



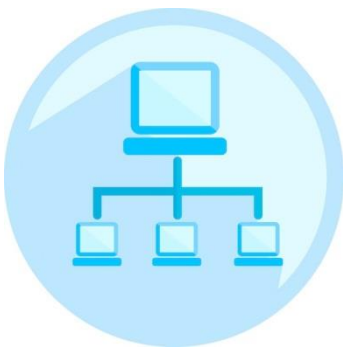
计算机网络



顾 军

计算机学院

jgu@cumt.edu.cn





专题2：信号如何在计算机网络中流动



- 应用层(application layer)
- 运输层(transport layer)
- 网络层(network layer)
- 数据链路层(data link layer)
- 物理层(physical layer)

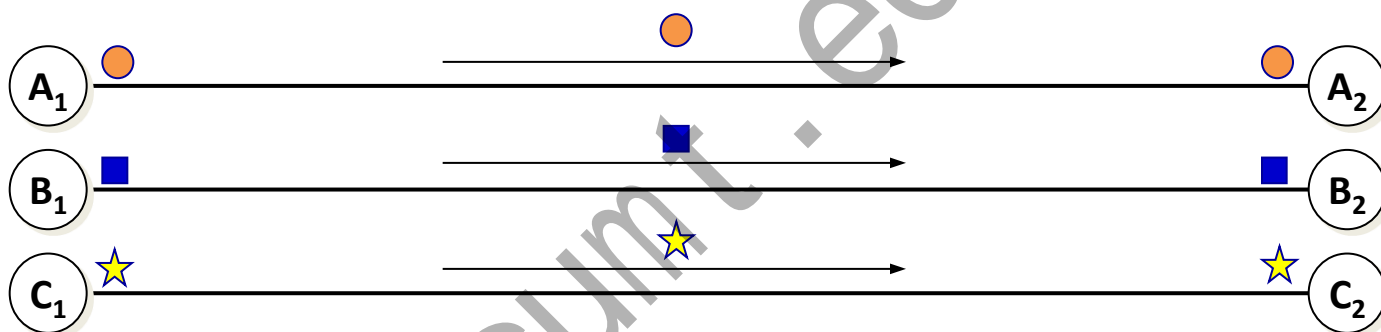




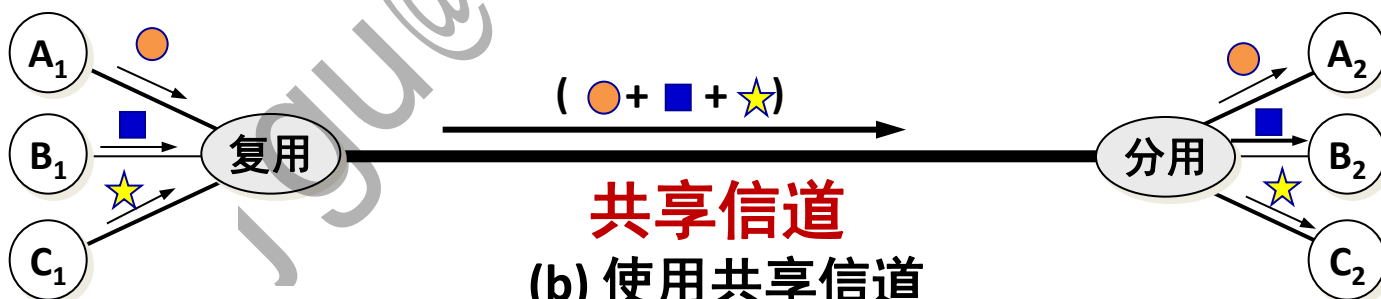
Q13: 如何提高物理信道的利用率?

复用 (multiplexing) 是通信技术中的基本概念。

信道复用 允许用户使用一个**共享**信道进行通信，降低成本，提高利用率。



(a) 使用单独的信道



(b) 使用共享信道





复用技术

- 在一个屋子里有许多人要彼此进行通话，为了避免相互干扰，可以采用以下方法：
 - 讲话的人按照**顺序轮流**进行发言。（**时分复用**）
 - 讲话的人可以同时发言，但每个人说话的**音调不同**。（**频分复用**）
 - 讲话的人采用**不同的语言**进行交流，只有懂得同一种语言的人才能够相互理解。（**码分复用**）
 - 让每个说话的人都用传声筒，让声音只在**特定方向**传播，这样就可以多个人同时用同音调同语言说话但是不会互相干扰。（**空分复用**）





频分复用 FDM

(Frequency Division Multiplexing)

- **信道带宽分割**：在物理信道的可用带宽超过单个原始信号所需带宽情况下，可将该物理信道的总带宽分割成若干个与传输单个信号带宽相同(或略宽)的子信道，每个子信道传输一路信号，这就是**频分多路复用**。
- 所有用户在**同样的时间**占用**不同的带宽资源**（请注意，这里的“带宽”是频率带宽而不是数据的发送速率）。

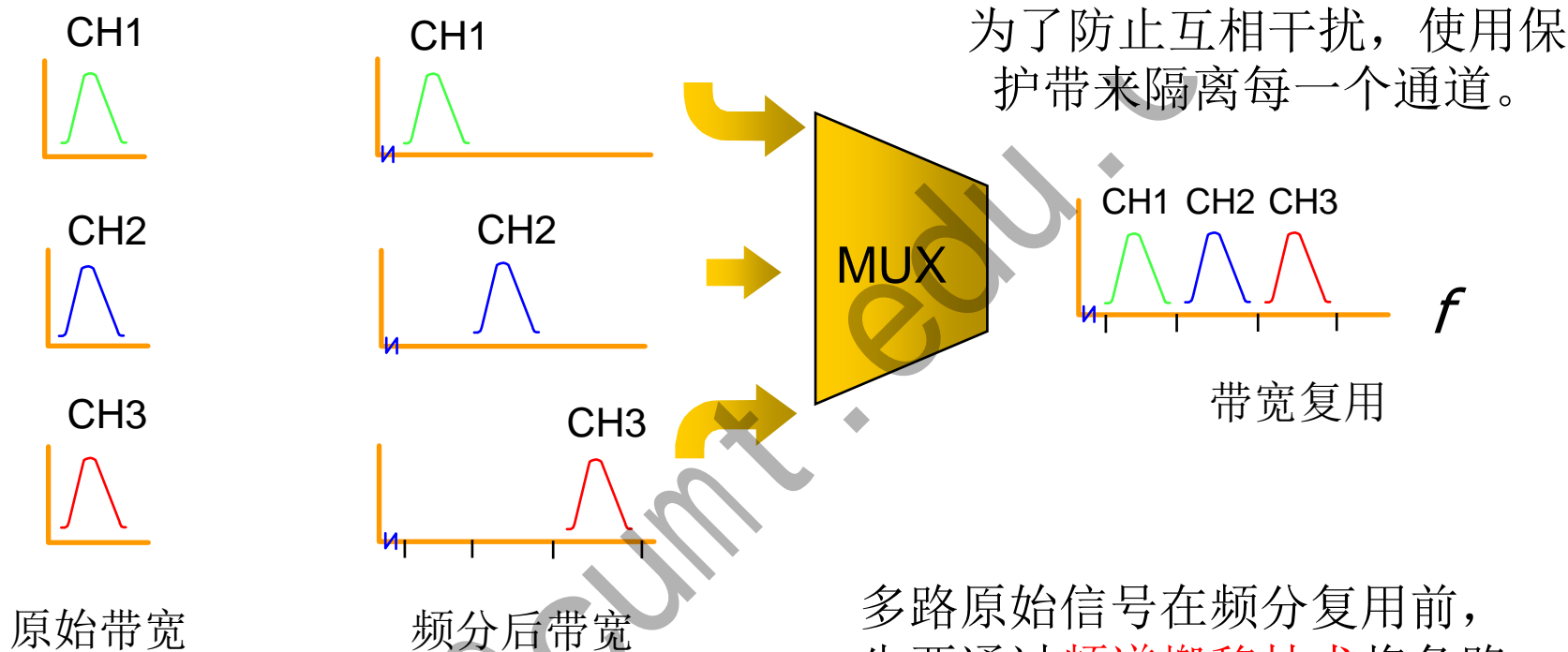


用户在分配到一定的频带后，在通信过程中自始至终都占用这个频带。





频分复用 FDM



频分复用的**典型应用**是广电HFC网络电视信号的传输（不管是模拟电视信号还是数字电视信号），因为对于数字电视信号而言，尽管在每一个频道(8MHz)以内是时分复用传输的，但各个频道之间仍然是以频分复用的方式传输的。

