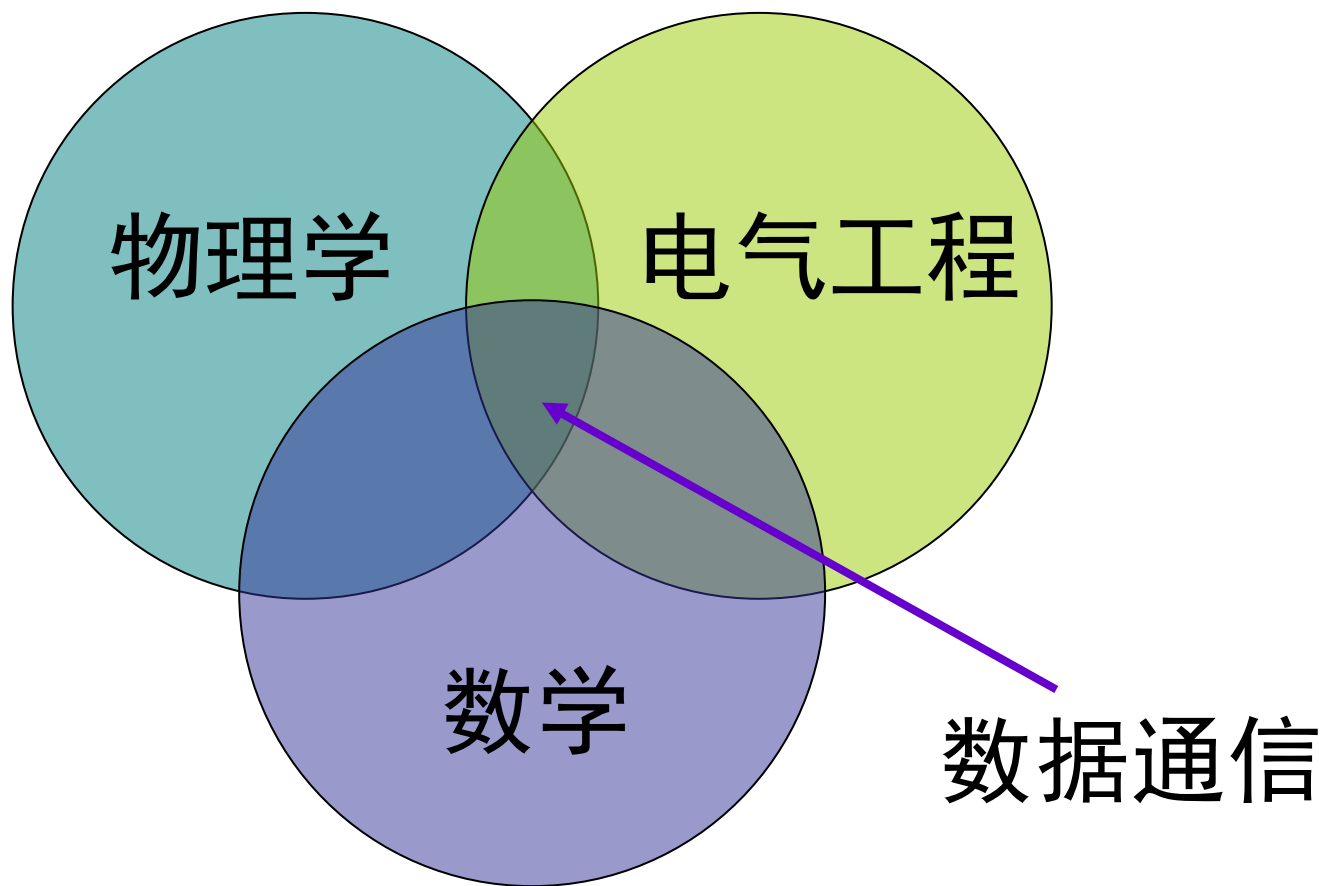


第二章 数据通信基础

- 2.1 数据通信系统
- 2.2 信号和数据编码
- 2.3 线路配置和传输方式
- 2.4 多路复用技术
- 2.5 数据交换技术
- 2.6 错误检测和控制

2.1 数据通信系统

- 计算机网络技术是计算机技术和数据通信技术相结合的产物。



传输

■ 模拟传输：

- 指模拟数据的传输，不关心所传输信号的内容，只关心尽量减少信号的衰减和噪声。
- 长距离传输时，采用信号放大器，但同时也放大了信号中的噪声。

■ 数字传输：

- 指数字数据的传输，关心信号的内容。可以是数字信号传输，也可以是模拟信号传输。
- 长距离传输时，采用转发器，可以消除噪声的累积。

数字通信系统特点

■ 优点：

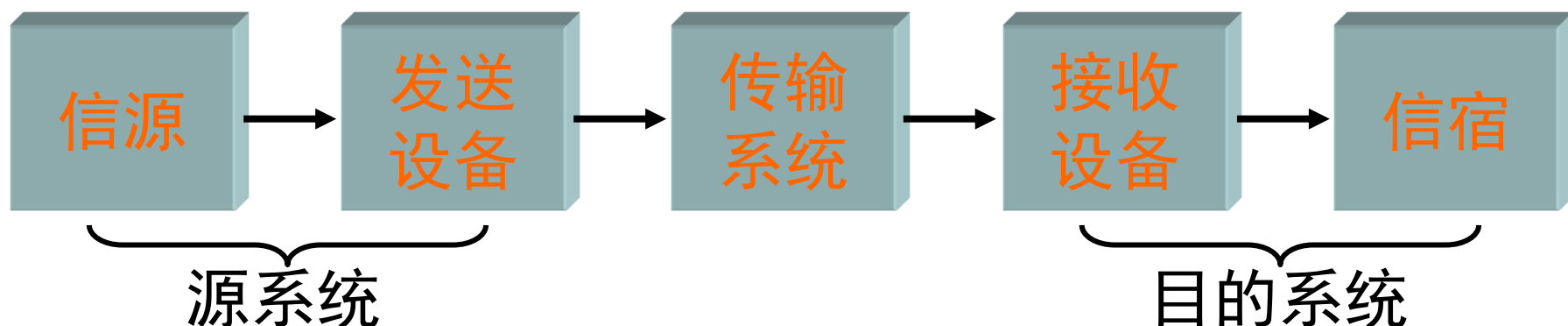
- 抗干扰能力强
- 可实现高质量、远距离通信
- 能适应各种通信业务
- 能实现高保密通信
- 通信设备集成化、微型化

■ 最大缺点： 占用频带宽

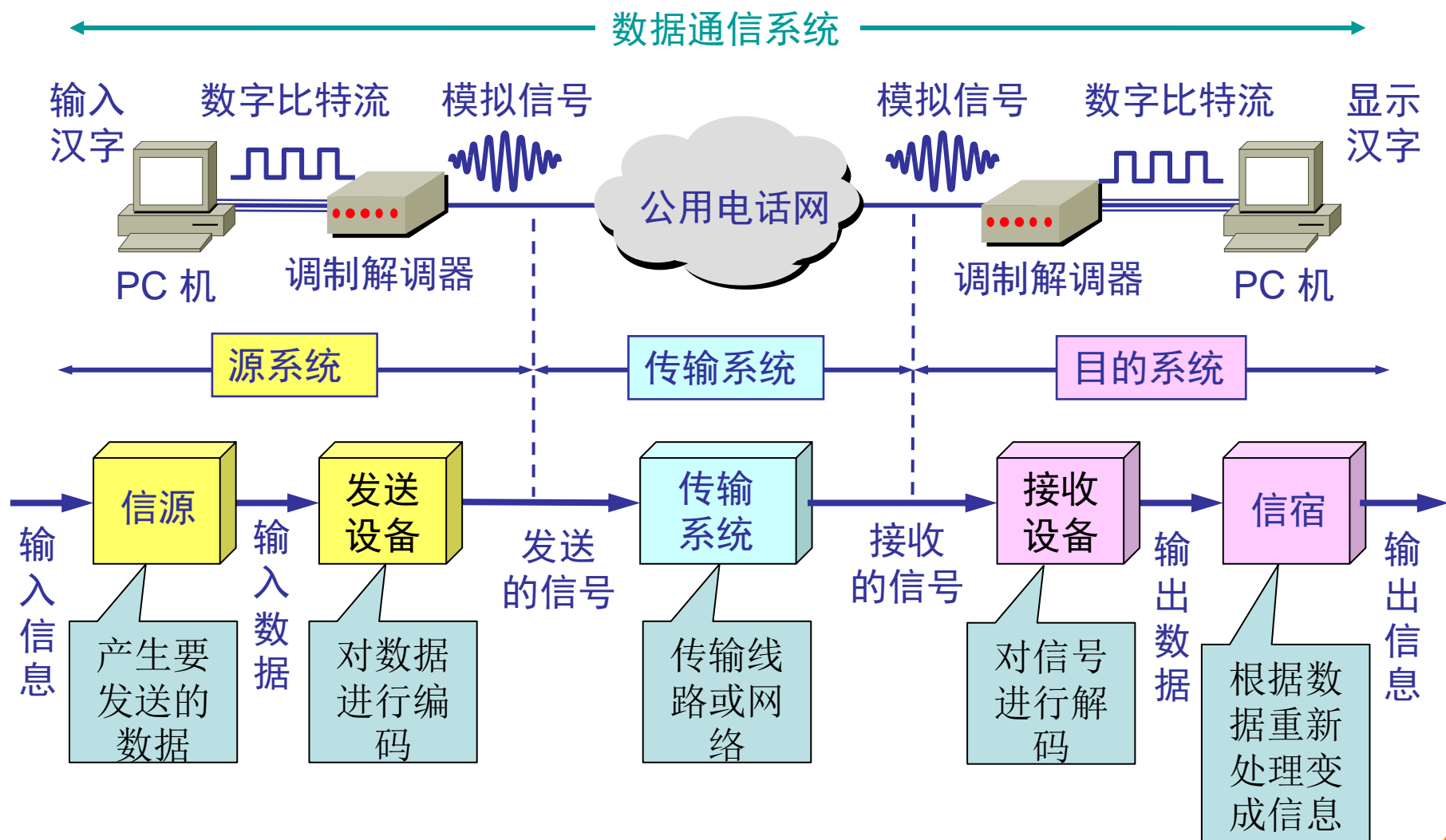
- 例如模拟电话4kHz，数字电话64Kbps。

2.1.1 数据通信系统的组成

- 信源：产生要发送数据的设备
 - 发送设备：对数据进行编码的设备
 - 传输系统：传输线路或网络
 - 接收设备：将接收的信号变成数据
 - 信宿：目的系统
- 源系统，对应资源子网
- 对应通信子网
- 目的系统，对应资源子网



数据通信系统示例



2.1.2 数据通信系统应解决的主要问题

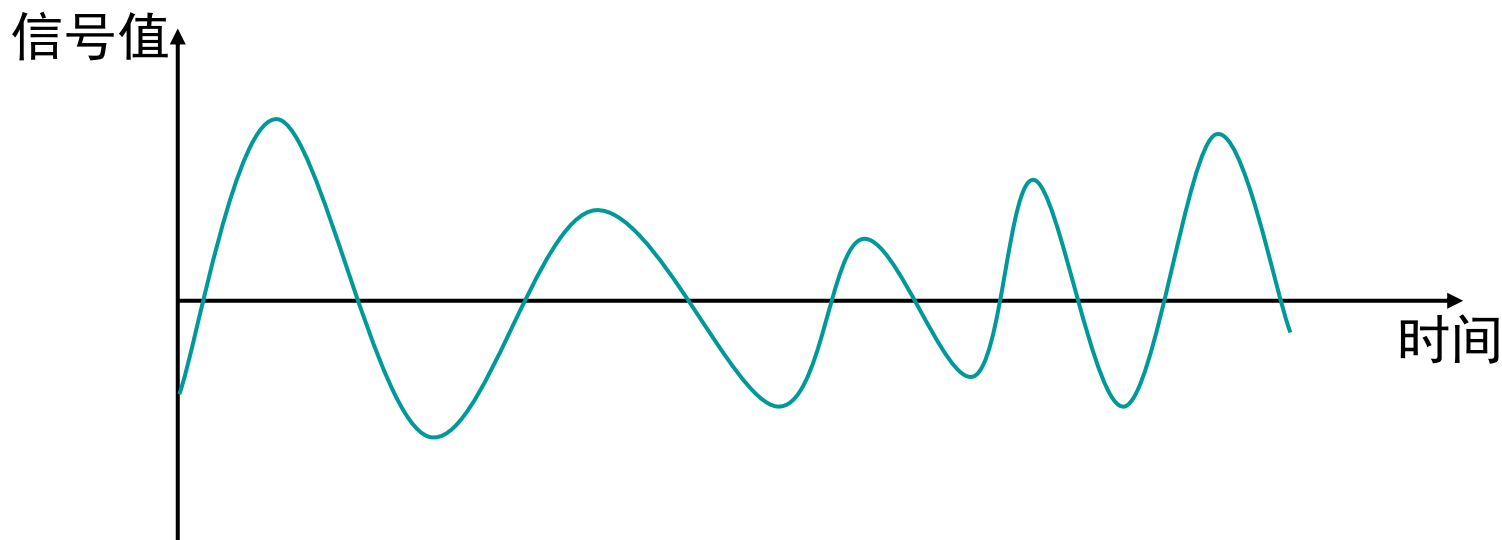
- 提高传输系统的利用率
- 接口、编码、同步
- 交换管理
- 差错控制
- 流量控制
- 寻址和路由
- 报文格式
- 网络管理

