比特率是 64kbps，试回答下列问题：

- 可能的跳的总数是多少？
- 一个完整的 PN 的循环需要多少时间？

P6-17. 一个伪随机数生成器用下面公式生成随机数序列：

$$N_{i+1} = (5 + 7N_i) \bmod 17 - 1$$

其中 N_i 是当前的随机数, N_{i+1} 是下一次的随机数, \bmod 意思是指用 $(5 + 7N_i)$ 被 17 除的余数。

P6-18. 一个数据速率为 10Mbps 的介质, 如果使用巴克序列的 DSSS, 该介质能携带多少个 64kbps 的语音信道?

6.5 仿真试验

6.5.1 小程序

我们已经创建了一些 JAVA 小程序, 用来说明本章所讨论的主要概念。强烈推荐学生执行本书主页上的这些程序, 仔细检查协议的执行。