多路原始信号在频分复用前，先要通过**频谱搬移技术**将各路信号的频谱搬移到物理信道频谱的不同段上，使各信号的带宽不相互重叠，然后用不同的频率调制每一个信号，每个信号要一个以它的载波频率为中心的一定带宽的通道。





波分复用 WDM

(Wavelength Division Multiplexing)

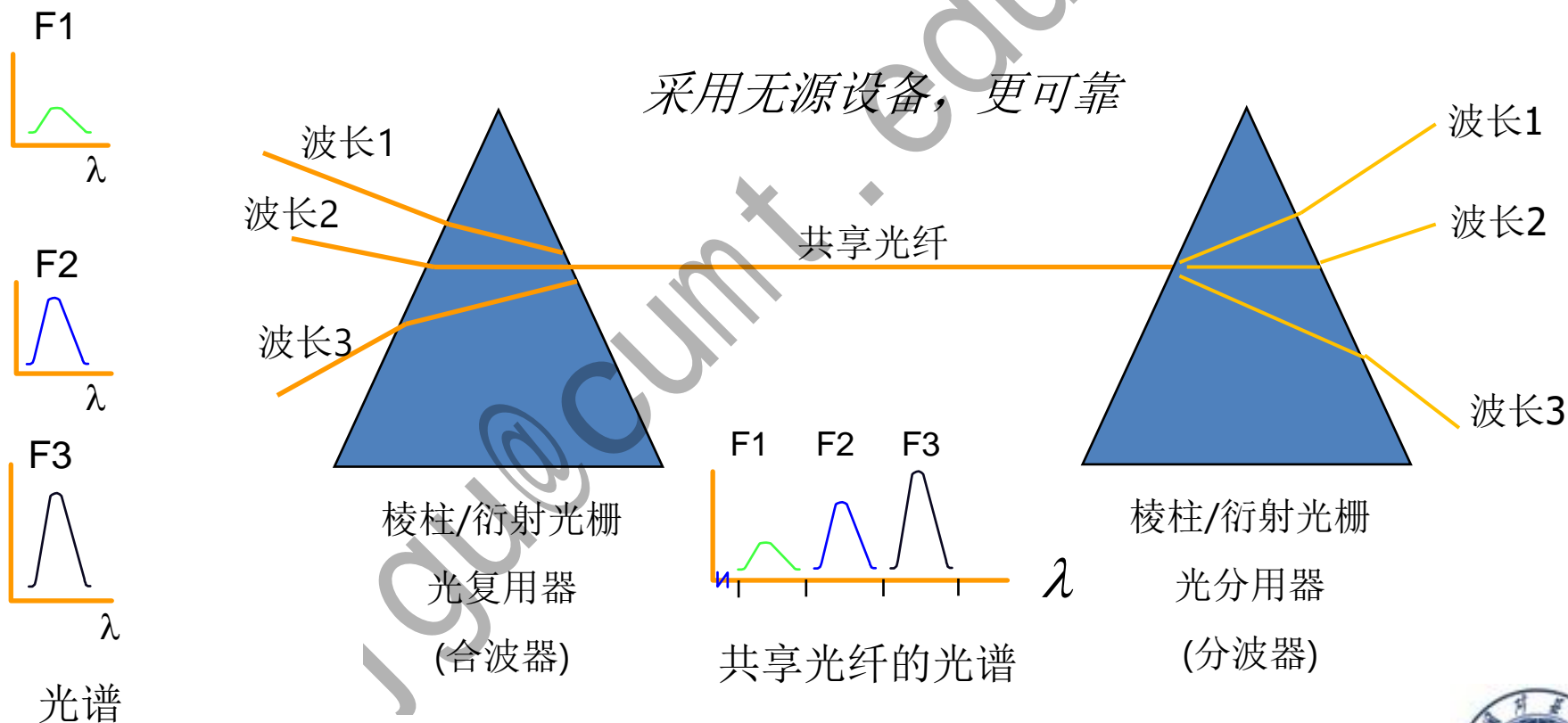
- 波分复用技术（WDM）是将一系列载有信息、但波长不同的光信号合成一束，沿着单根光纤传输；在接收端再用某种方法，将各个不同波长的光信号分开的通信技术。
- 这种技术可以同时在一根光纤上传输多路信号，每一路信号都由某种特定波长的光来传送，这就是一个波长信道。
- 波分复用就是光的频分复用，由于光载波的频率很高，因此习惯上用波长而不用频率来表示所使用的光载波。





WDM实现原理

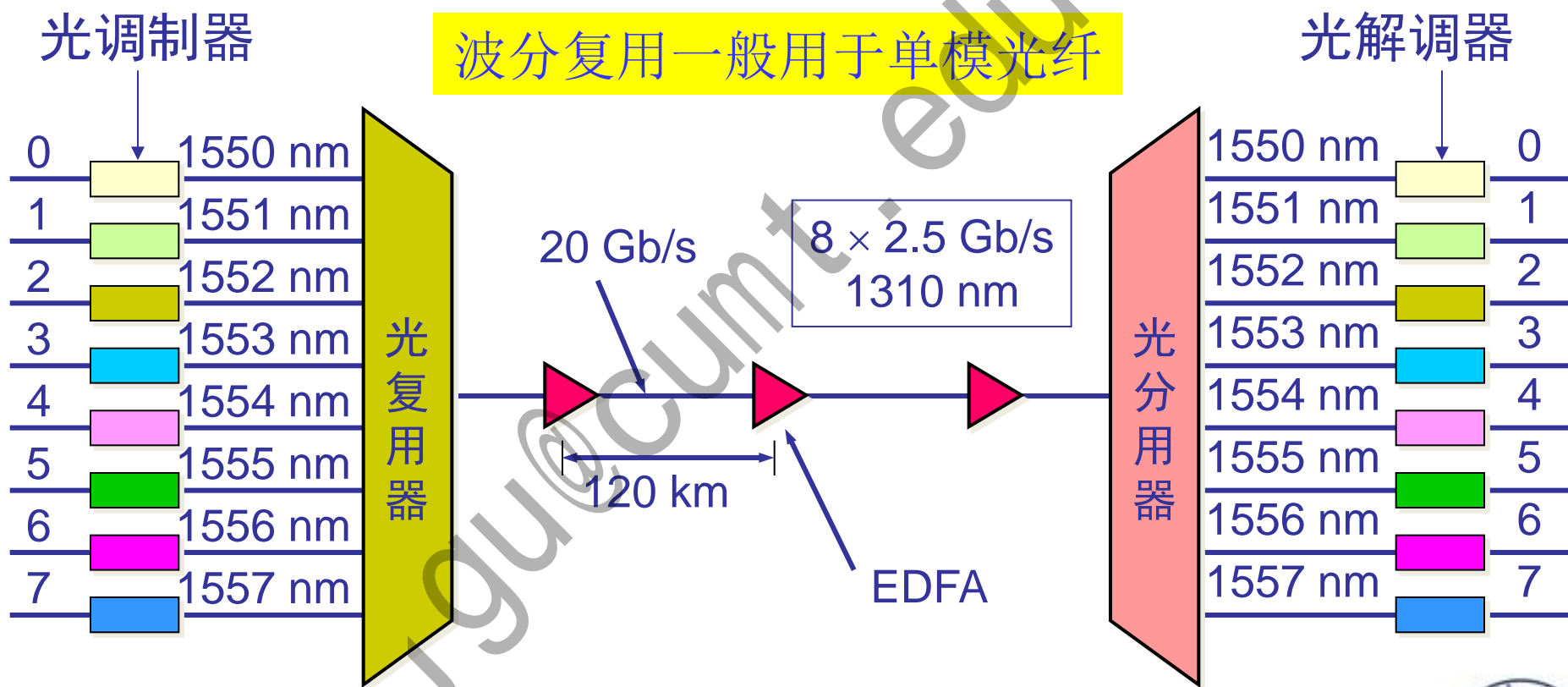
棱镜或光栅可以根据入射角和波长将几束光合成一道光，也可以将合成光分离成多束光。





WDM实现案例

WDM实现使用一根光纤同时传输多个频率很接近的光载波信号。目前已经做到一根光纤上复用160路甚至更多路数的光载波信号。



掺铒光纤放大器EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier), 不需要进行光电转换而直接对光信号进行放大, 两个之间的光缆可达120km。