2.2 信号和数据编码

- 计算机网络中传送的信息是0、1的数字化信息，通过编码将数字信息变成电磁或光信号在传输媒体上传输。
- 表示数字信息的信号可是模拟信号也可以是数字信号。

2.2.1 模拟信号和数字信号

- **模拟信号**：随**时间**而**连续变化**的信号

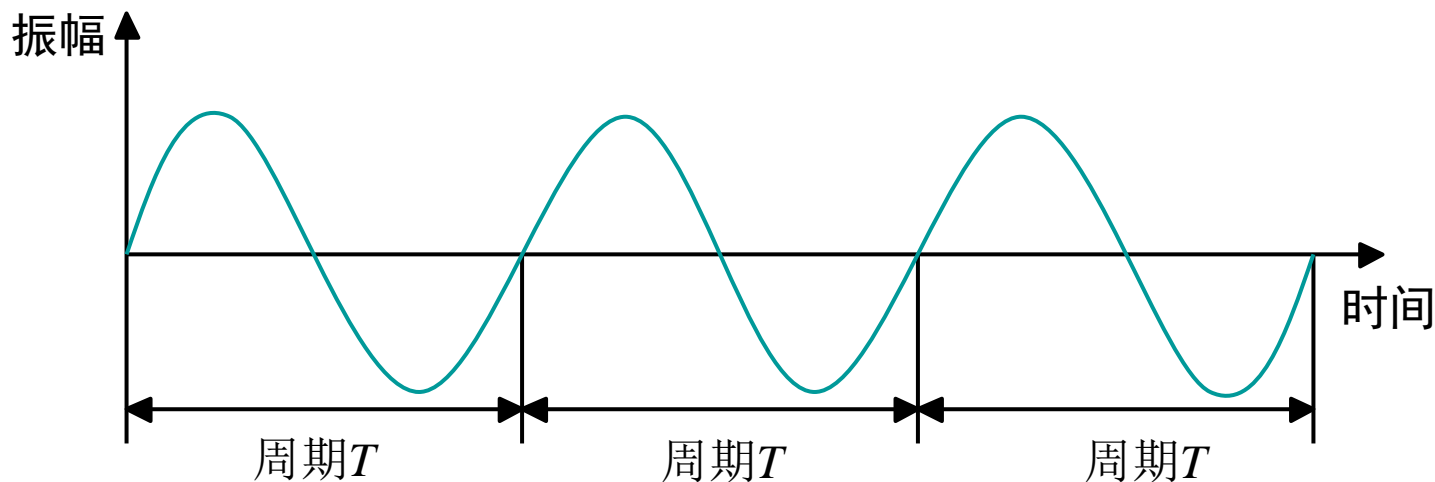


- **模拟信号**又可以分为**简单模拟信号**和**复杂模拟信号**

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

简单模拟信号

■ 简单模拟信号（正弦波信号）

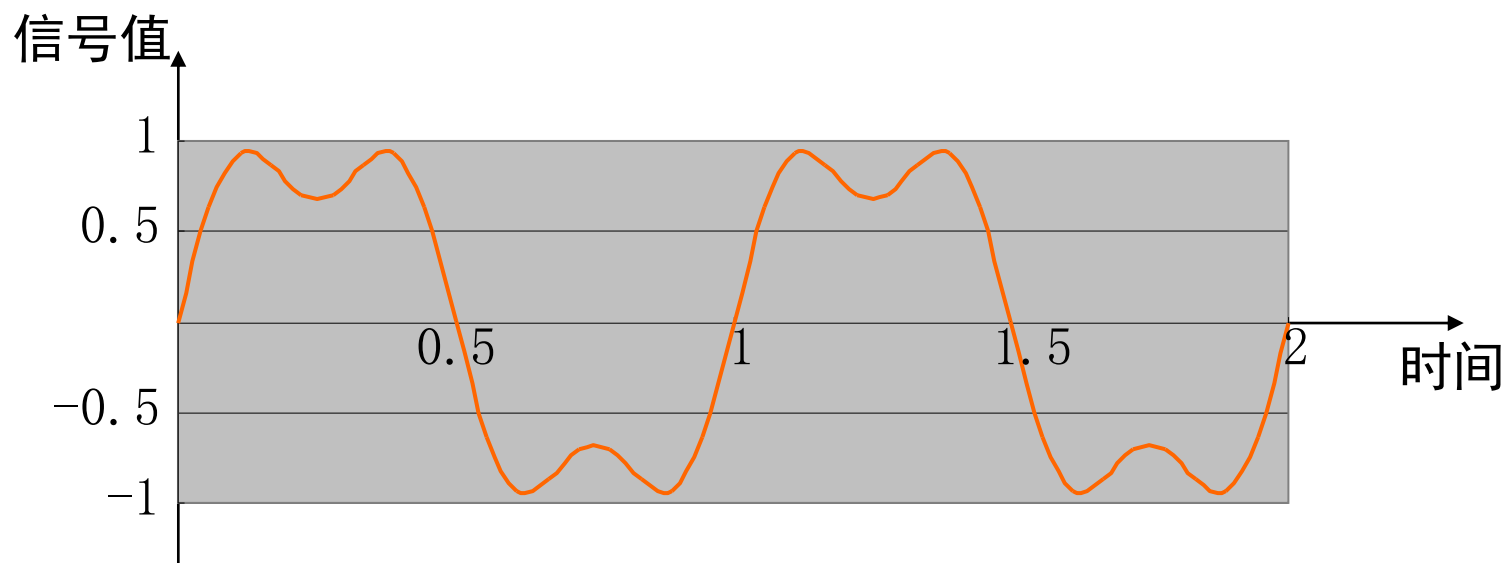


■ 数学表达式： $x(t)=A\sin(2\pi ft+\varphi)$

■ 三个参数：振幅 A ，频率 f ，相位 φ

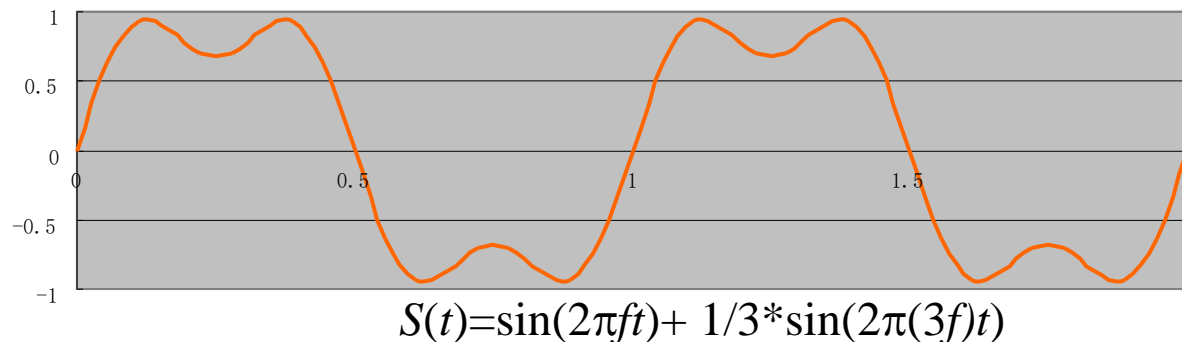
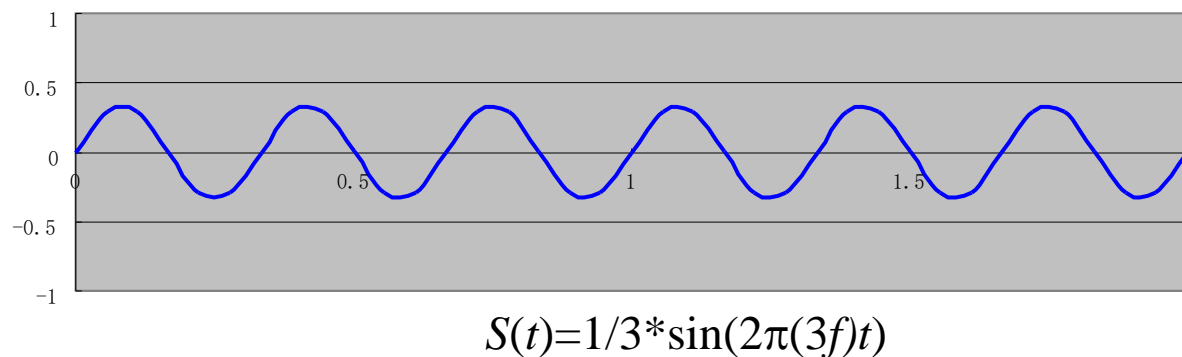
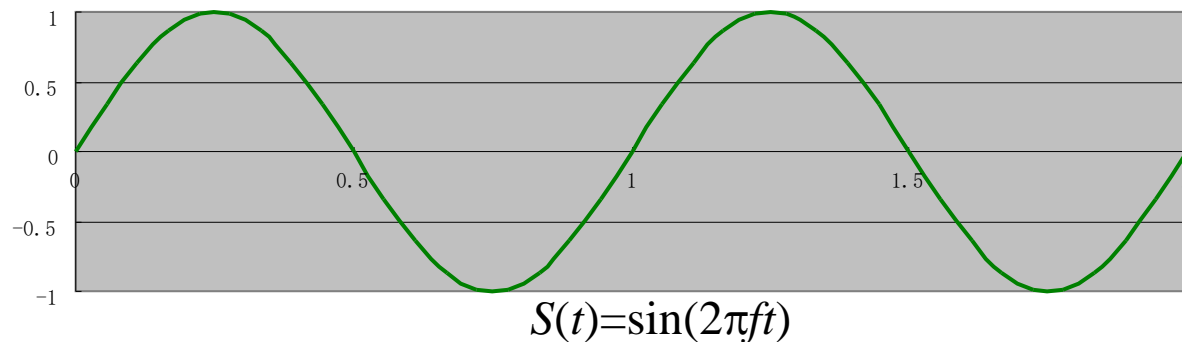
复杂模拟信号

■ 复杂模拟信号



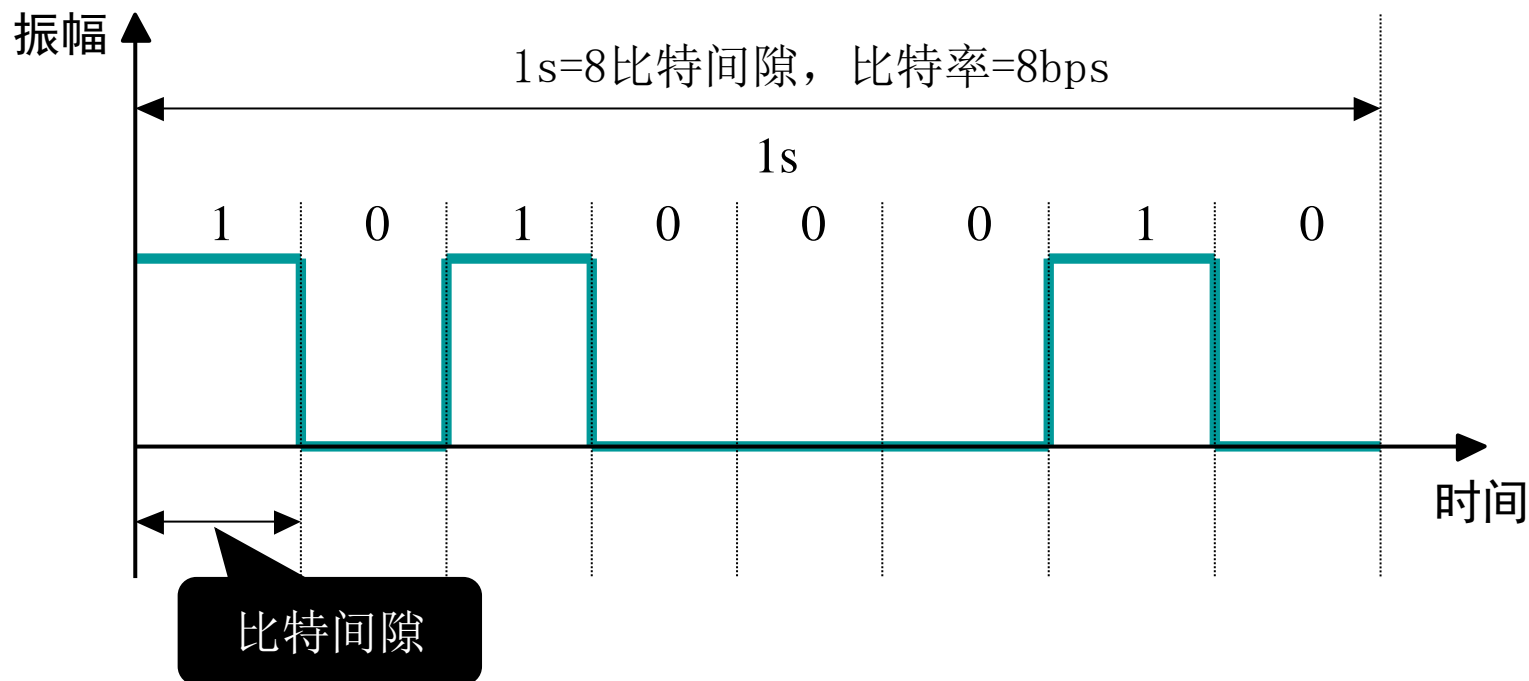
复杂模拟信号分解

- 复杂模拟信号可以被分解为多个正弦波的迭加



数字信号

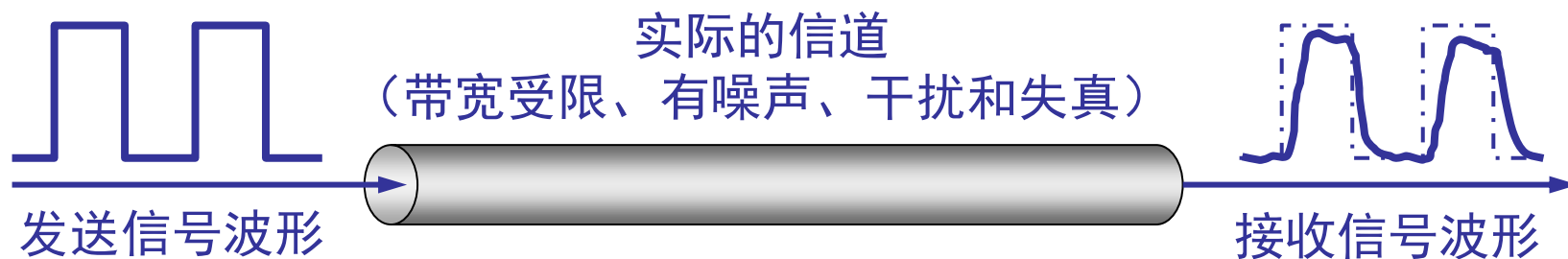
- 离散的、值的变化是瞬时发生的信号。



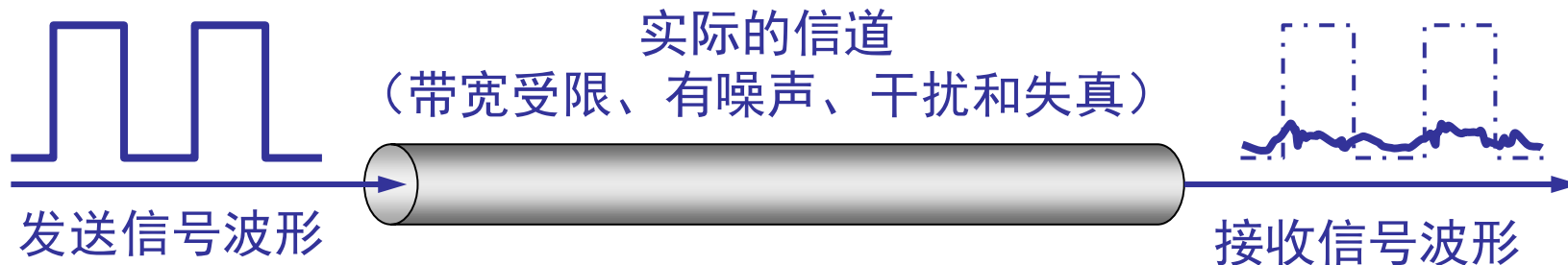
- 比特间隙：发送1比特所用时间
- 比特率：每秒钟发送的比特数，单位是bps

数字信号通过实际的信道

■ 有失真，但可识别



■ 失真大，无法识别



几个相关的概念

- **比特率S**: 每秒所发送比特数, 单位bit/s (bps)
- **码元**: 携带数据信息的信号单元叫码元
 - 在数字通信中常用时间间隔相同的符号来表示二进制数字。这样的时间间隔内的信号称为二进制码元, 这个间隔被称为码元长度。
- **波特率B**: 每秒通过信道传输的码元数称为码元速率 (信号数率), 简称波特率。单位波特(Baud)

几个相关的概念

在通信领域里，带宽通常用Hz表示；在计算机网络中，带宽通常用速度表示，单位为b/s

- **介质带宽(Hz)**：传输介质只能传输某些频率范围内的信号。
- **有效带宽(Hz)**：数字信号是由多个频率信号的叠加而成，如果只传输有重要振幅分量的频率信号，输出端能够以合理的精度恢复信号，则这个上限频率就是有效带宽。
- **信道**：表示向某一个方向传送信息的媒体
- **信道容量(bps)**：传输介质可以传输的最大比特率，依赖于编码技术。

奈氏准则

- 1924 年，奈奎斯特(Nyquist)就推导出了著名的奈氏准则。
- 奈氏准则给出了无噪声(理论状态)情况下波特率 B 与信道带宽 W 的关系：

$$B = 2 \times W \text{ (Baud)}$$

W 单位为赫兹(Hz)

比特率与波特率的关系

■ $S = B \times \log_2 N$ (N : 码元状态数)

$= 2 \times W \times \log_2 N (\text{bps或者bit/s})$

■ 例如:

■ 两相调制(单个调制状态对应1个二进制位)

比特率=波特率;

■ 四相调制(单个调制状态对应2个二进制位)

