

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\pm 1)^2 = 1 \quad (2-4)$$

而一个码片向量和该码片反码的向量的规格化内积值是 -1 。这从(2-4)式可以很清楚地看出，因为求和的各项都变成了 -1 。

现在假定在一个 CDMA 系统中有很多站都在相互通信，每一个站所发送的是数据比特和本站的码片序列的乘积，因而是本站的码片序列（相当于发送比特 1）和该码片序列的二进制反码（相当于发送比特 0）的组合序列，或什么也不发送（相当于没有数据发送）。我们还假定所有的站所发送的码片序列都是同步的，即所有的码片序列都在同一个时刻开始。利用全球定位系统 GPS 就不难做到这点。

现假定有一个 X 站要接收 S 站发送的数据。X 站就必须知道 S 站所特有的码片序列。X 站使用它得到的码片向量 \mathbf{S} 与接收到的未知信号进行求内积的运算。X 站接收到的信号是各个站发送的码片序列之和。根据上面的公式(2-3)和(2-4)，再根据叠加原理（假定各种信号经过信道到达接收端是叠加的关系），那么求内积得到的结果是：所有其他站的信号都被过滤掉（其内积的相关项都是 0），而只剩下 S 站发送的信号。当 S 站发送比特 1 时，在 X 站计算内积的结果是 $+1$ ，当 S 站发送比特 0 时，内积的结果是 -1 。

图 2-20 是 CDMA 的工作原理。设 S 站要发送的数据是 1 1 0 三个码元。再设 CDMA 将每一个码元扩展为 8 个码片，而 S 站选择的码片序列为 $(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$ 。S 站发送的扩频信号为 \mathbf{S}_x 。我们应当注意到，S 站发送的扩频信号 \mathbf{S}_x 中，只包含互为反码的两种码片序列。T 站选择的码片序列为 $(-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)$ ，T 站也发送 1 1 0 三个码元，而 T 站的扩频信号为 \mathbf{T}_x 。因所有的站都使用相同的频率，因此每一个站都能够收到所有的站发送的扩频信号。对于我们的例子，所有的站收到的都是叠加的信号 $\mathbf{S}_x + \mathbf{T}_x$ 。

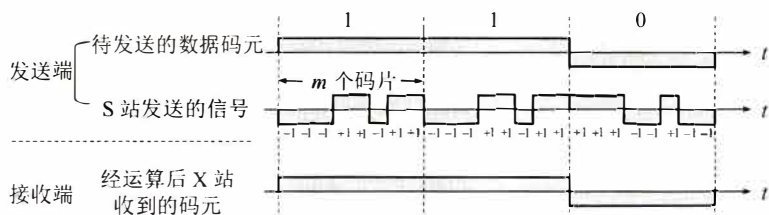


图 2-20 CDMA 的工作原理

当接收站打算收 S 站发送的信号时，就用 S 站的码片序列与收到的信号求规格化内积。这相当于分别计算 $\mathbf{S} \cdot \mathbf{S}_x$ 和 $\mathbf{S} \cdot \mathbf{T}_x$ 。显然， $\mathbf{S} \cdot \mathbf{S}_x$ 就是 S 站发送的数据比特，因为在计算规格化内积时，按(2-3)式相加的各项，或者都是 $+1$ ，或者都是 -1 ；而 $\mathbf{S} \cdot \mathbf{T}_x$ 一定是零，因为相加的 8 项中的 $+1$ 和 -1 各占一半，因此总和一定是零。

2.5 数字传输系统

在早期电话网中，从市话局到用户电话机的用户线采用最廉价的双绞线电缆，而长途干线采用的是频分复用 FDM 的模拟传输方式。由于数字通信与模拟通信相比，无论是传输质量上还是经济上都有明显的优势，目前，长途干线大都采用时分复用 PCM 的数字传输方式。因此，现在的模拟线路就基本上只剩下从用户电话机到市话交换机之间的这一段几公里

长的用户线。

现代电信网早已不只有话音这一种业务了，还包括视频、图像和各种数据业务。因此需要一种能承载来自其他各种业务网络数据的传输网络。在数字化的同时，光纤开始成为长途干线最主要的传输媒体。光纤的高带宽适用于承载今天的高速率数据业务（比如视频会议）和大量复用的低速率业务（比如话音）。基于这个原因，当前光纤和要求高带宽传输的技术还在共同发展。早期的数字传输系统存在着许多缺点，其中最主要的是以下两个：

(1) **速率标准不统一**。由于历史的原因，多路复用的速率体系有两个互不兼容的国际标准，北美和日本的 T1 速率（1.544 Mbit/s）和欧洲的 E1 速率（2.048 Mbit/s）。但是再往上的复用，日本又使用了第三种不兼容的标准。这样，国际范围的基于光纤的高速数据传输就很难实现。

(2) **不是同步传输**。在过去相当长的时间，为了节约经费，各国的数字网主要采用准同步方式。在准同步系统中，各支路信号的时钟频率有一定的偏差，给时分复用和分用带来许多麻烦。当数据传输的速率很高时，收发双方的时钟同步就成为很大的问题。

为了解决上述问题，美国在 1988 年首先推出了一个数字传输标准，叫作**同步光纤网 SONET (Synchronous Optical Network)**。整个同步网络的各级时钟都来自一个非常精确的主时钟（通常采用昂贵的铯原子钟，其精度优于 $\pm 1 \times 10^{-11}$ ）。SONET 为光纤传输系统定义了同步传输的线路速率等级结构，其传输速率以 51.840 Mbit/s 为基础^①，大约对应于 T3/E3 的传输速率，此速率对电信号称为第 1 级同步传送信号(Synchronous Transport Signal)，即 STS-1；对光信号则称为第 1 级光载波(Optical Carrier)，即 OC-1。现已定义了从 51.840 Mbit/s（即 OC-1）一直到 39813.120 Mbit/s（即 OC-768/STS-768）的标准。

ITU-T 以美国标准 SONET 为基础，制定出国际标准同步数字系列 SDH (Synchronous Digital Hierarchy)，即 1988 年通过的 G.707~G.709 等三个建议书。到 1992 年又增加了十几个建议书。一般可认为 SDH 与 SONET 是同义词，但其主要不同点是：SDH 的基本速率为 155.520 Mbit/s，称为第 1 级同步传递模块(Synchronous Transfer Module)，即 STM-1，相当于 SONET 体系中的 OC-3 速率。表 2-2 为 SONET 和 SDH 的比较。为方便起见，在谈到 SONET/SDH 的常用速率时，往往不使用速率的精确数值而是使用表中第二列给出的近似值作为简称。

表 2-2 SONET 的 OC 级/STS 级与 SDH 的 STM 级的对应关系

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)
51.840	—	OC-1/STS-1	—	810
155.520	155 Mbit/s	OC-3/STS-3	STM-1	2430
622.080	622 Mbit/s	OC-12/STS-12	STM-4	9720
1244.160	—	OC-24/STS-24	STM-8	19440

① 注：SONET 规定，SONET 每秒传送 8000 帧（和 PCM 的采样速率一样）。每个 STS-1 帧长为 810 字节，因此 STS-1 的数据率为 $8000 \times 810 \times 8 = 51840000 \text{ bit/s}$ 。为了便于表示，通常将一个 STS-1 帧画成 9 行 90 列的字节排列。在这种排列中的每一个字节对应的数据率是 64 kbit/s。一个 STS- n 的帧长就是 STS-1 的帧长的 n 倍，也同样是每秒传送 8000 帧，因此 STS- n 的数据率就是 STS-1 的数据率的 n 倍。

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