WDM的技术特点

- 充分利用光纤的低损耗波段，增加光纤的传输容量，使一根光纤传送信息的物理限度增加一倍至数倍。目前只是利用了光纤低损耗谱（1310nm-1550nm）极少一部分，波分复用可以充分利用单模光纤的巨大带宽约25THz，传输带宽充足。
 - 密集波分复用(Dense WDM, DWDM)在一根光纤上复用64路40Gbit/s的商品，其数据率达到2.56Tbit/s。
- 对已建光纤系统，尤其早期铺设的芯数不多的光缆，只要原系统有功率余量，可进一步增容，实现多个单向信号或双向信号的传送而不用对原系统作大改动，具有较强灵活性。
- 由于大量减少了光纤的使用量，大大降低了建设成本、由于光纤数量少，当出现故障时，恢复起来也迅速方便。
- 有源光设备的共享性，对多个信号的传送或新业务的增加降低了成本，而有源设备的大幅减少，提高了系统可靠性。





光纤容量的拓展

- 2014年10月，武汉邮电科学研究院牵头研发的“超高速超大容量超长距离光传输基础研究”课题验收，在国内首次实现一根普通单模光纤中以超大容量超密集波分复用传输**80公里**，传输总容量达到**100.23Tb / s**，相当于**12.01亿对人**在一根光纤上同时通话。
 - 相当于在**80公里**的空间距离上，仅用**1秒钟**的时间，就可传输**4000部25G**大小、分辨率**1080P**蓝光超清电影。





光纤容量的拓展

- 2019年2月，由光纤通信技术和网络国家重点实验室、国家信息光电子创新中心、烽火通信和光迅科技联合研究攻关，首次实现了**1.06Pbit/s**超大容量波分复用及空分复用的光传输系统实验，一根光纤便可支持近**300亿人**同时通话。
 - 实验采用了我国自主研发的一种单模**19芯**的特殊光纤作为传输介质，相较于单模**7芯**光纤，前者的传输能力更强，其传输容量也是目前商用单模光纤传输系统最大值的**10倍**，**1秒内**可传输约**130块1TB**硬盘所存储的数据。





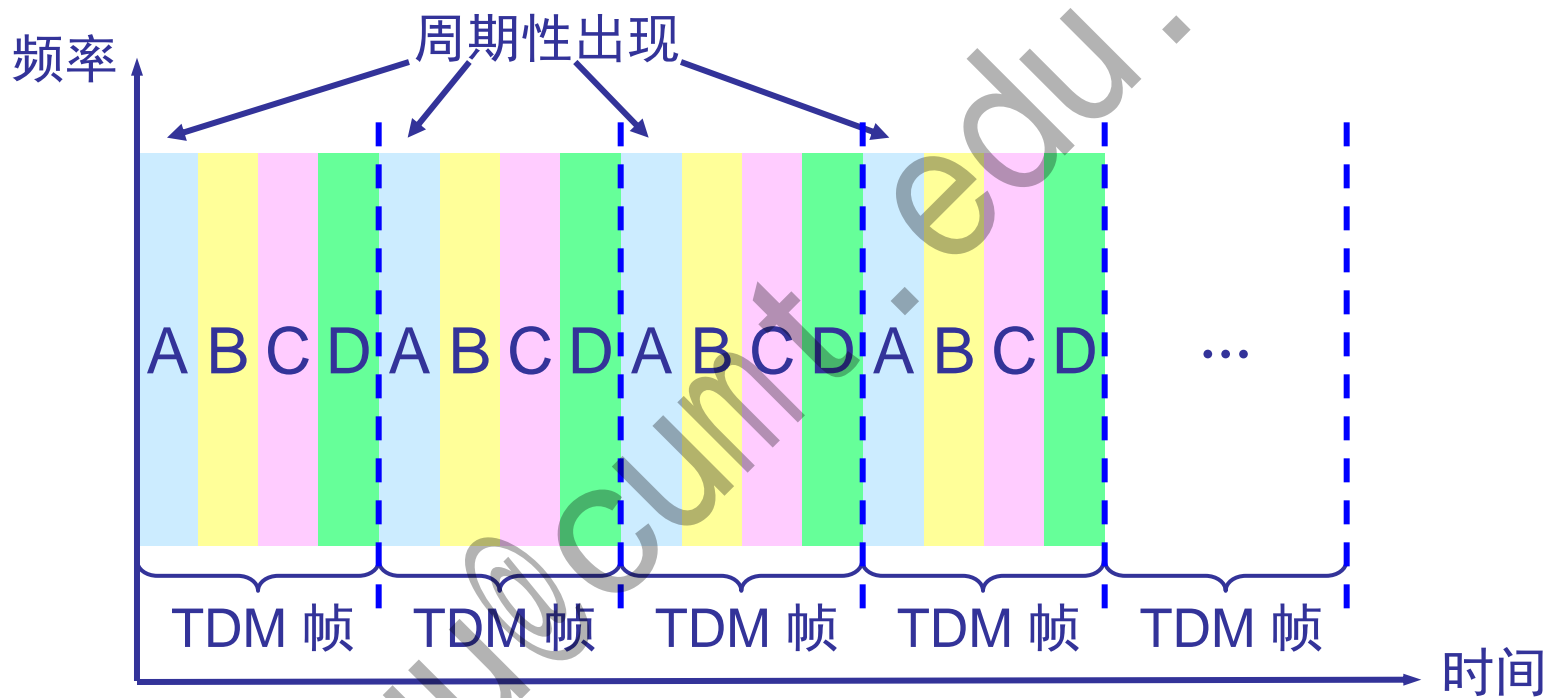
时分复用TDM (Time Division Multiplexing)

- 时分复用则是将时间划分为一段段等长的时分复用帧（TDM 帧）。每一个时分复用的用户在每一个 TDM 帧中占用固定序号的时隙，也称为同步TDM。
- 每一个用户所占用的时隙是周期性地出现（其周期就是 TDM 帧的长度）。
- TDM 信号也称为等时(isochronous)信号。
- 时分复用的所有用户是在不同的时间占用同样的频带宽度。