比特率=2*波特率

■ 八相调制(单个调制状态对应3个二进制位)

比特率=3*波特率

香农(Shannon)定理

- 实际的信道总是要受到噪声的干扰
- 香农定理：描述了有限带宽有随机热噪声信道的最大传输速率C与信道带宽和信号噪声功率比之间的关系。

$$C=W \times \log_2(1+S/N) \text{ (bps)}$$

其中：W是信道带宽，S是平均信号功率，N是平均噪声功率，信噪比(S/N)通常用分贝(dB)表示：

$$\text{信噪比}=10 \times \log_{10}(S/N) \text{ (dB)}$$

例题：

- 电话线的带宽为3.5kHz，每个码元可能取16个值，求最大的数据传输率？
- 电话系统模拟部分的典型参数：信噪比为30dB，带宽为3.5kHz，最大数据传输率为多少？

例题1：

- 电话线的带宽为3.5kHz，每个码元可能取16个值，求最大的数据传输率？
- 根据(Nyquist)定律：

$$\begin{aligned} S &= 2 \times W \times \log_2 N \\ &= 2 \times 3.5\text{k} \times \log_2 16 \\ &= 2 \times 3.5 \times 4 \\ &= 28\text{kbps} \end{aligned}$$

例题2:

- 电话系统模拟部分的典型参数：信噪比为30dB，带宽为3.5kHz，最大数据传输率为多少？

- 根据Shannon定理：

$$\begin{aligned}C &= W \times \log_2 (1 + S/N) \\&= 3.5\text{kHz} \times \log_2 (1 + 1000) \\&\approx 35\text{kbps}\end{aligned}$$

基带信号和带通信号

- 基带信号(即基本频带信号)—来自信源的信号，未进行频谱搬移和变换。
 - 像计算机输出的代表各种文字或图像文件的数据信号都属于基带信号。
 - 其特点是包含有较多的低频成分，甚至有直流成分，但许多信道并不能传输这种低频分量或直流分量。
 - 为了解决这一问题，发送设备产生一个高频信号作为基波来承载信息信号，这个基波就称为载波信号。
- 带通信号—使用载波信号传输基带信号的过程称为调制(modulation)。经过载波调制后的信号称为带通信号。

几种最基本的调制方法

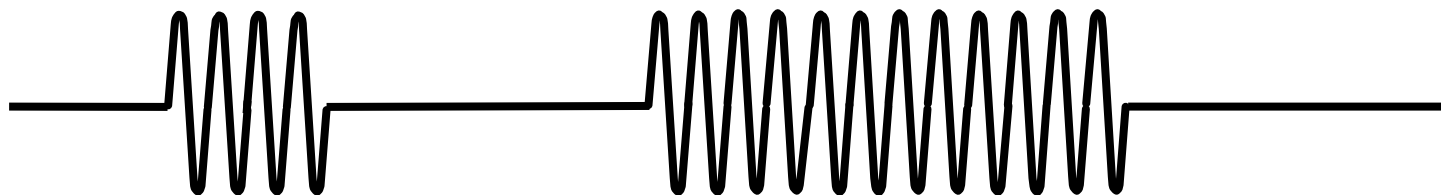
- 最基本的二元制调制方法有以下几种：
 - 调幅(AM)：载波的振幅随基带数字信号而变化。
 - 调频(FM)：载波的频率随基带数字信号而变化。
 - 调相(PM)：载波的初始相位随基带数字信号而变化。

对基带数字信号的几种调制方法

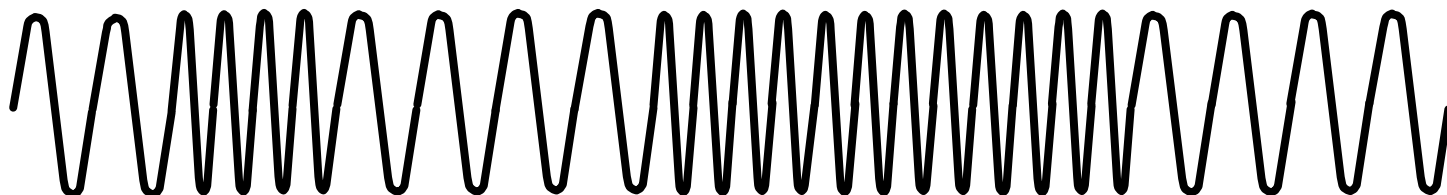
基带信号



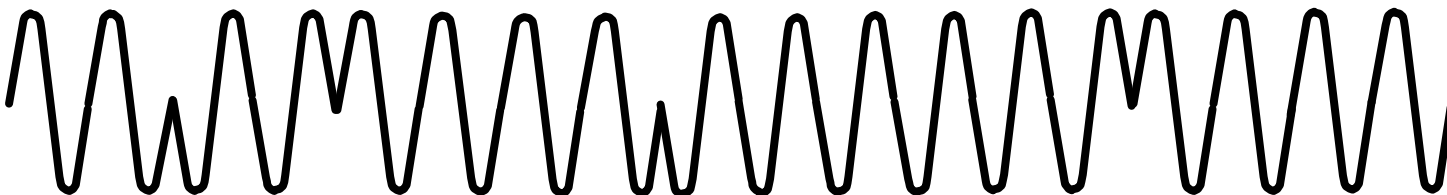
调幅



调频



调相



信息编码

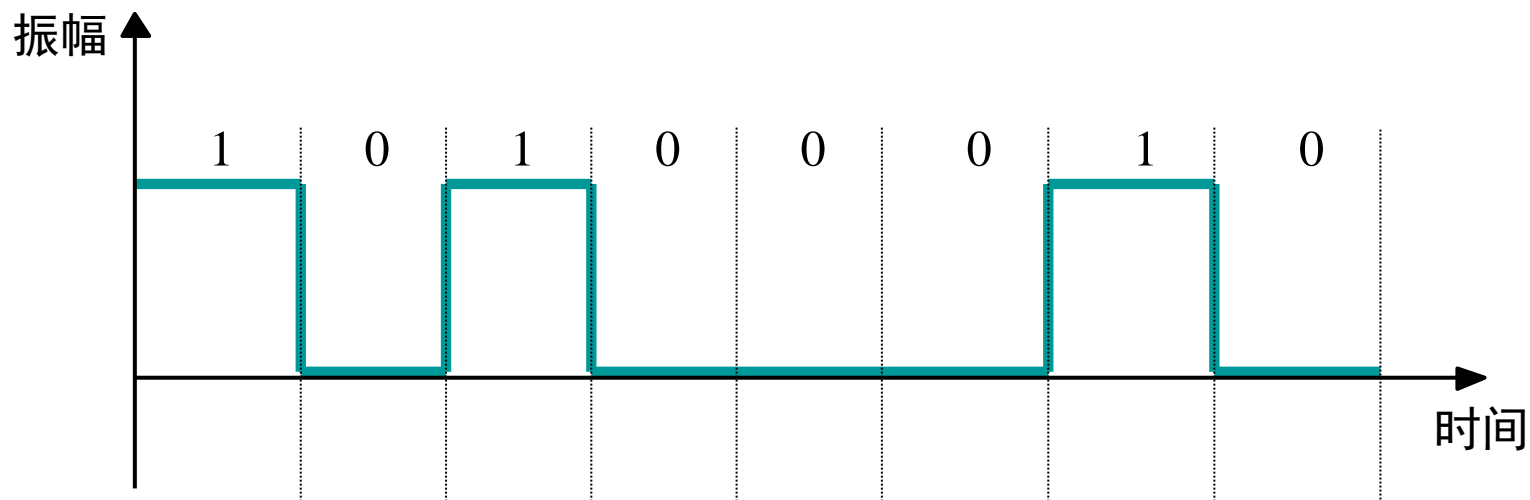
- 编码：将信息用信号来表示的方法。
- 信息有模拟信息和数字信息，信号有模拟信号和数字信号。所以编码的方式就有四种：
 - 数字→数字
 - 数字→模拟
 - 模拟→数字
 - 模拟→模拟

2.2.2 数字—数字编码

- 数字—数字编码就是用数字信号来表示数字信息。
- 在数字—数字编码形式下，由计算机产生的0、1比特序列被转换成一串可以在导线上传输的脉冲电压(有两种电压值)。
- 数字—数字编码有很多种，几种常见的：
 - 单极性编码
 - 极化编码
 - 双极性编码

单极性编码

- 电压是单极性，高电平表示1、低电平表示0。
- 缺点：
 - 有直流电平，要求带宽高
 - 无法同步，需依赖附加线。

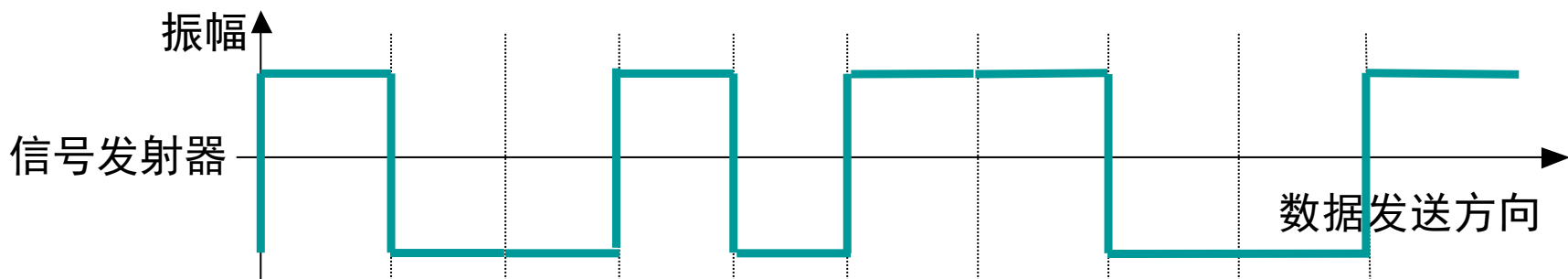


极化编码

- 极化编码采用两个电压：一个正电压，一个负电压。
- 通过使用两个电压，减轻了单极性编码中的直流分量问题。
- 极化编码最常见的有三种：
 1. 非归零编码(NRZ) { 非归零电平编码
非归零反相编码
 2. 归零编码(RZ)
 3. 双相位编码 { 曼彻斯特编码
差分曼彻斯特编码

非归零编码(Non-Return to Zero)

- **NRZ-L**(非归零**电平**编码): 信号的电平代表比特
- **NRZ-I**(非归零**反相**编码): **电平翻转代表1, 否则代表0**



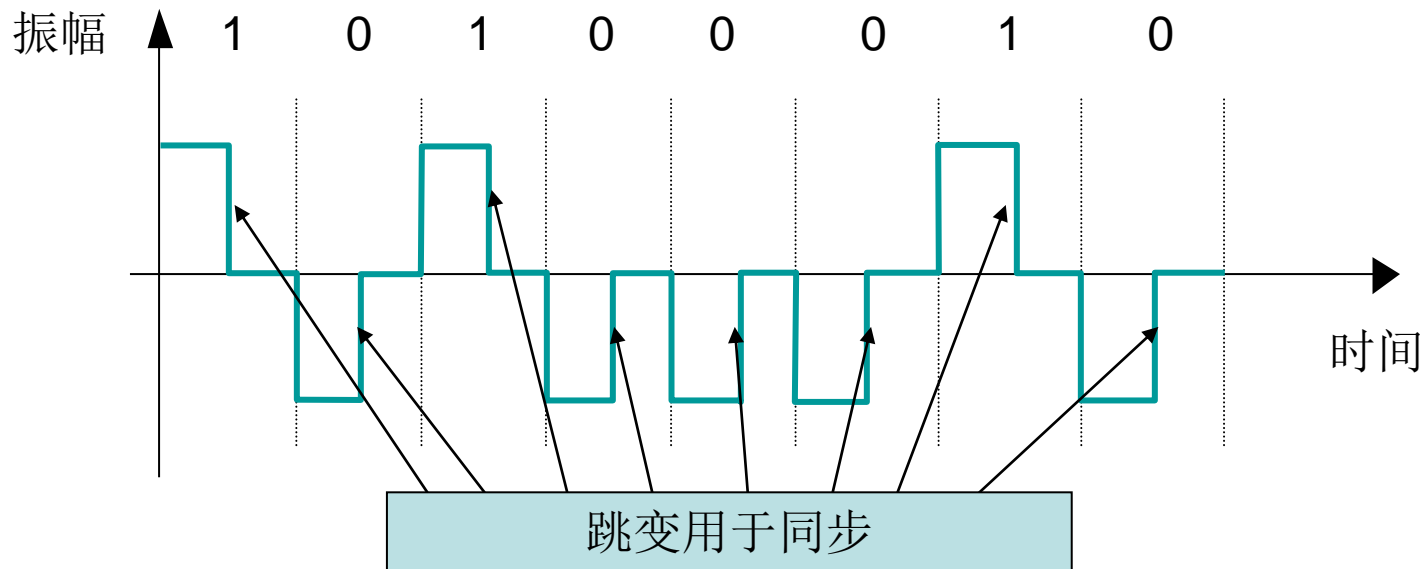
4B/5B编码

- 用5bit的二进制数来表示4bit二进制数，映射方式如右表所示
- 4位二进制共有16种组合，5位二进制共有32种组合，如何从32种组合中选取16种来使用呢？这里需要满足两个规则：
 - 每个5比特码组中不含多于3个“0”
 - 或者5比特码组中包含不少于2个“1”

十进制数	4位二进制数	4B/5B码
0	0000	11110
1	0001	01001
2	0010	10100
3	0011	10101
4	0100	01010
5	0101	01011
6	0110	01110
7	0111	01111
8	1000	10010
9	1001	10011
10	1010	10110
11	1011	10111
12	1100	11010
13	1101	11011
14	1110	11100
15	1111	11101

归零编码(Return to Zero)

- 使用3个电平：正电平、负电平和零
- 在每个比特间隙的中间，信号将归零
- 正电压到零的跳变代表1，负电压到零的跳变代表0，比特中间的跳变可用于同步



双相位编码

- 双相位编码中，信号在每比特间隙的中间发生改变但并不归零，而是转为相反的一极。每个比特中间的跳变可用于同步。
- 双相位编码两种方式：
 - 曼彻斯特编码
 - 差分曼彻斯特编码