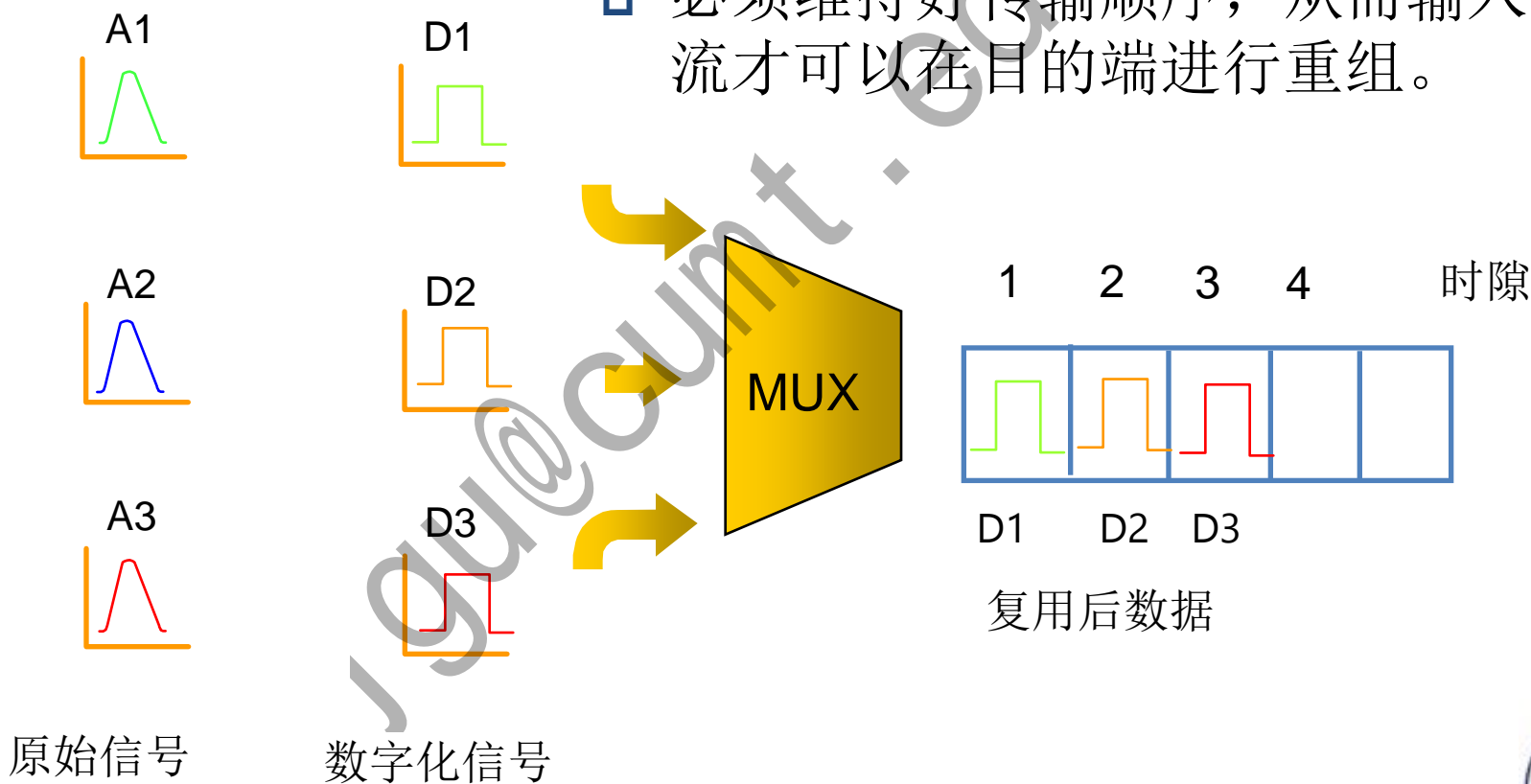
时分复用





时分多路复用适用于数字信号的传输

- 来自多个不同源的数据被分解为各个部分（位或位组），并且这些部分以规定的次序进行传输。
- 每个输入数据流即成为输出数据流中的一个“时间片段”。
- 必须维持好传输顺序，从而输入数据流才可以在目的端进行重组。

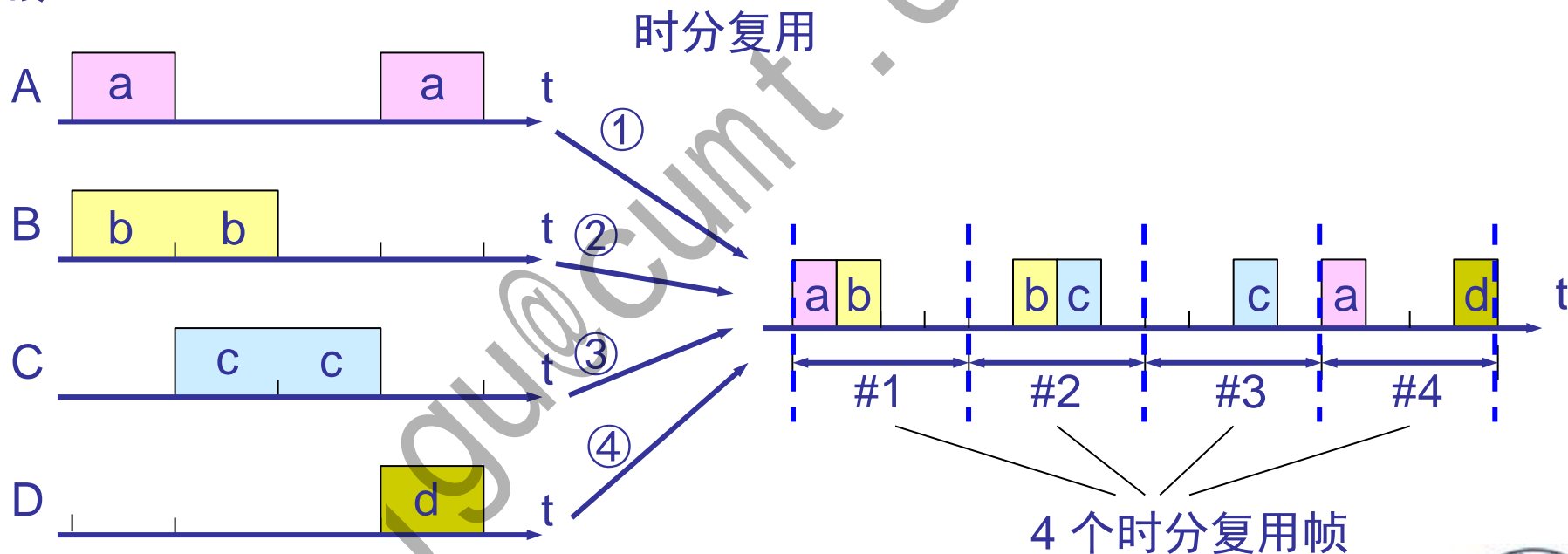




时分复用可能会造成线路资源的浪费

使用时分复用系统传送计算机数据时，
由于计算机数据的突发性性质，用户对
分配到的子信道的利用率一般是不高的。

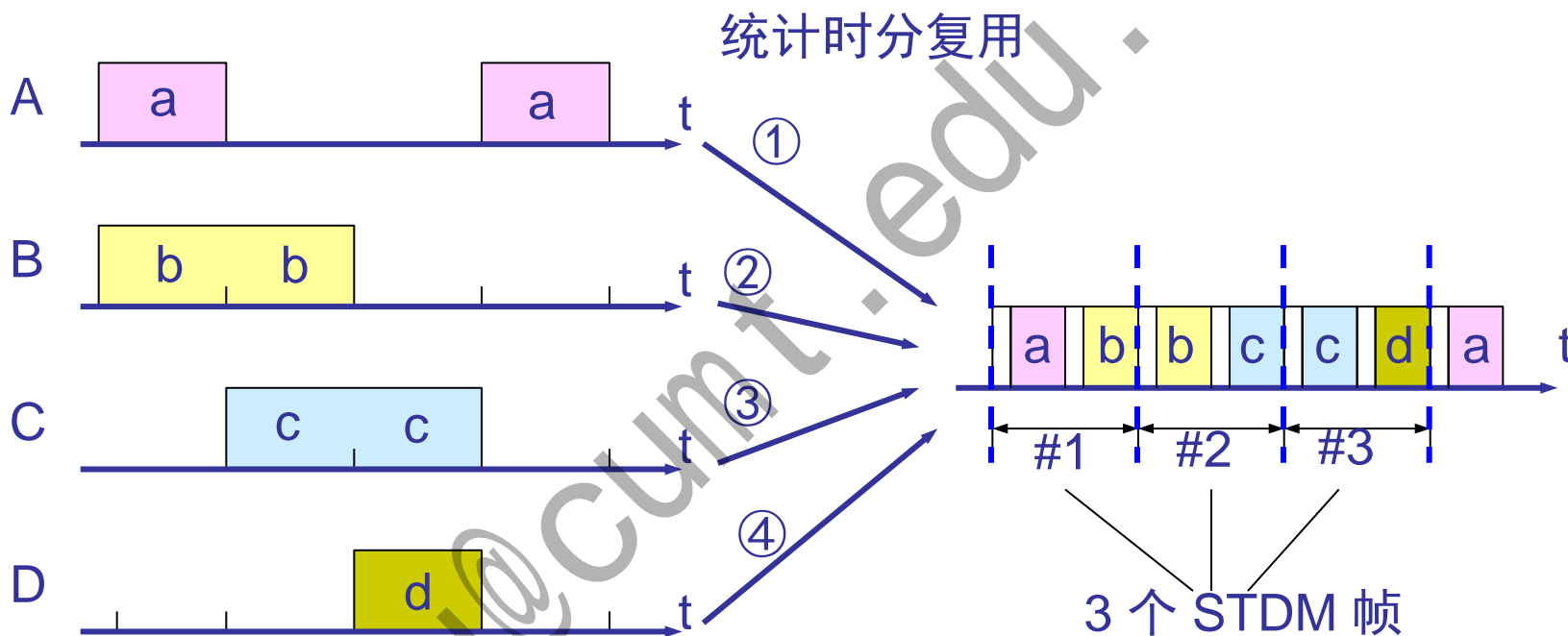
用户





统计时分复用 STDM (Statistic TDM)

用户



统计时分复用 STDM也称为异步TDM(Asynchronous TDM)





码分复用 CDM(Code Division Multiplexing)

- 每个用户使用不同的码字。这些码字在频率和时间上都可能重叠(如同时同频),但是不会造成干扰。
 - 这种以不同码字区分不同用户的方法,称之为码分多址 CDMA (Code Division Multiple Access), 是第三代蜂窝移动通信系统(3G)普遍采用的多址技术,用来区别不同手机用户。
- CDMA之母: 海蒂 拉玛(Hedy Lamarr)。1940年,与安塞尔一同发明了能够抵挡电波干扰的军事通讯系统,它就是“扩频通讯技术”,也就是CDMA的前身。