曼彻斯特编码与差分曼彻斯特编码

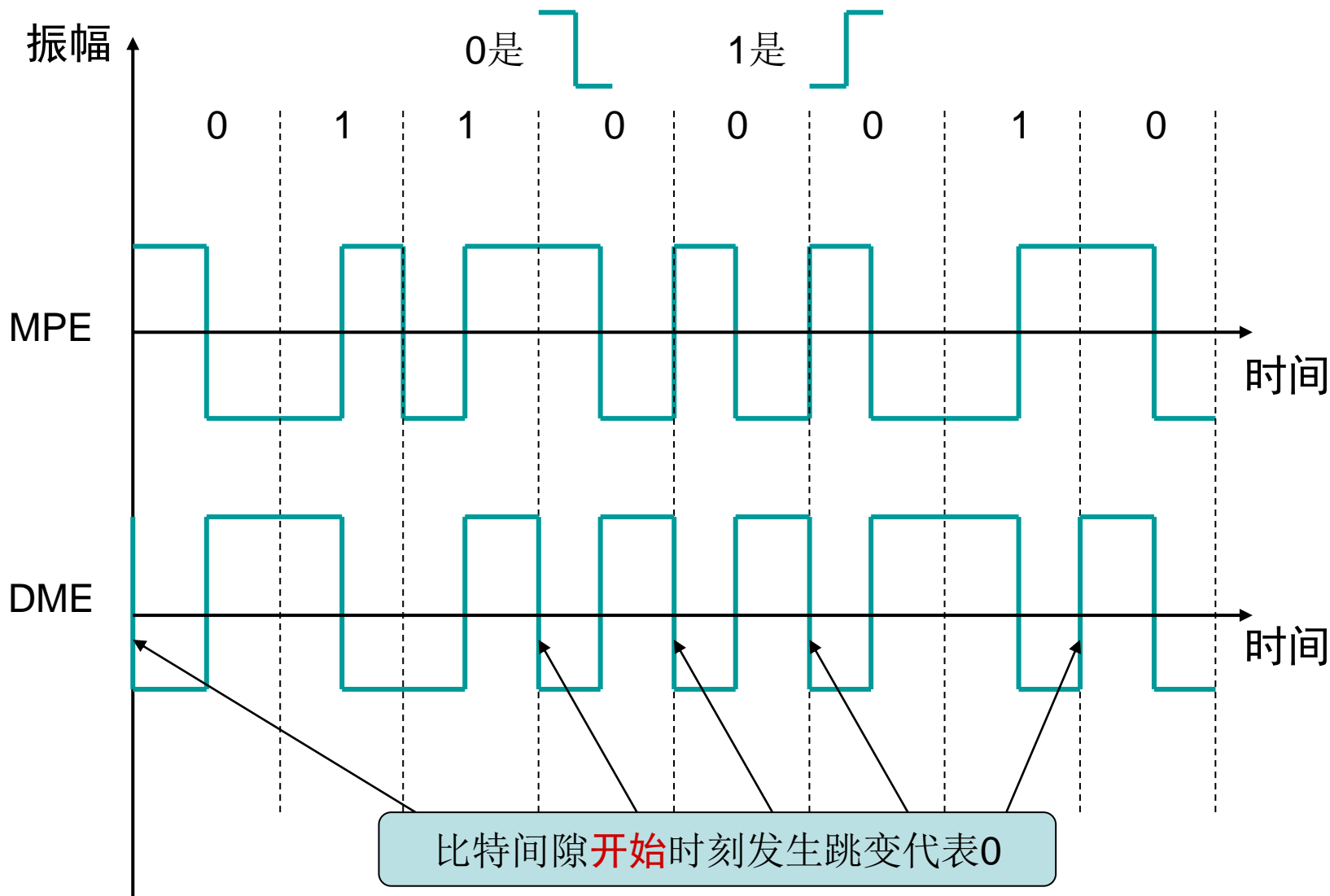
■ 曼彻斯特编码(MPE)

- 在每个比特间隙中间引入跳变来表示不同的比特和同步信息。
- 一个负电平到正电平的跳变代表比特1，一个正电平到负电平的跳变代表比特0

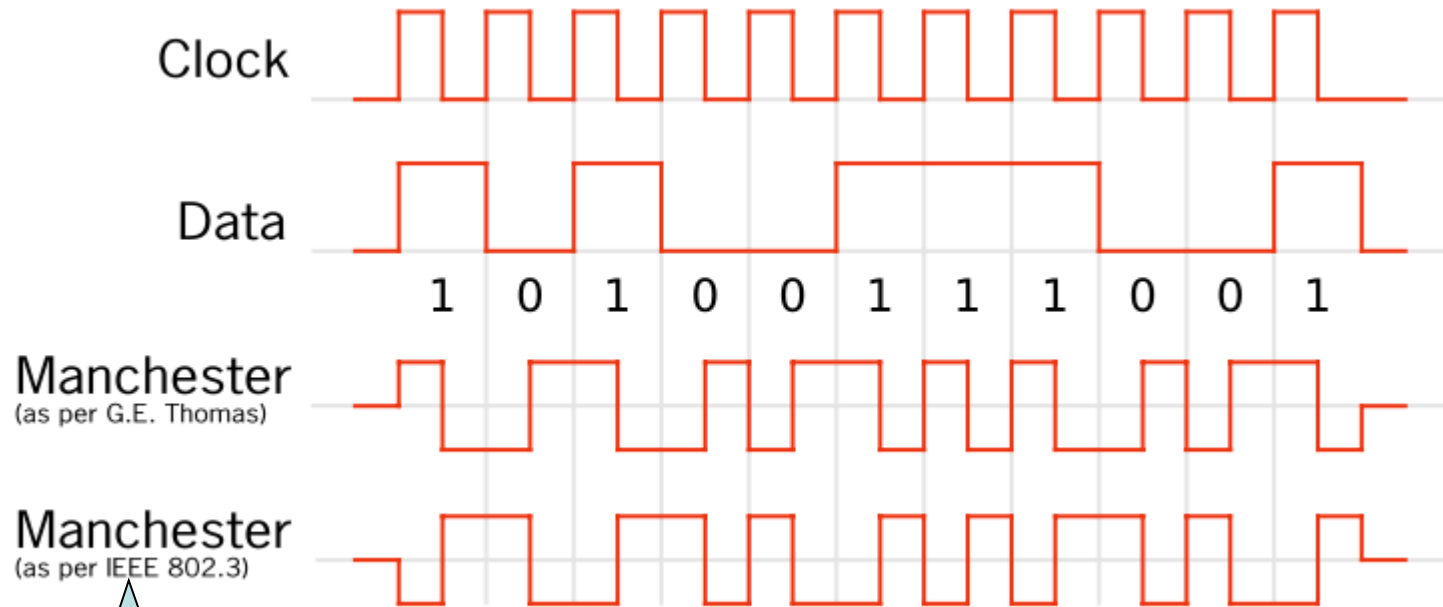
■ 差分曼彻斯特编码(DME)

- 比特间隙中间的跳变用于携带同步信息。
- 每个比特间隙的开始位置有跳变代表比特0，没有跳变则代表比特1。

MPE & DME



Manchester



Simple XOR with
Clock and Data

original data XOR clock = Manchester value

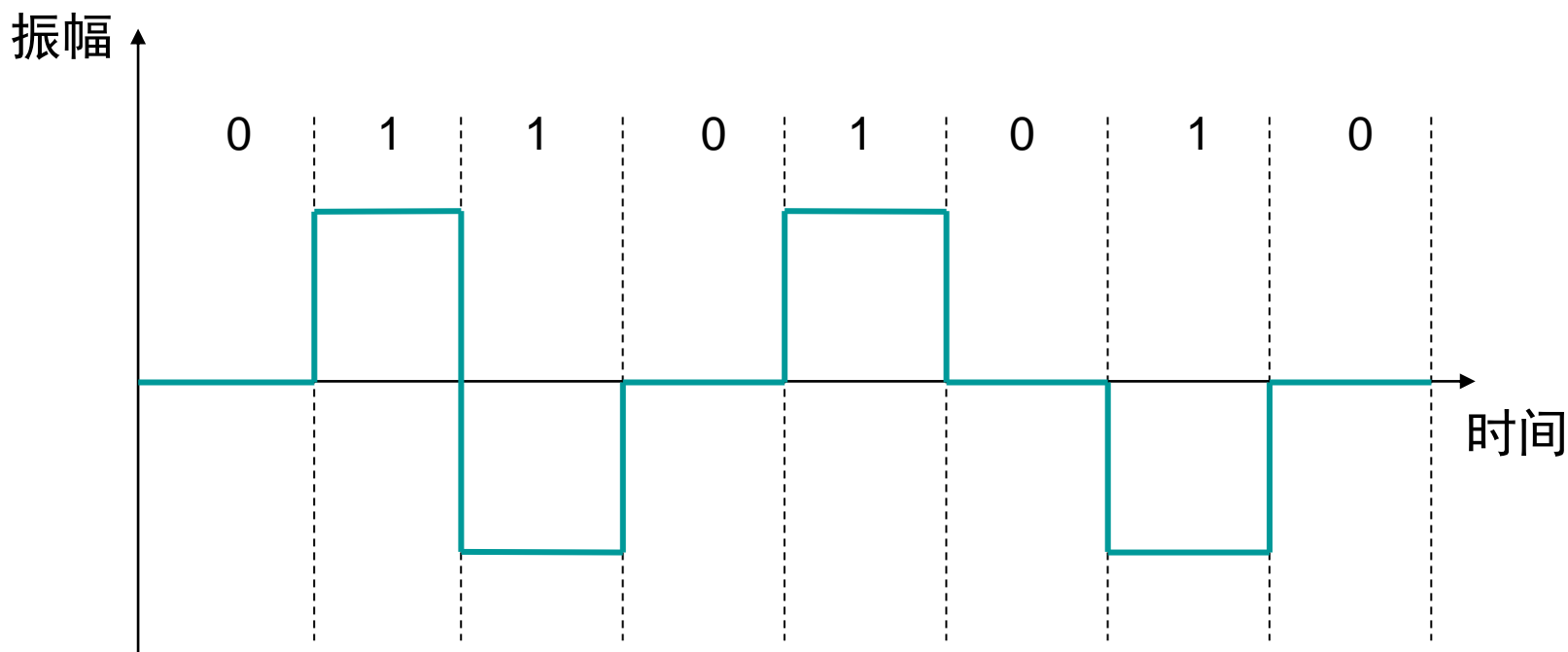
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

双极性编码

- 使用3个电平值：正、负和零
- 电平0代表比特0，正负电平交替代表比特1
- 有三种类型
 - 信号交替反转码(AMI)
 - 8零替换码(B8ZS)
 - 高密度双极性3零编码(HDB3)

信号交替反转码(AMI)

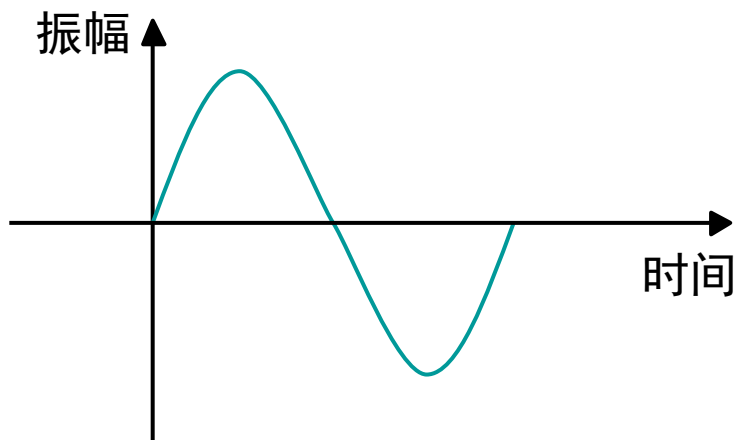
- 0电平代表比特0,
- 比特1由交替的正负电平代表



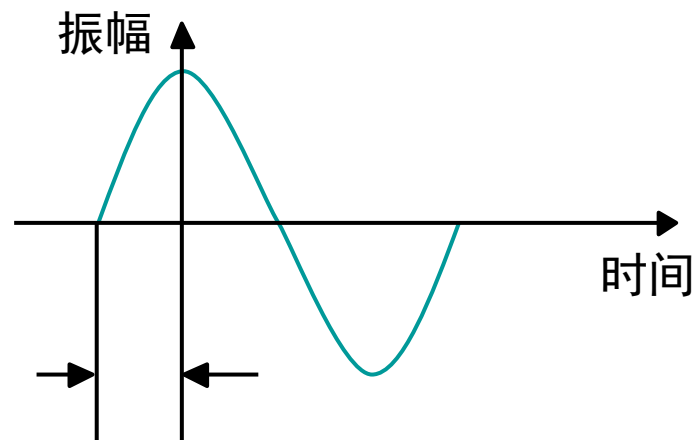
2.2.3 数字—模拟编码

- 利用模拟信号表示数字信息的技术。
- 常用的技术是调制技术。用模拟信号的幅值、频率、相位来代替数字1和0。
- 问题：为什么有时用模拟信号传递数字信息？
- 四种常用编码机制：
 - 幅移键控(ASK—Amplitude Shift Key)
 - 频移键控(FSK—Frequency Shift Key)
 - 相移键控(PSK—Phase Shift Key)
 - 正交调幅(QAM—Quadrature Amplitude Modulation)

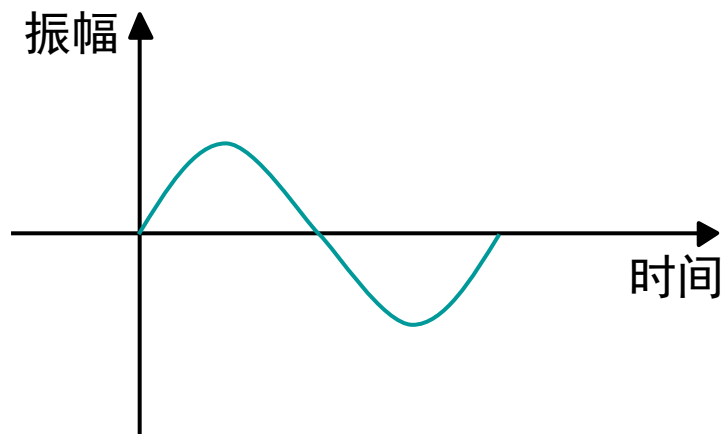
正弦波的参数变化



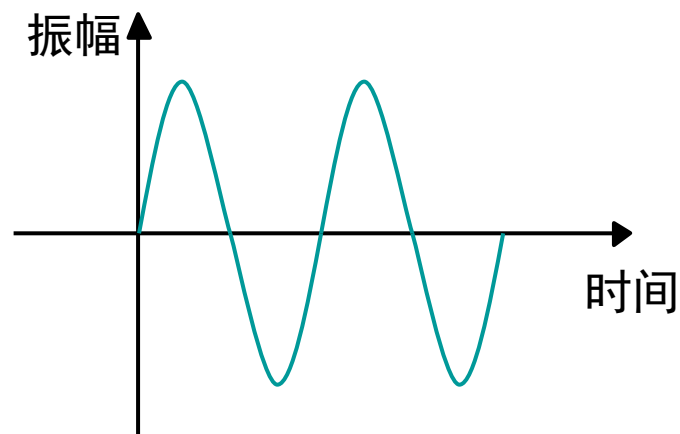
$$x(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$$



相位偏移1/4周期



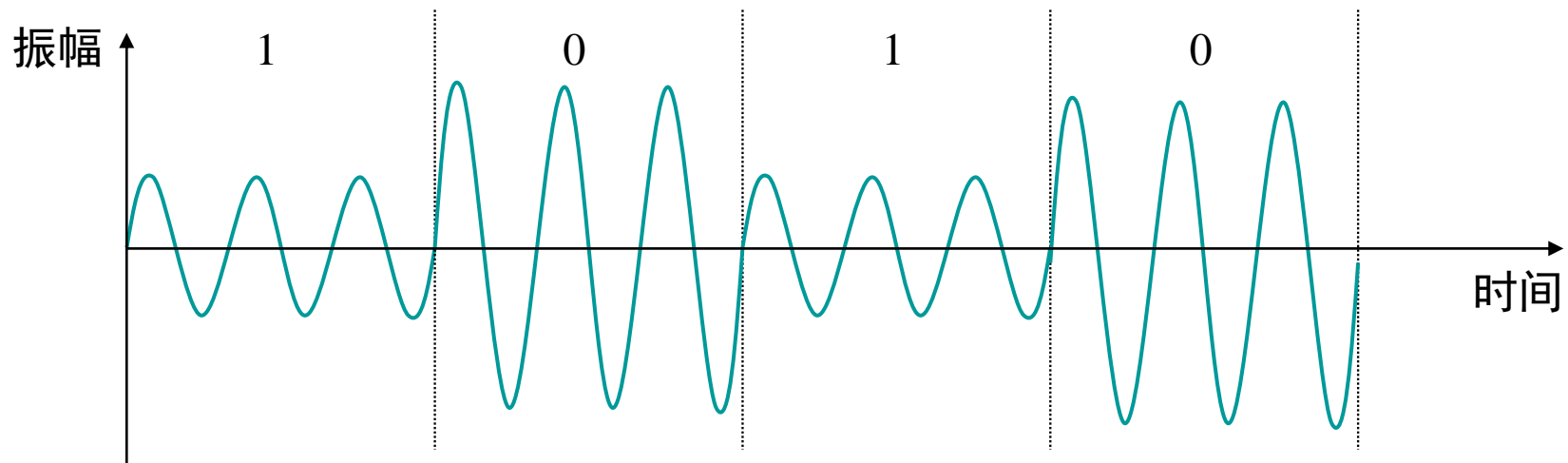
振幅减小一半



频率提高一倍

幅移键控(ASK—Amplitude shift key)