Baidu 百科





码片序列(chip sequence)

- 每一个比特时间划分为 m 个短的间隔，称为码片(chip)。
- 每个站被指派一个唯一的 m bit 码片序列。
 - 如发送比特 1，则发送自己的 m bit 码片序列。
 - 如发送比特 0，则发送该码片序列的二进制反码。
- 通常 m 值为 64 或 128，这里使用 $m = 8$ 来举例





码片序列(chip sequence)

- 例如，S 站的 8 bit 码片序列是 **00011011**。
 - 发送比特 1 时，就发送序列 00011011，
 - 发送比特 0 时，就发送序列 11100100。
- 惯例将0写为 -1，将1写为 +1
- S 站的码片序列：**(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)**



我发信息给你时，约定好 00011011代表1
11100100 代表0，别人不知道



哦，好的





码片序列的正交关系

- 每个站分配的码片序列不仅必须**各不相同**，并且还必须**互相正交**(orthogonal)。
 - 在实用的系统中是使用**伪随机码序列**。
- 令向量 **S** 表示站 **S** 的码片向量，令 **T** 表示其他任何站的码片向量。
- 两个不同站的码片序列正交，就是向量 **S** 和 **T** 的规格化**内积**(inner product)都是 0:

$$\mathbf{S} \bullet \mathbf{T} \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0$$





码片序列的正交关系举例

$$\mathbf{S} \bullet \mathbf{T} \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0$$

- 令向量 **S** 为 $(-1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1)$ ，
向量 **T** 为 $(-1 \ -1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1)$ 。

$$\sum \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad = 0$$

- 把向量 **S** 和 **T** 的各分量值代入内积公式
- 可看出这两个码片序列是正交的。





正交关系的另一个重要特性

- 任何一个码片向量和该码片向量自己的规格化内积都是1。

$$S \bullet S = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (+/-1)^2 = 1$$

- 一个码片向量和该码片反码的向量的规格化内积值是-1。

$$S \bullet (-S) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i (-S_i) = -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2 = -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (+/-1)^2 = -1$$





CDMA解码举例

- ◆ 当多个终端发送多个信号时，信号就会在空中叠加。
- ◆ 例如，终端A的码片序列是 $(-1, -1, -1, -1)$ ，
终端B的码片序列是 $(+1, -1, +1, -1)$ ，如果发送比特1，则空中叠加后变成 $(0, -2, 0, -2)$
- ◆ 接收方如果希望接收某个站点的信息，则只需要计算该站点对应的码片序列和空中信号的点积。
- ◆ 例如，接收方希望接收终端A的信息，则用终端A的码片序列与叠加后的空中信号进行点积
$$(-1, -1, -1, -1) \cdot (0, -2, 0, -2) = 1/4 * (0 + 2 + 0 + 2) = +1$$
- ◆ 如果接收方希望接收终端B的信息，则用终端B的码片序列与叠加后的空中信号进行点积，得到的信息也是比特1。





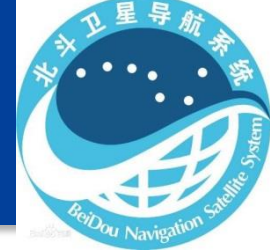
CDMA解码举例

- ◆ 例如，终端A的码片序列是 $(-1, -1, -1, -1)$
终端B的码片序列是 $(+1, -1, +1, -1)$
- ◆ 如果终端A发送的是比特0，终端B发送的是比特1，那么空中信号将是 $(+1, +1, +1, +1)$ 和 $(+1, -1, +1, -1)$ ，叠加后变成 $(+2, 0, +2, 0)$
- ◆ 则识别A发送信息的点积将是
$$\begin{aligned} & (-1, -1, -1, -1) \cdot (+2, 0, +2, 0) \\ &= 1/4 * (-2 + 0 + -2 + 0) \\ &= -1 \end{aligned}$$
- ◆ 表示终端A发送的是比特0。

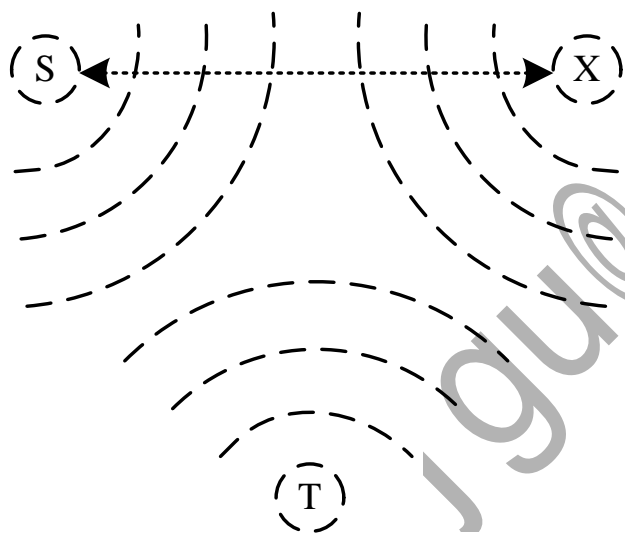




CDMA数据通信过程示例



- 假定在一个**CDMA**系统中有三个站**X**、**S**、**T**在互相通信，并且所有的站利用**全球定位系统GPS**对所发送的码片序列进行同步，即所有的码片序列都在同一个时刻开始。

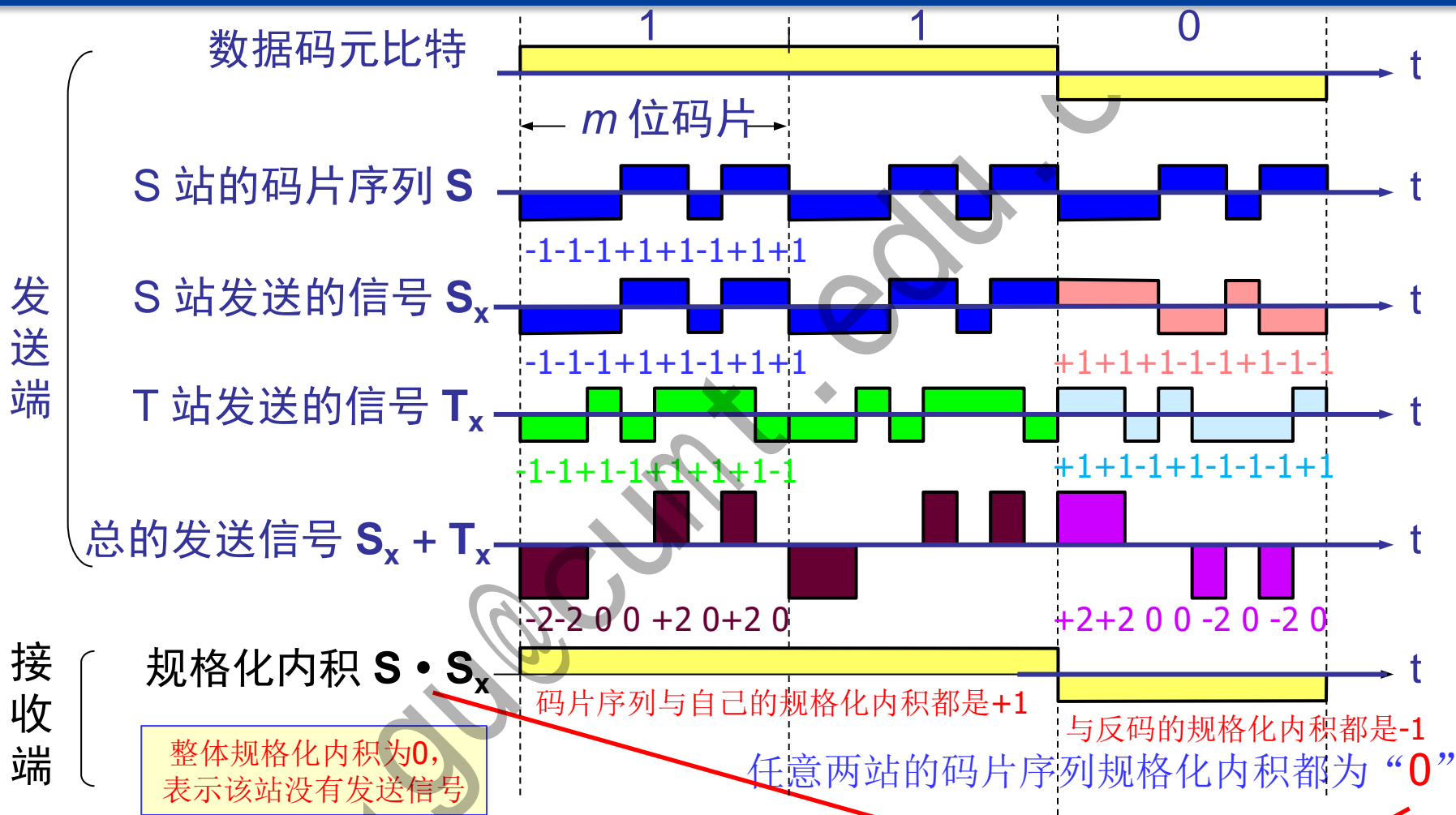


- 设各自的码片向量为**X**、**S**、**T**，均有三种工作状态：
 - 发送比特**1**，即发送本站的码片序列；
 - 发送比特**0**，即发送该站码片序列的二进制反码；
 - 什么也不发送，即相当于没有数据发送。





CDMA 的工作原理 (m=8)



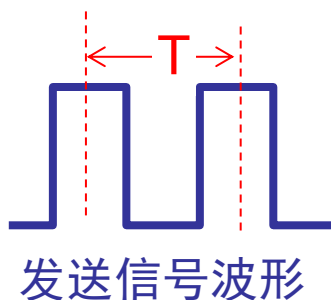
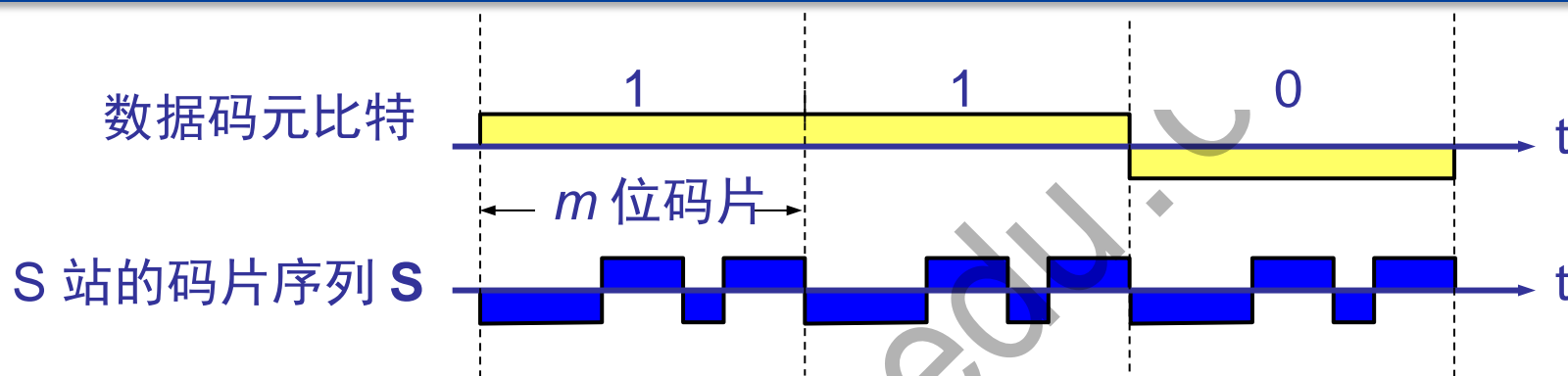
如果接收端打算接收S站发送的信号，则用码片序列S与接收到的信号逐比特做规格化内积

$$S \cdot (S_x + T_x) = S \cdot S_x + S \cdot T_x = S \cdot S_x$$

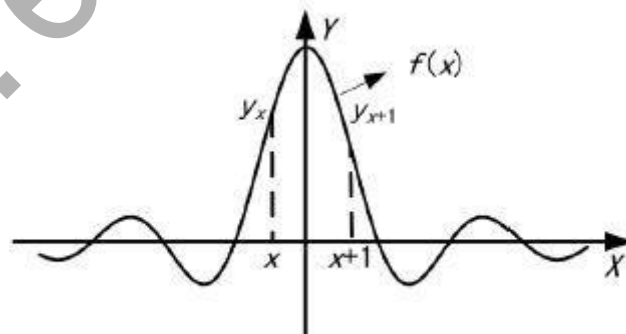




码片序列实现了扩频



$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$



矩形脉冲的振幅频谱图

- 假定S站要发送信息的数据率为 b bit/s。由于每一个比特要转换成 m 个比特的码片，因此 S 站实际上发送的数据率提高到 mb bit/s。同时脉冲周期 T 降低为 T/m ，信号的频率范围扩大 m 倍，因此 S 站所占用的频带宽度也提高到原来数值的 m 倍。