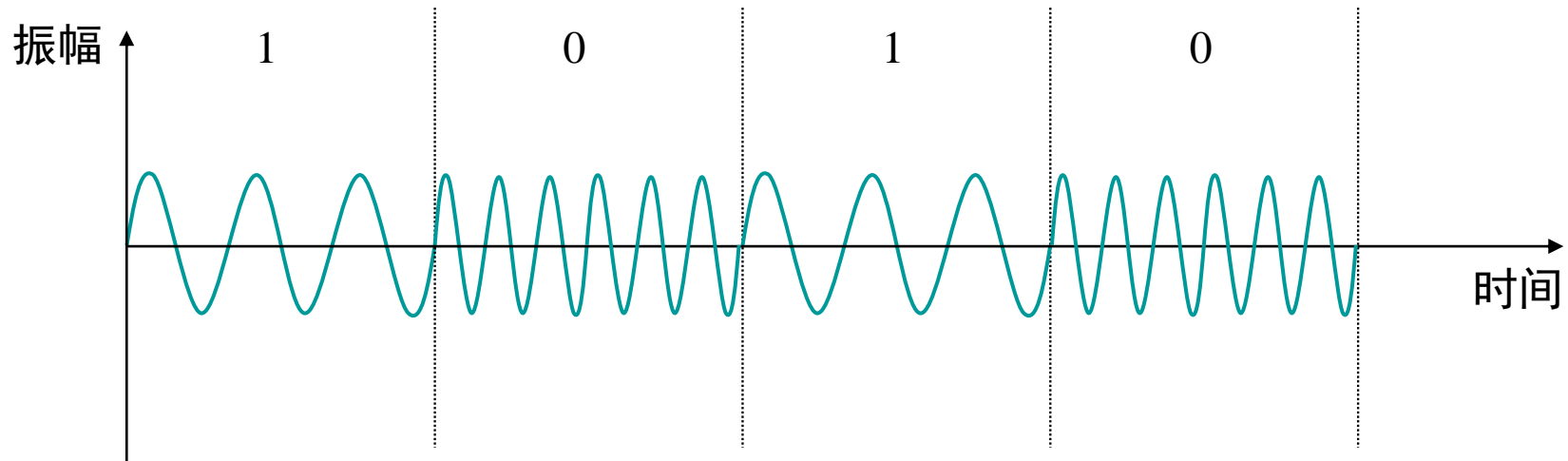
- 用载波的不同幅度代替数字0，1
 - 例如：高幅表示0，低幅表示1。



- 调幅收音机AM是ASK的例子。
- 缺点是抗干扰能力差。

频移键控(FSK—Frequency shift key)

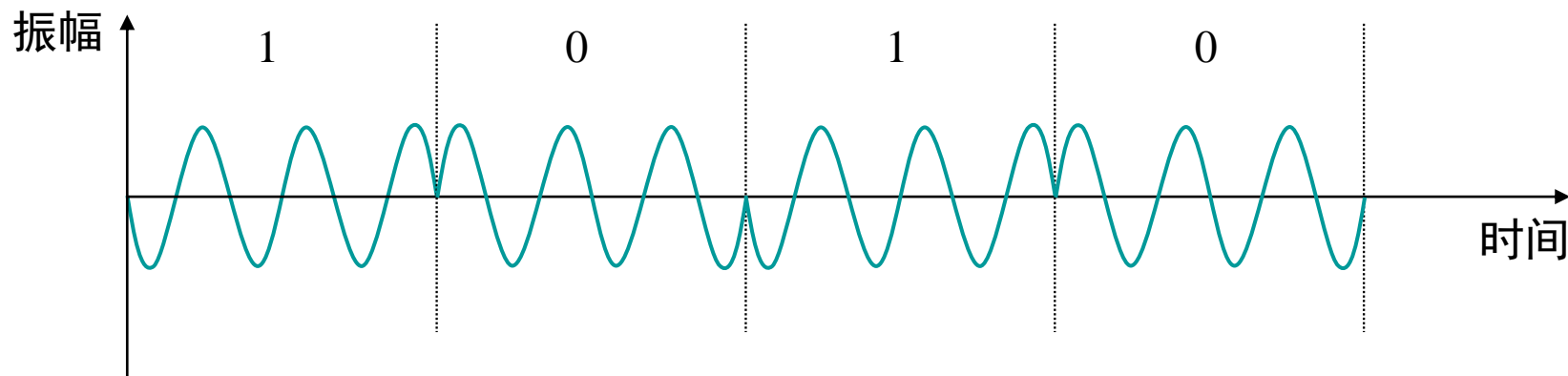
- 用载波的**不同频率**表示0和1
 - 例如:高频表示0, 低频表示1



- 调频收音机是**FSK**的例子
- 优点是抗干扰能力比**ASK**好

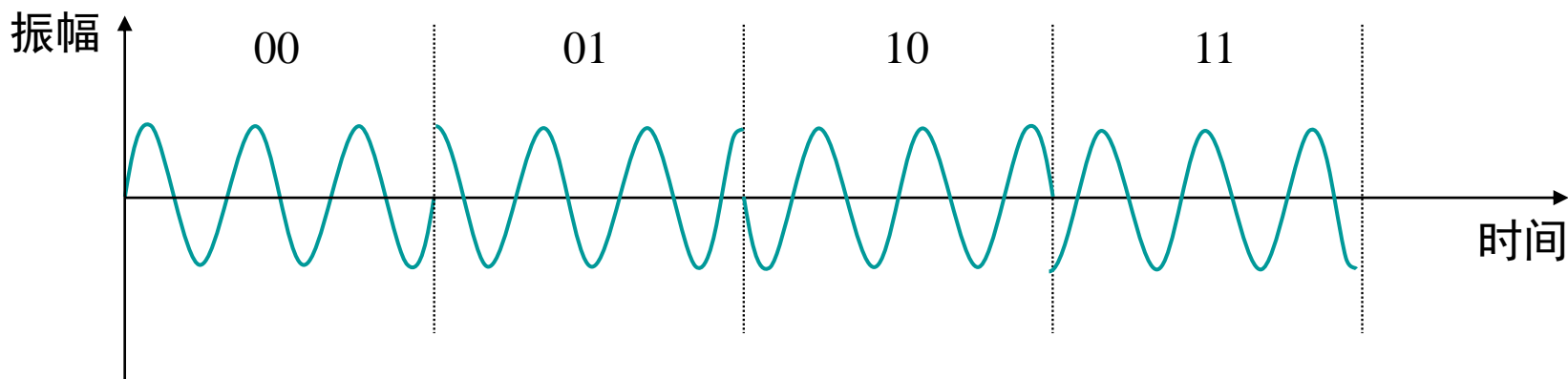
相移键控(PSK—Phase shift key)

- 调制载波的相位：不同的相位表示0和1。
 - 例如：相位0标示0，相位180表示1

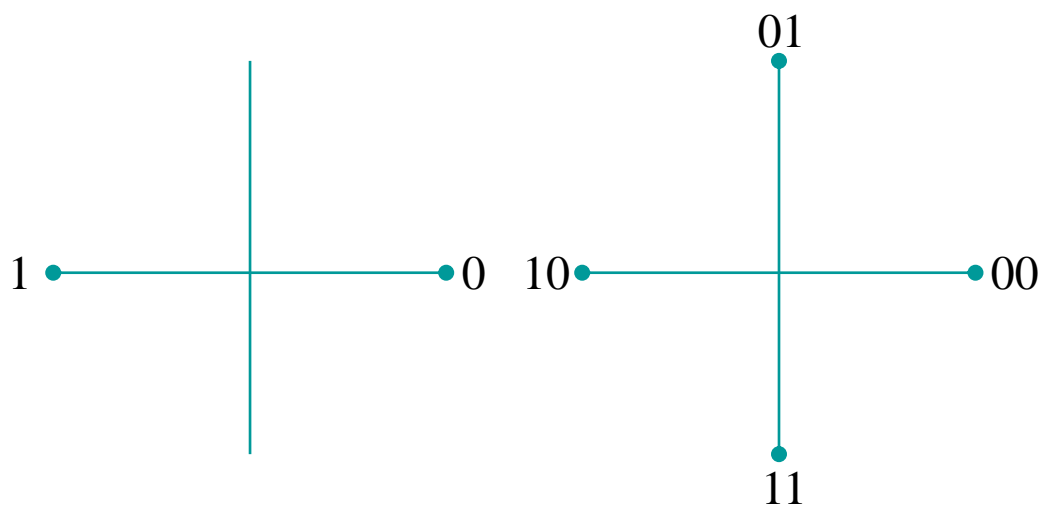


PSK

- PSK可以用更多的状态表示二进制位，是调制技术主要应用的技术。
 - 例如，用 0° 相位代表00，用 90° 相位表示01，用 180° 相位代表10，用 270° 相位表示11。这样每种相位的正弦信号可以表示两位二进制信息。

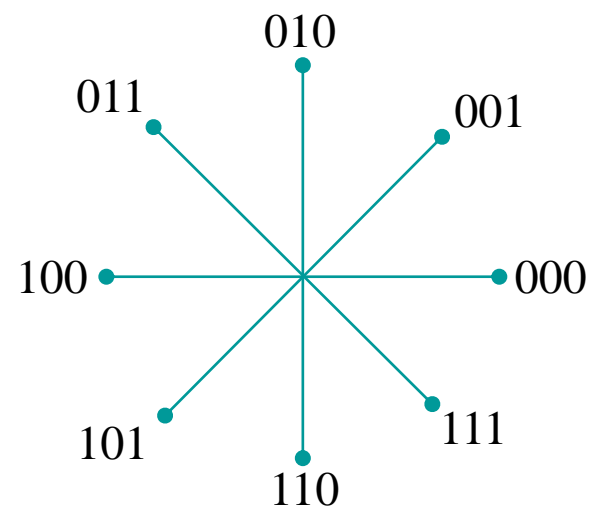


星座表(相位状态图)



2-PSK

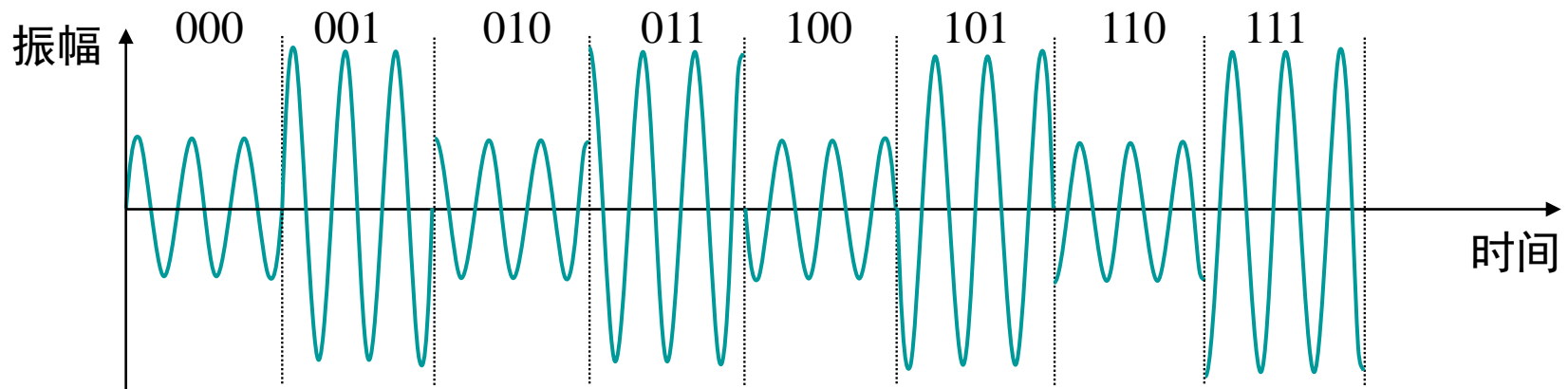
4-PSK



8-PSK

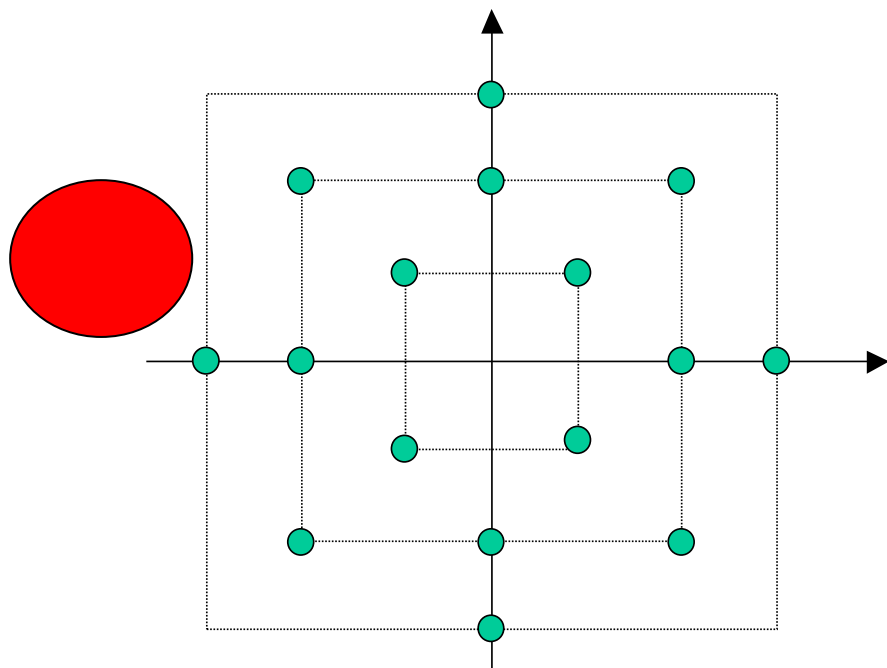
正交调幅(QAM--Quadrature Amplitude Modulation)

- 正交调幅：**ASK**和**PSK**结合起来的编码方法
幅移键控 相移键控

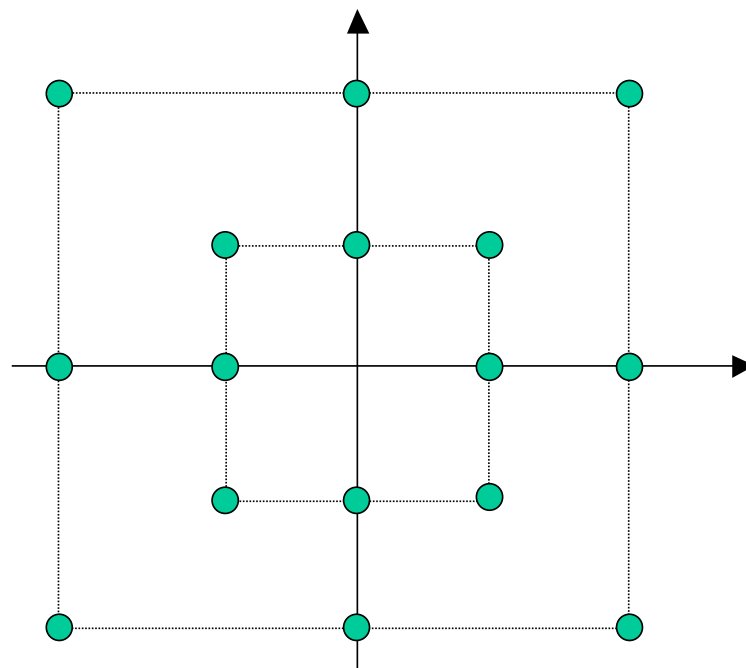


星座表(相位状态图)