时分、频分和码分复用

- 时分复用TDM

- 时分复用降低了每个用户的平均数据传输速率，因为在大多数时候用户并不能进行通讯而必须等轮到自己时才能进行数据传输。

- 频分复用FDM

- 每个用户只能获得一部分频谱资源，虽然多个用户可以同时通讯但是每个用户无法做到全速传输。

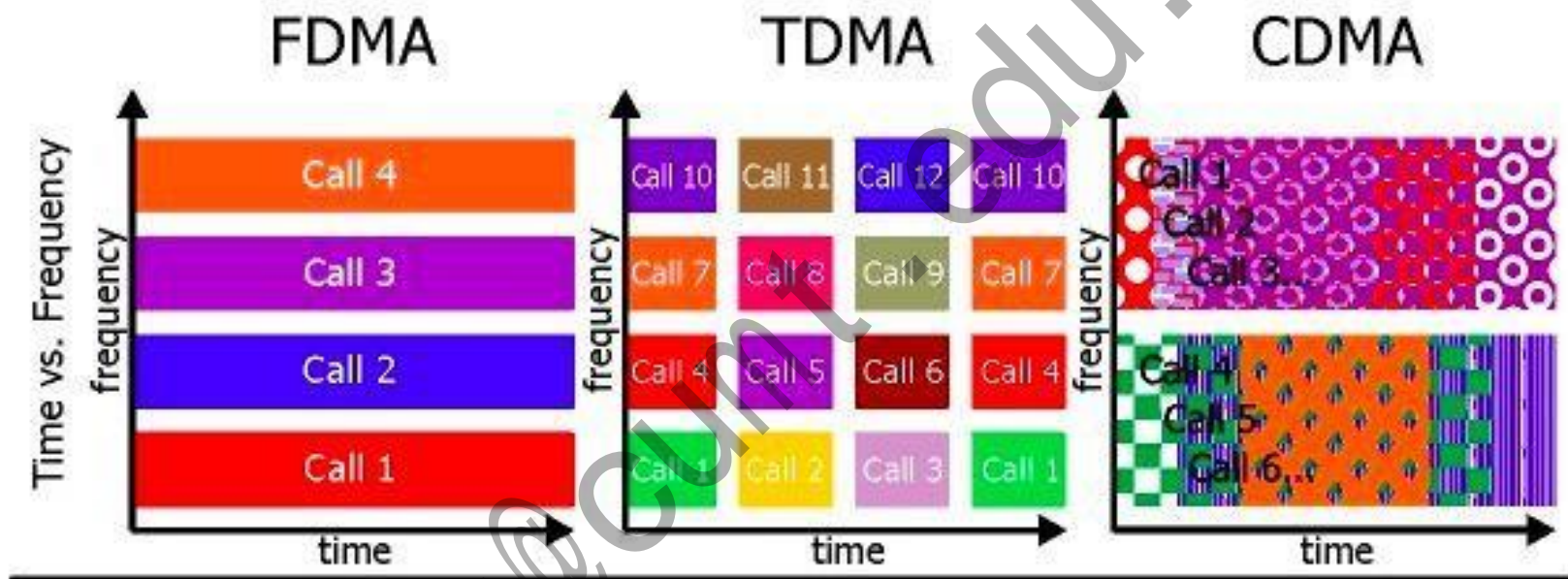
- 码分复用CDMA

- 码分复用抗干扰能力很强，然而用户需要传输 m 比特码片才能真正传输1比特数据，因此效率并不高。





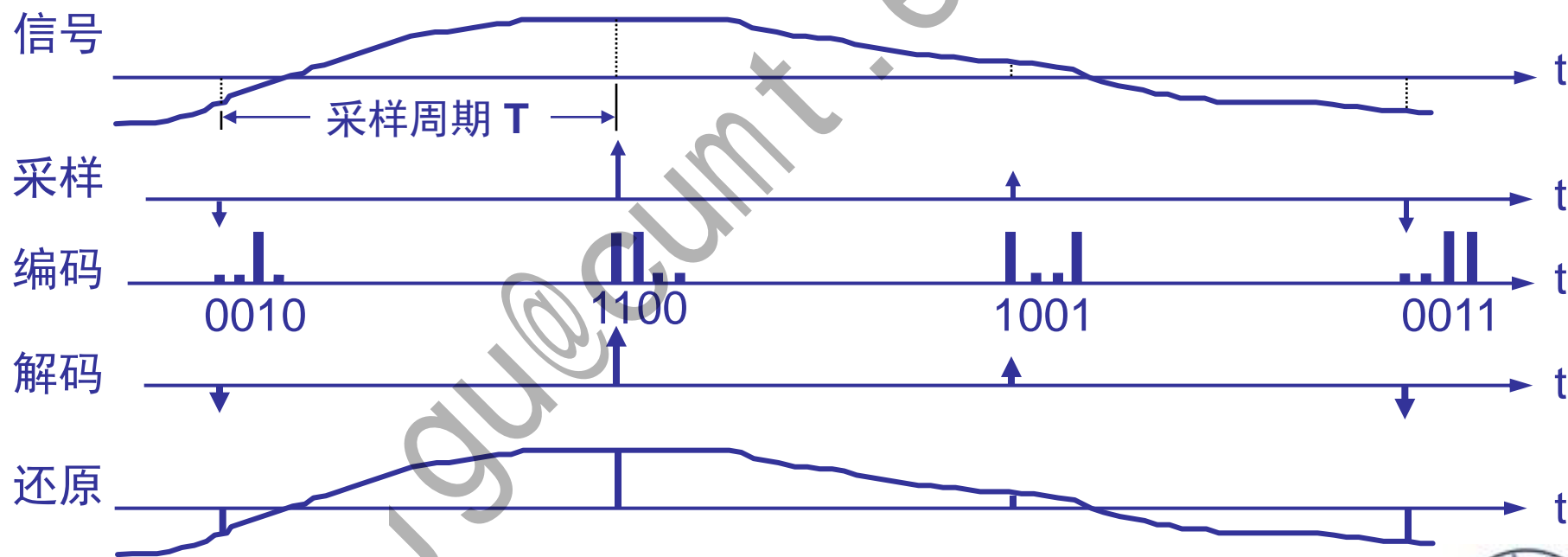
时分、频分和码分复用





Q14: 如何优化数字传输系统?

- 现在的数字传输系统均采用脉码调制 PCM (Pulse Code Modulation)体制。





PCM的时分复用通信

- 为了有效地利用传输线路，通常总是将多个话路的PCM信号用**时分复用TDM**的方法封装成帧格式，然后再送往线路上一帧接一帧的传输。
- 在使用PCM的时分复用通信中（这种通信都采用同步通信方式），接收端仅仅能够正确接收比特流是不够的。
- 接收端还必须准确地将一个个时分复用帧区分出来。因此要利用特殊的时隙（包含有一些特殊的比特组合），使接收端能够把每一个时分复用帧的位置确定出来。这也叫做**帧同步**。





T标准和标准

- 由于历史上的原因，PCM 有两个互不兼容的国际标准：
 - T-标准(A律)
 - 北美、日本
 - 24路PCM，即 T_1 标准
 - E-标准(μ 律)
 - 欧洲、中国、南美
 - 30路PCM，即 E_1 标准

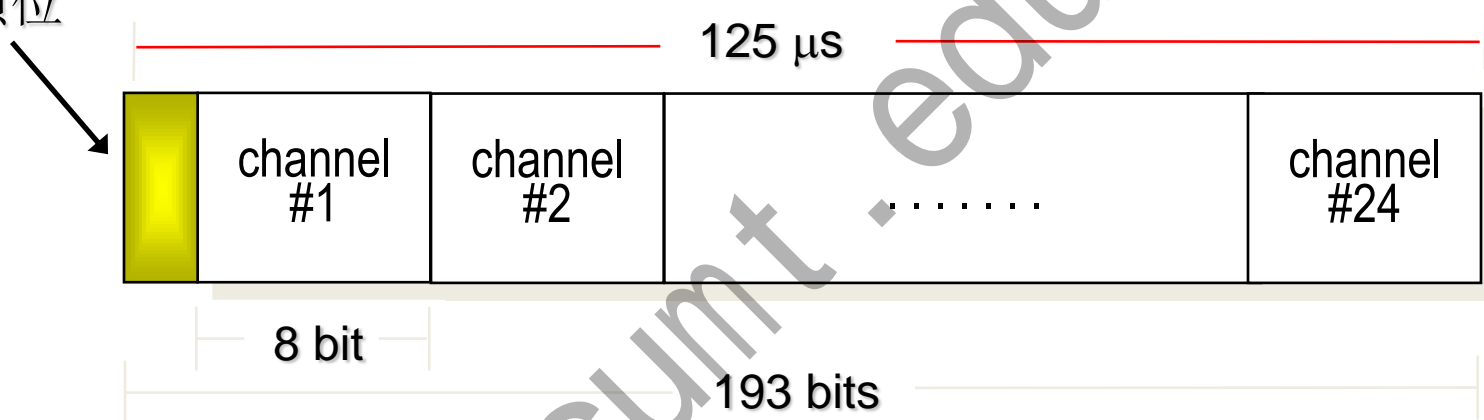




T1 帧

- 24路复用

定帧位

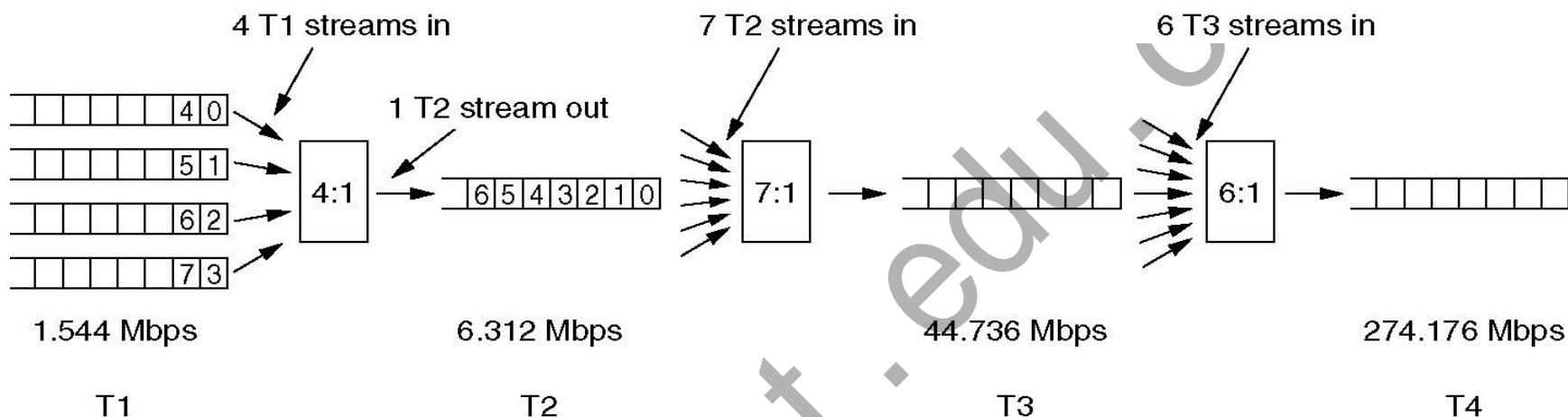


$$\text{数据率} = (24 \times (7 + 1) + 1 \text{ bit}) / 125 \mu\text{s} = 1.544 \text{ Mbps}$$