4种振幅
8种相位



4种振幅
8种相位



两种16相位QAM星座图

常见Modem标准

- V.32(QAM-32)
 - $4(1) \times 2400 = 9600\text{bps}$
- V.32bis(QAM-128)
 - $6(1) \times 2400 = 14400\text{bps}$
- V.34
 - $12 \times 2400 = 28800\text{bps}$
- V.34bis
 - $14 \times 2400 = 33600\text{bps}$
- V.90
 - $7 \times 8000 = 56000\text{bps}$

模拟—数字编码

- A/D数据采集，主要应用自动控制系统

- 需要3步：

- 采样：将连续的模拟信号离散化

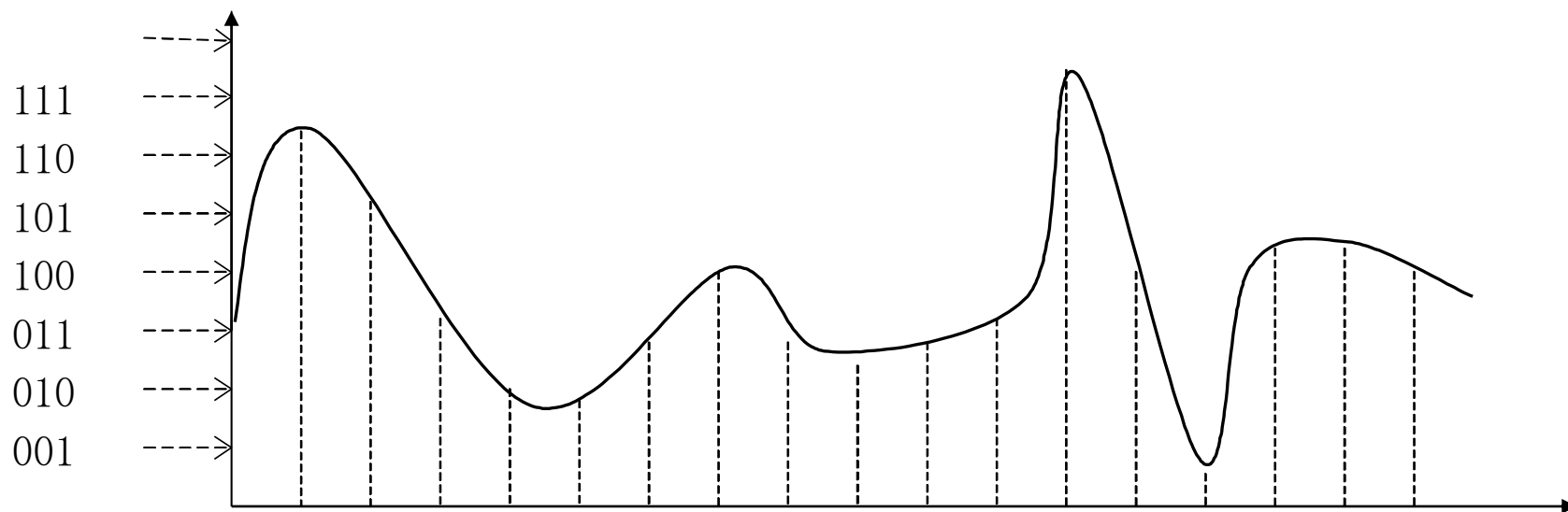
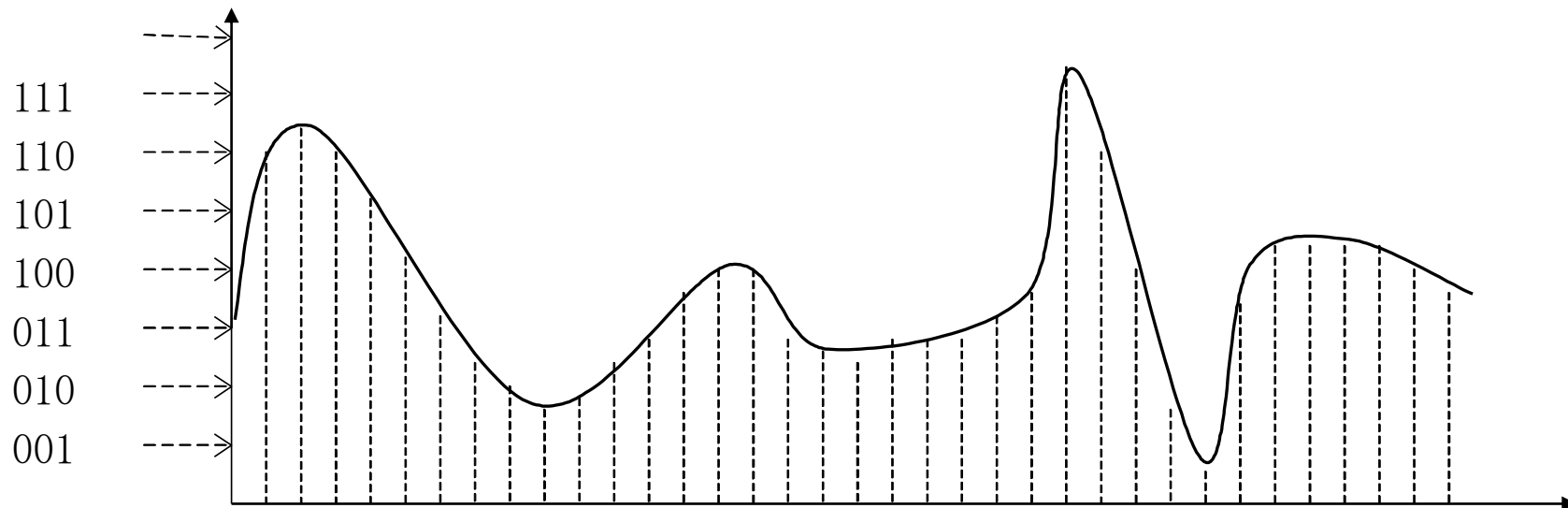
- 量化：离散的采样值用2进制位数量化

- 编码：对量化后的数据用2进制编码

例如：PCM脉冲编码调制

- 采样定理：采样频率大于信号最高频率的2倍。

示例



模拟—模拟编码

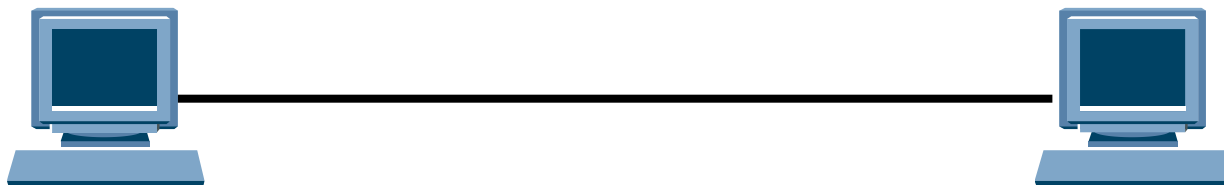
- 有线电视，电话系统等
- 声音信号的频率范围：20Hz~20kHz
 - 主要能量集中在300Hz~ 3000Hz 之间

2.3 线路配置和传输方式

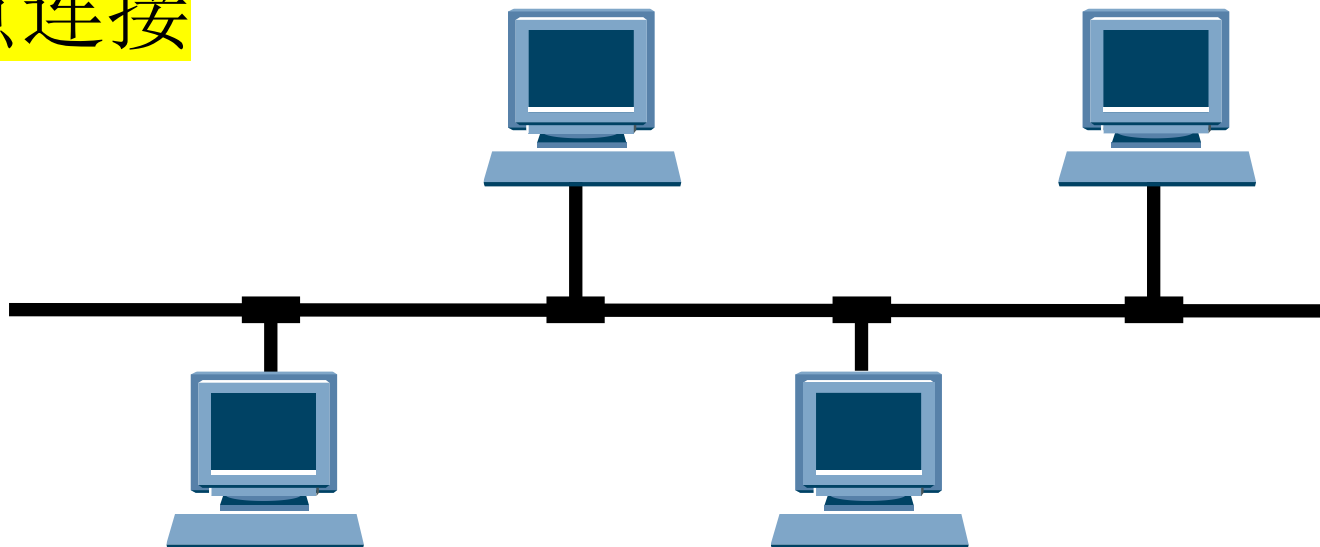
- 线路配置：两个或两个以上的设备连接到线路的方式。
- 传输方式：比特流从一个设备传到另一个设备的方式

2.3.1 线路配置的两种方式

■ 点对点



■ 多点连接



2.3.2 传输模式

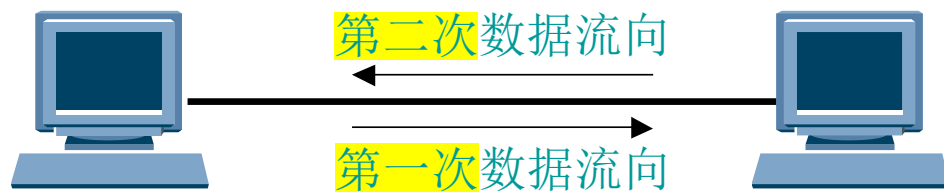
- **传输模式**：比特流从一个设备传到另一个设备的方式。包括一下方面：
 - **单工**、**半双工**和**全双工**通信 （传输方向）
 - **串行**和**并行**传输
 - **同步**和**异步**传输

单工、半双工和全双工通信

单工



半双工



单次只能选择一个方向

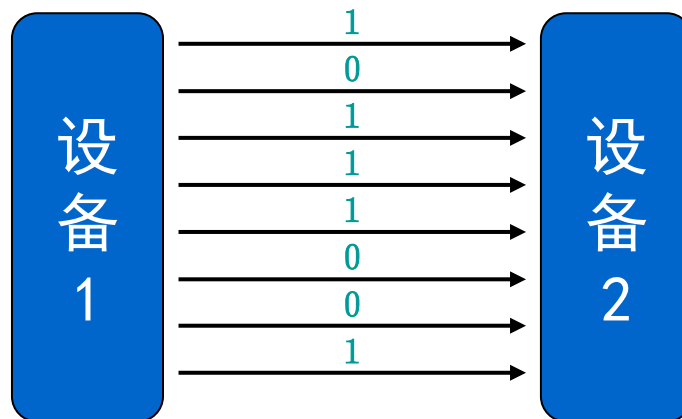
全双工



串行和并行传输

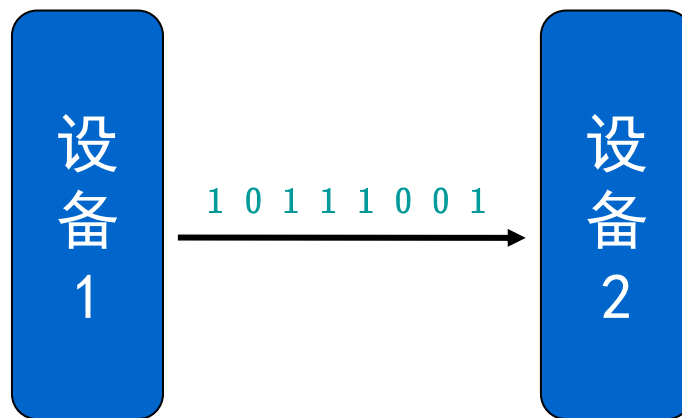
■ 并行

- 一次8位传输
- 速度快，线路昂贵
- 适合短距离传输



■ 串行

- 一次1位传输
- 速度慢，价格便宜

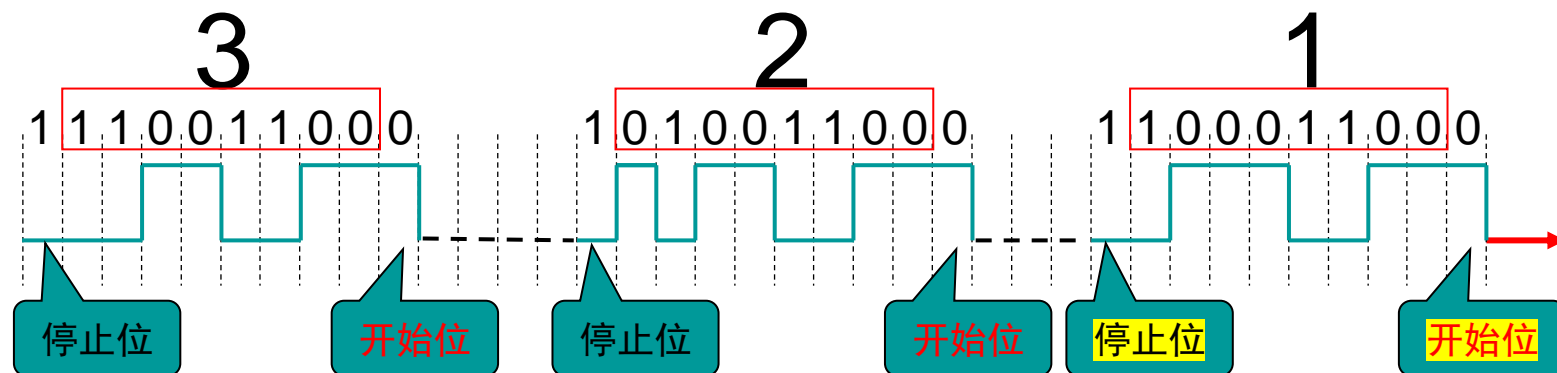


异步传输

一字节一同步

- 异步传输用于低速设备，一次传输一个字节。
- 一个字节一同步。
- 比特流分成多个小组独立传送
- 可在任何时刻发送比特
- 问题：接收方如何知道何时数据到达？