多条T1线路复用到更高速率的载波



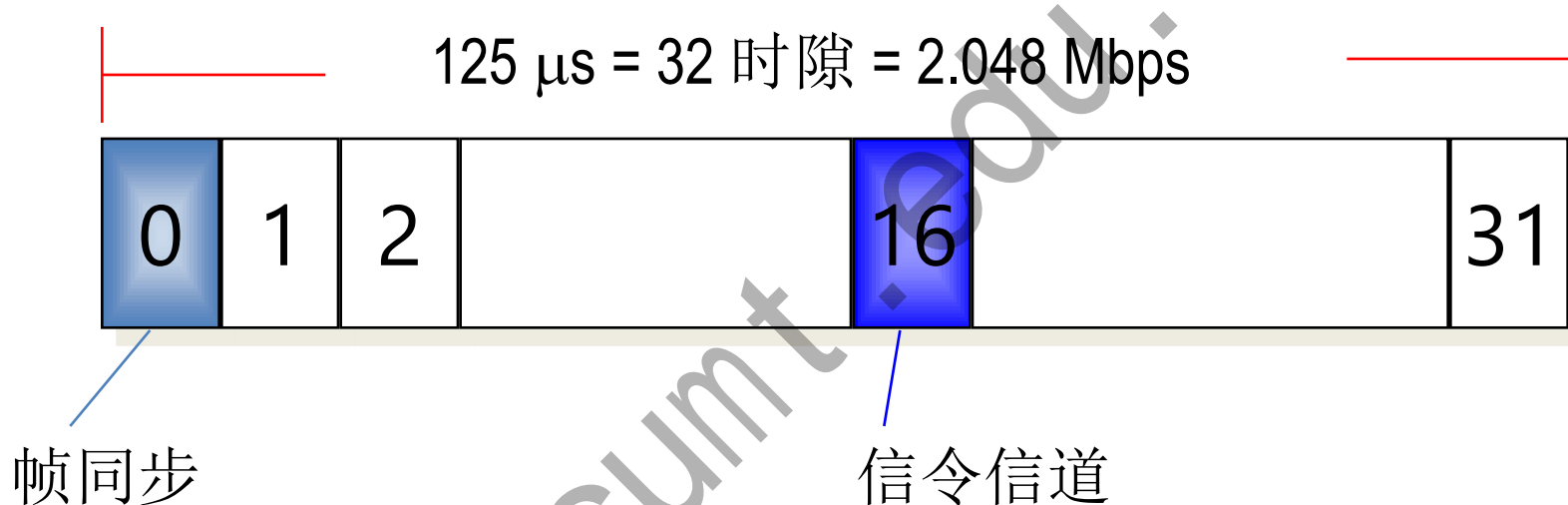
- ◆ **数字复接系列形成的原则**：先把一定路数的数字电话信号复合成一个标准的数据流，该数据流称为**基群**；然后再用数字复接技术将基群复合成更高速的数据信号。
- ◆ 在数字复接系列中，按传输速率的不同，分别将相应的数据流称为**基群**、**二次群**、**三次群**和**四次群**等，每一种群路均可传送各种数字信号。





E1-帧

- 30路复用



30个话音信道 + 2个控制信道

$$\text{E1速率} = (32 \times 8 \text{bit}) / 125 \text{ ms} = 2.048 \text{ Mb/s}$$





旧的PCM数字传输系统存在许多缺点

- 一、速率标准不统一
 - 如果不对高次群的数字传输速率进行标准化，国际范围的高速数据传输就很难实现。





旧的PCM数字传输系统存在许多缺点

• 二、不是真正的同步传输

- 在过去相当长的时间，为了节约经费，各国的数字网主要是采用准同步方式。
- 采用准同步数字系列(Plesiochronous Digital Hierarchy, PDH)的系统，是在数字通信网的每个节点上都分别设置高精度的时钟，这些时钟的信号都具有统一的标准速率。尽管每个时钟的精度都很高，但总还是有一些微小的差别。为了保证通信的质量，要求这些时钟的差别不能超过规定的范围。严格来说不是真正的同步，所以叫做“准同步”。
- 低速时收发双方时钟频率的微小差异影响不大，高速时问题就严重了。





Q15: 现代数字传输系统技术?

- 同步：步调一致，通信上指频率相同、相位相同、定时相同
 - 载波同步：获取同频同相的解调载波
 - 位同步：只在数字通信系统中存在，无论是基带传输还是频带传输都是存在位同步的
 - 帧同步：通过标志区分各帧的起止时刻
 - **网同步**：不同于上述三种，在两点之间的通信网同步指的是各个节点的定时信号（即时钟信号）应当符合一定的时间关系，使网络处于同步运行状态





同步网

- 时钟性能是影响设备性能及网络通信质量的一个重要因素。
- 由单一基准时钟控制的称为同步网
 - 同步光网络SONET
 - 同步数字传输体系SDH
- 同步网是保证通信网络同步性能的一个重要支撑网，是电信三大支撑网之一，由节点时钟和传递同步定时信号的同步链路构成，解决准同步问题。
 - 同步网的作用是准确地将同步定时信号从基准时钟传送到同步网的各个节点，调整网中的各时钟并保持信号同步，满足通信网传输性能和交换性能的需要。





同步光纤网 SONET

- 同步光纤网 SONET (Synchronous Optical Network) 的各级时钟都来自一个非常精确的主时钟。
 - 1985年, Bellcore提出SONET(Synchronous Optical Network同步光纤网)标准;
 - 1988年, 美国国家标准协会 (ANSI) 首先推出了这个在光纤传输基础上的数字传输标准;
 - 整个同步网的主时钟通常采用昂贵的铯原子钟, 其精度优于 $\pm 1 \times 10^{-10}$ 。
- SONET为光纤传输系统定义了同步传输的线路速率等级结构, 第 1 级同步传送信号 STS-1 (Synchronous Transport Signal) 的传输速率是 51.84 Mb/s, 对光信号则称为第 1 级光载波 OC-1, OC 表示 Optical Carrier。





同步数字系列 SDH

- 1988年，国际电报电话咨询委员会CCITT（现在的ITU-T）接受SONET概念，以美国标准 SONET 为基础，制订了SDH(Synchronous Digital Hierarchy, 同步数字系列)标准，使之成为不仅适于光纤、也适于微波和卫星传输的通用技术体制，与SONET有细微差别。
- 一般可认为 SDH 与 SONET 是同义词。
- SDH 的基本速率为 155.52 Mb/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。
- SDH的帧结构以STM-1为基础，更高的等级是使用 N 个STM-1复用组成STM- N 。





SONET 的 OC 级/STS 级与 SDH 的 STM 级的对应关系

线路速率 (Mb/s)	SONET 符号	ITU-T 符号	表示线路速率 的常用近似值
51.840	OC-1/STS-1	—	
155.520	OC-3/STS-3	STM-1	155 Mb/s
466.560	OC-9/STS-9	STM-3	
622.080	OC-12/STS-12	STM-4	622 Mb/s
933.120	OC-18/STS-18	STM-6	
1244.160	OC-24/STS-24	STM-8	
2488.320	OC-48/STS-48	STM-16	2.5 Gb/s
4976.640	OC-96/STS-96	STM-32	
9953.280	OC-192/STS-192	STM-64	10 Gb/s
39813.120	OC-768/STS-768	STM-256	40 Gb/s





SDH/SONET传输网

- SDH/SONET定义了标准光信号，规定了波长为1310nm和1550nm的激光源。
- SDH/SONET传输网是一种基于SDH/SONET 标准的同步TDM多路复用网络，可以方便的为其它业务网络提供各种所需带宽的电路，并复用底层传输媒体的带宽，其中最典型的传输媒体就是光纤。
 - 例如，SDH/SONET传输网可以很方便地为两个因特网主干路由器之间提供一条点对点的高速链路。
- 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，已成为全球公认的数字传输网体制的标准，是当前因特网提供点对点远程高速链路的重要技术。

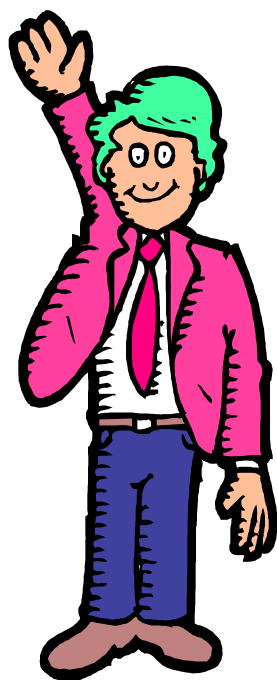




光网络

- 传统的SDH/SONET传输网络由光传输系统和交换结点的电子设备组成。
- 光纤用于两个交换结点之间的点对点的数据传输。
- 在每个交换结点中，光信号都被转换成电信号后再进行交换处理。
- 随着波分复用WDM和光交换技术的发展，人们提出全光网（All Optical Network, AON）的概念，用光网络结点代替原来交换结点的电子设备，组成以端到端光通道为基础的全光传输网，避免因光/电转换所带来的带宽瓶颈，充分发挥光传输系统的容量和光结点的巨大处理能力。





**THANK
YOU!**