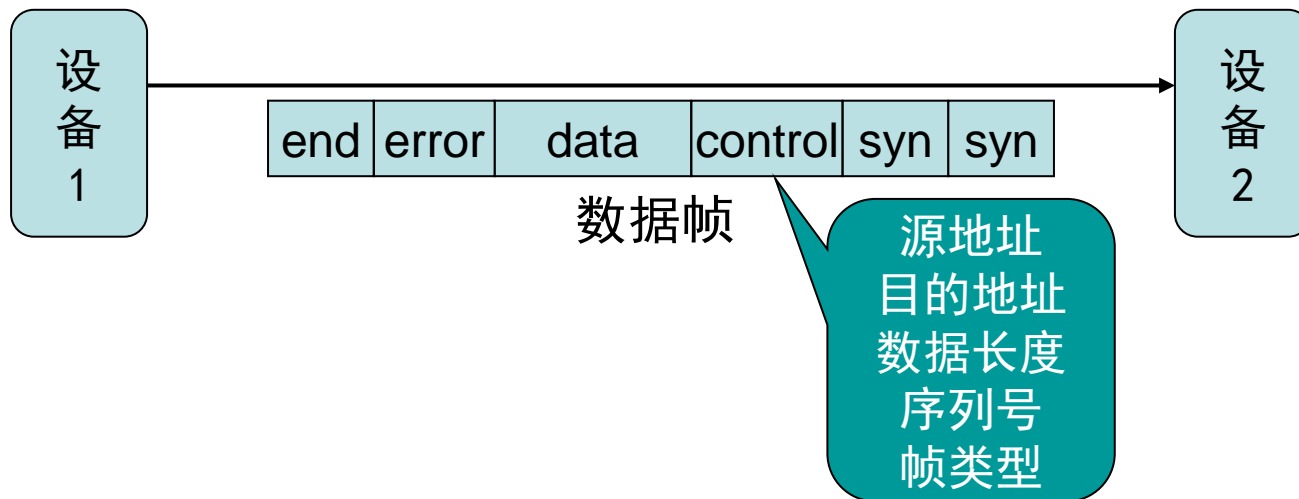
加入开始位和停止位



同步传输

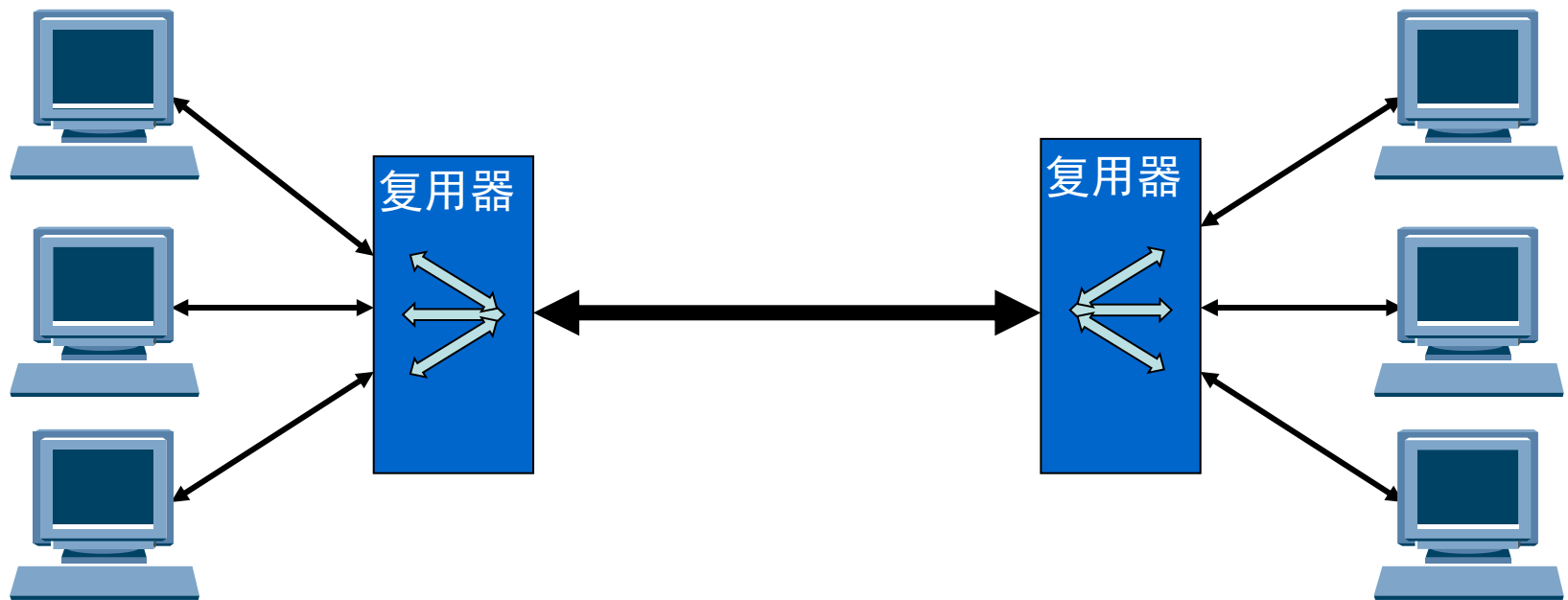
一比特一同步

- 同步传输用于高速传输，对收发双方的时钟要求很高。
- 成块传输字符或比特流
- 同步分为两级实施：
 - 二进制同步：同步线路或自同步编码
 - 数据帧同步：帧前后加起始、结束标志



2.4 多路复用技术

- 多路复用(multiplexing)技术：利用一条链路同时传输多路信号的技术
- 使用多路复用技术可以最大限度地利用系统所具有的传输能力。



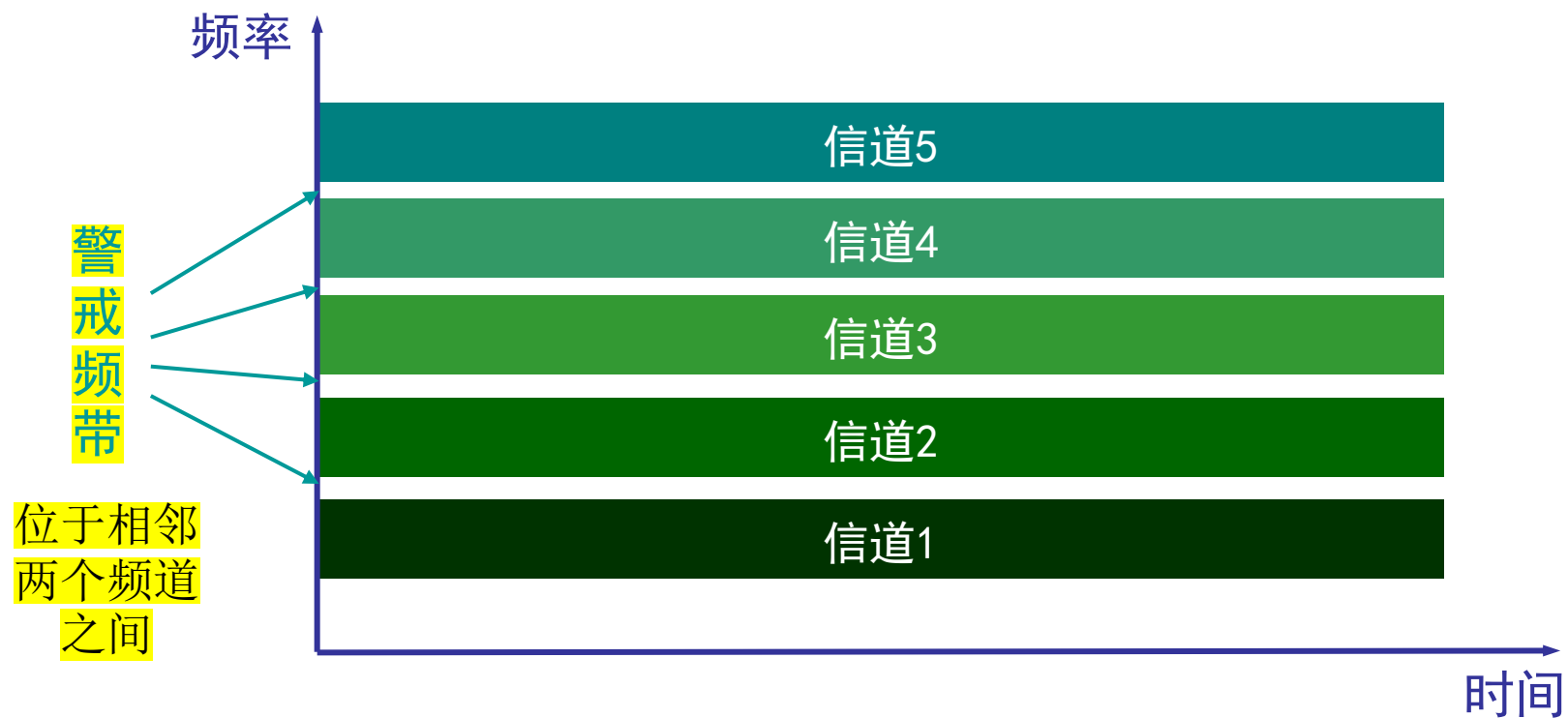
几种多路复用技术

- 频分多路复用技术(FDM)
- 时分多路复用技术(TDM)
 - 同步时分多路复用
 - 异步时分多路复用
- 波分多路复用技术(WDM)
- 码分多路复用技术(CDM)

2.4.1 FDM和TDM

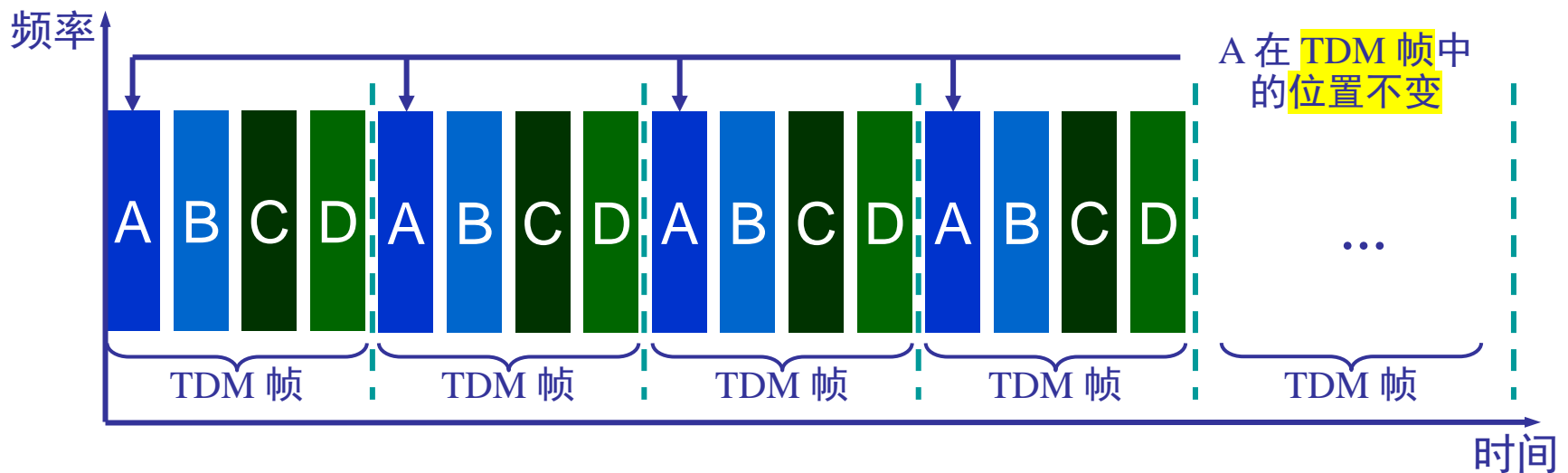
- **FDM** (Frequency-Division Multiplexing)通过分割线路的带宽来实现，适用于模拟信号。
- 用户在分配到一定的频带后，在通信过程中自始至终都占用这个频带。
- 频分复用的所有用户在同样的时间占用不同的带宽资源（这里的“带宽”是频率带宽而不是数据的发送速率）。

FDM



TDM (Time-Division Multiplexing)

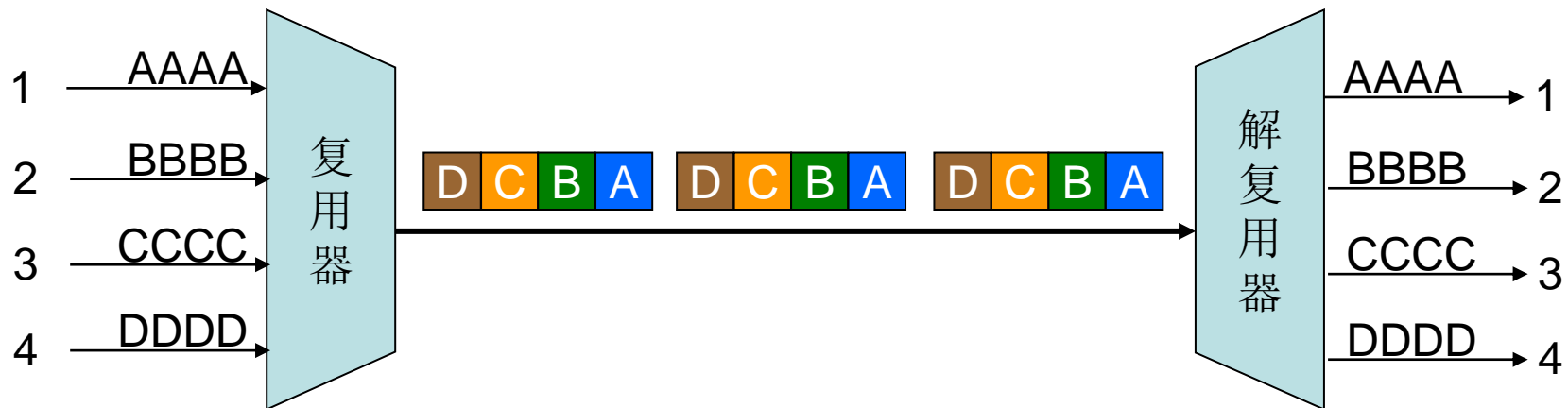
- TDM通过分割时间片来划分信道，每个时间片由一个复用信号占用。适用于数字信号。



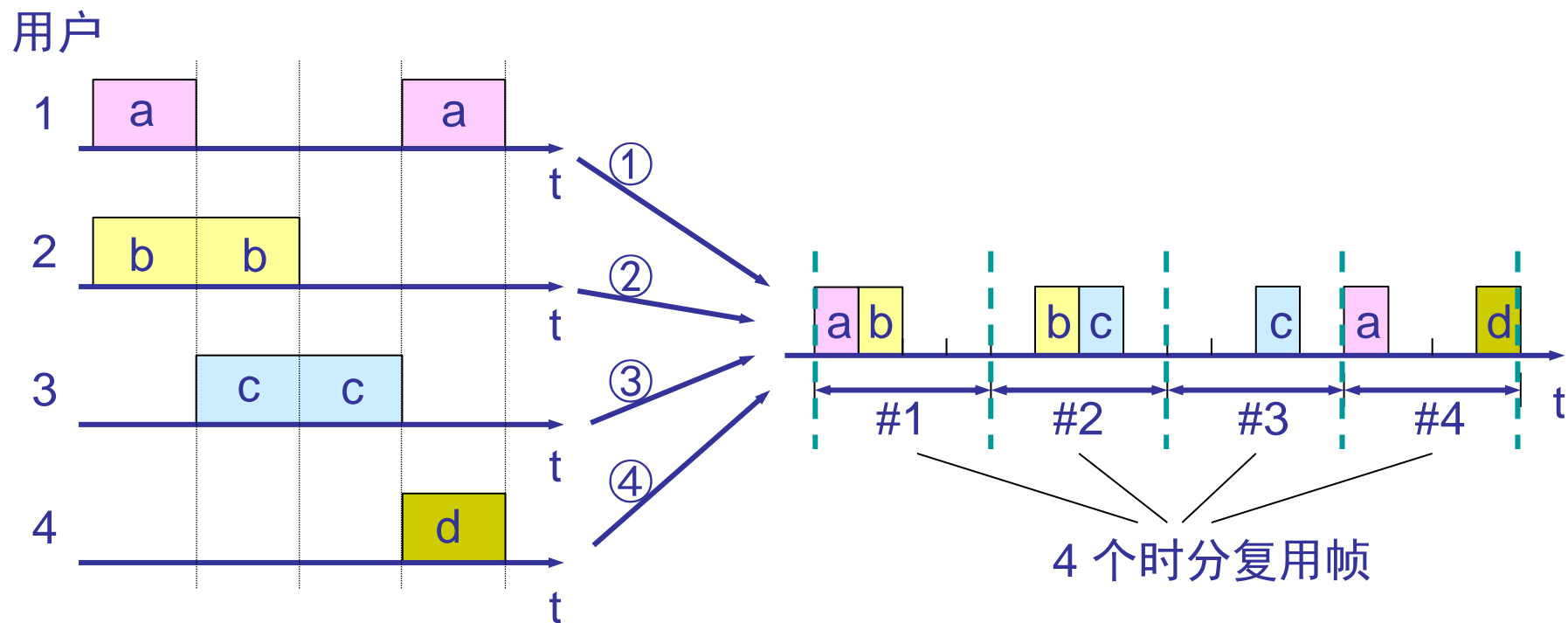
TDM

- 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）。
- 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。
- TDM 两种实现方式：
 - 同步时分多路复用
 - 异步时分多路复用

同步TDM

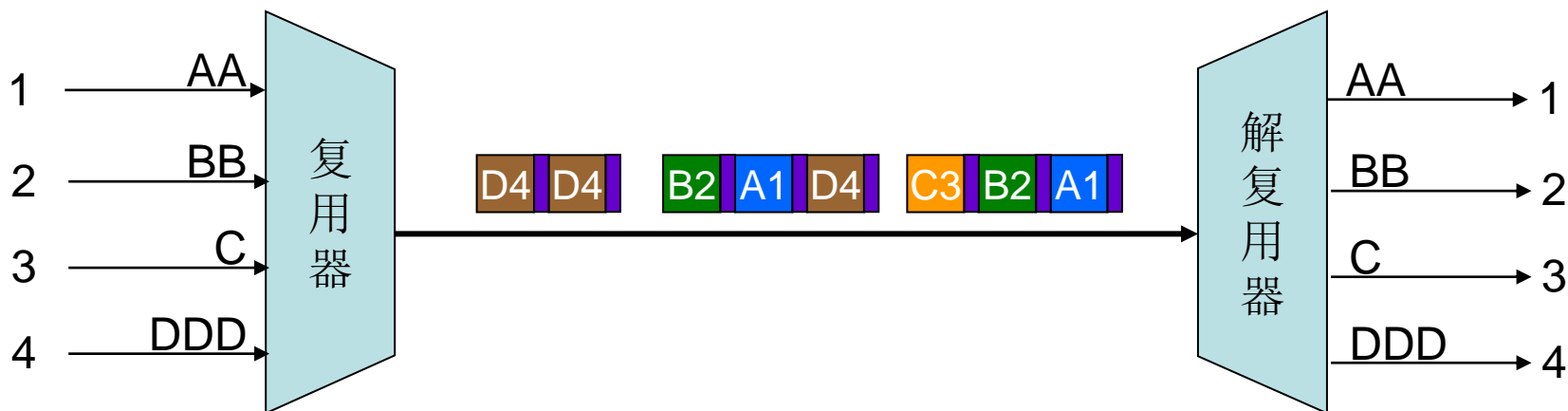


同步TDM可能浪费资源



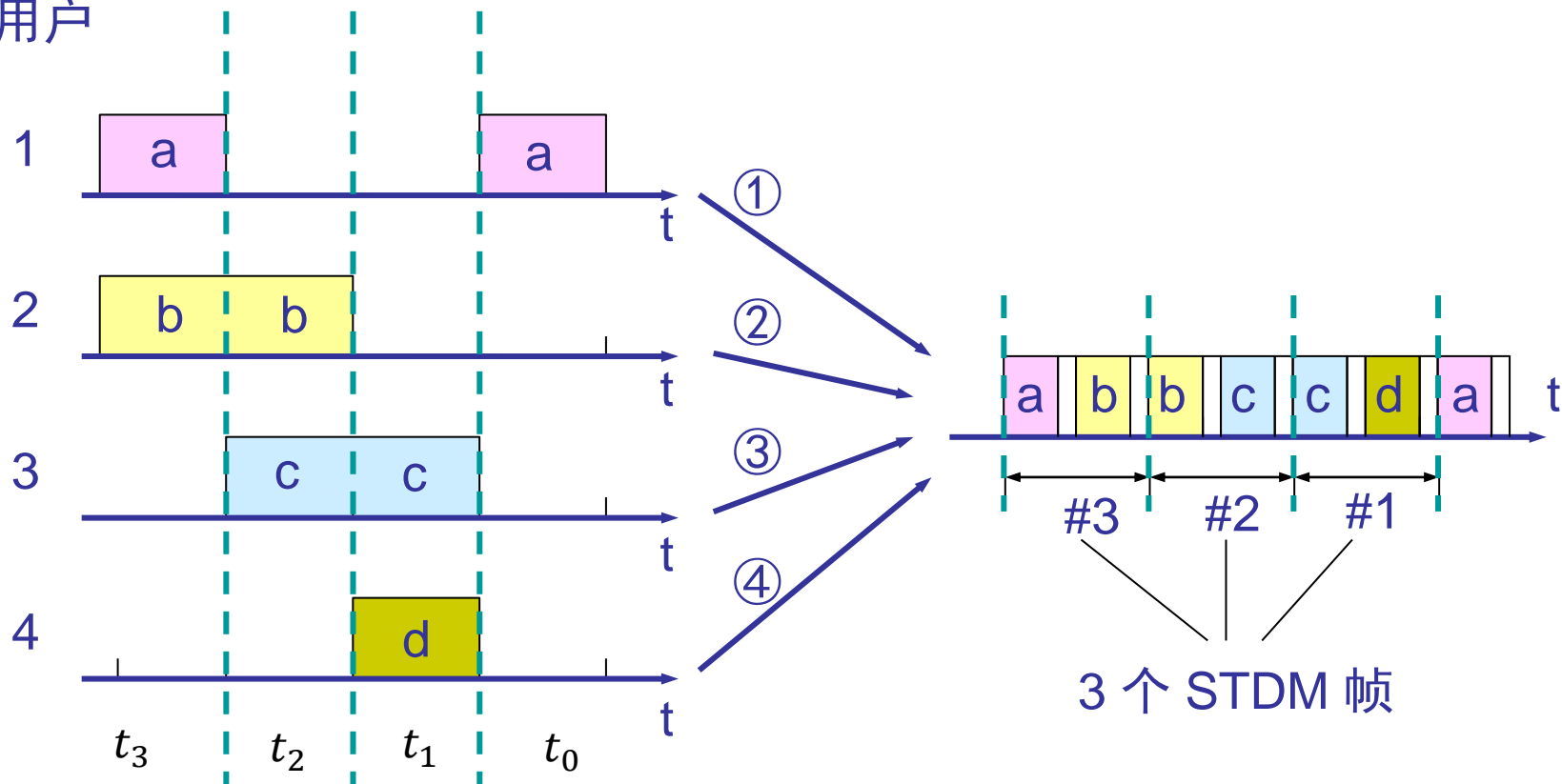
异步TDM

- 异步TDM又称统计复用(STDM)
- 每帧的时间片数小于输入设备数量



异步TDM

用户



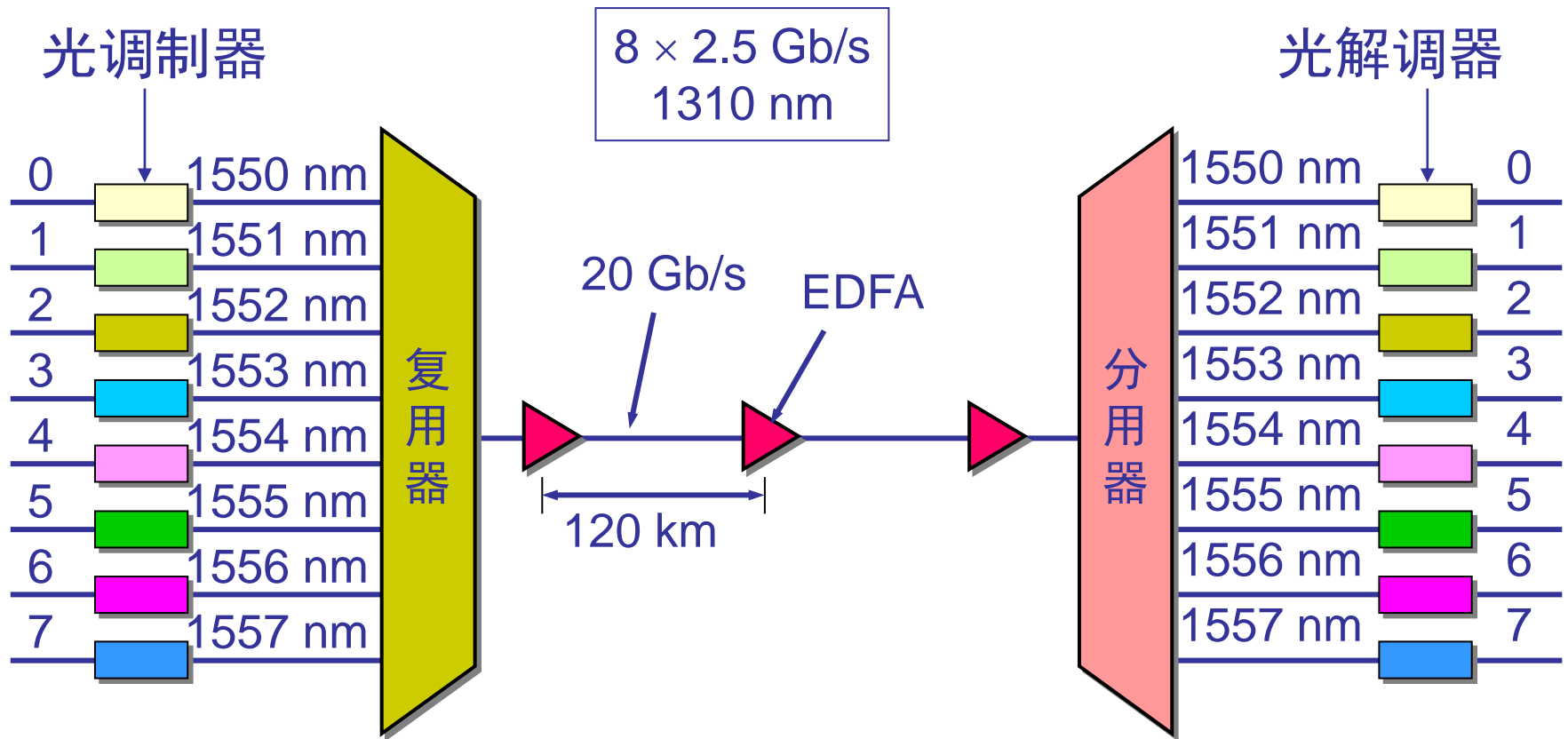
同步TDM vs 异步TDM

- 同步时分多路复用的帧是固定大小的，控制简单，实时性好。信道效率差。
- 异步时分多路复用能提高系统的利用率，但是需要一些额外的代价：
 - 信息单元需附带地址信息
 - 复用器必须有一定的存储容量
 - 节点必须有管理队列的能力

2.4.2 波分多路复用

- WDM (Wavelength Division Multiplexing)
- WDM: 光的频分复用
- 波分多路复用是利用多个激光器在单条光纤上同时发送多束不同波长激光的技术。
- 它在一定的带宽上将输入的光信号调制到特定的频率上，然后将调制后的信号复用到一根光纤上。

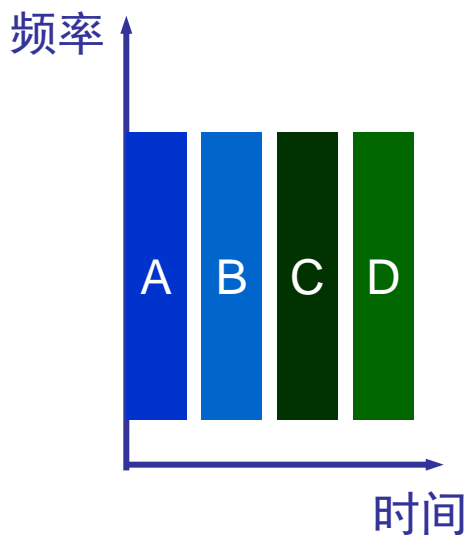
密集波分复用(DWDM)



2.4.3 码分多路复用

- CDM (Code-Division Multiplexing), 又称码分多址复用 CDMA (Code Division Multiple Access)
- 复用时根据码型结构的不同来实现信号分割的多路复用。
- 在CDM系统中, 各个用户不是靠频率或时隙来区分, 而是码型来区分。
- 用户使用同一频率, 占用相同的带宽。

三种多址方式概念对比



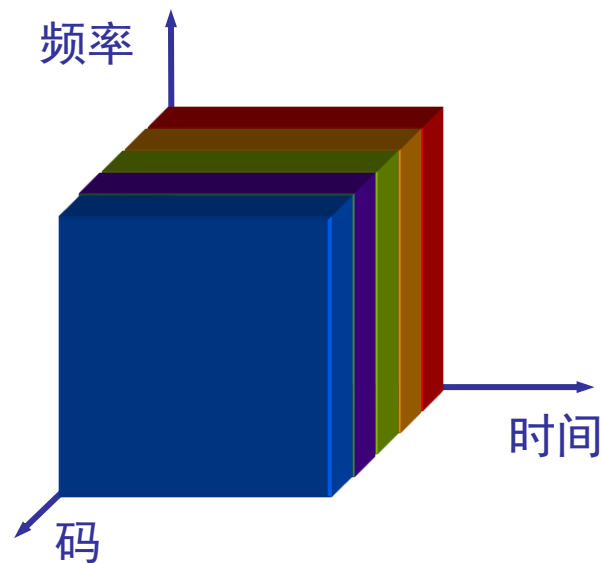
TDM

时分多路复用



FDM

频分多路复用



CDM

码分多路复用

码分复用

- **码片**: 每个比特时间被再细分成 m 个更短的时间间隔, 更短的时间间隔称之为码片
- **码片序列**: 每个站点分配一个 m 位码
 - 例: 站点A (0 0 0 1 1 0 1 1)
 - 发送比特1, 站点就发送其码片序列
 - 发送比特0, 站点就发送其码片序列的反码
- **双极型表示**: $0 \rightarrow -1$, $1 \rightarrow +1$, $0 \rightarrow$ 无信号
 - A的码片序列为(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)
 - 其反码为(+1 +1 +1 -1 -1 +1 -1 -1)

无法确定信道上是没有信号传输, 还是传输的信号就是0

正交

- 正交性可以表示为：

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

分给各个站的码片序列必须相互正交

- 可以得到：

$$S \cdot \bar{T} = 0$$

任何站的码片向量与其他各站码片反码的向量的规格化内积为0

$$S \cdot S = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = 1$$

任何站的码片向量与自身码片向量的规格化内积为1

$$S \cdot \bar{S} = -1$$

任何站的码片向量与自身码片反码的向量的规格化内积为-1

码分复用

如果有两个或多个站同时发送数据，则信道中的信号就是这些站各自所发送一系列码片序列或码片序列反码的**叠加**。为了从信道中**分离**出每个站的信号，给每个站**指派码片序列**时，必须遵循以下规则：

- ☐ 分配给每个站的**码片序列必须各不相同**，实际常采用伪随机码序列。
- ☐ 分配给每个站的**码片序列必须相互正交**，即各码片序列相应的码片向量之间的**规格化内积为0**。

令向量A表示站A的码片向量，向量B表示站B的码片向量。

两个不同站A和B的码片序列相互正交，就是向量A与向量B的规格化内积为0，如下式所示。

$$A \cdot B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m A_i B_i = 0$$

【举例】

给站A分配的8比特码片序列为01011001，给站B分配的8比特码片序列为00110101，

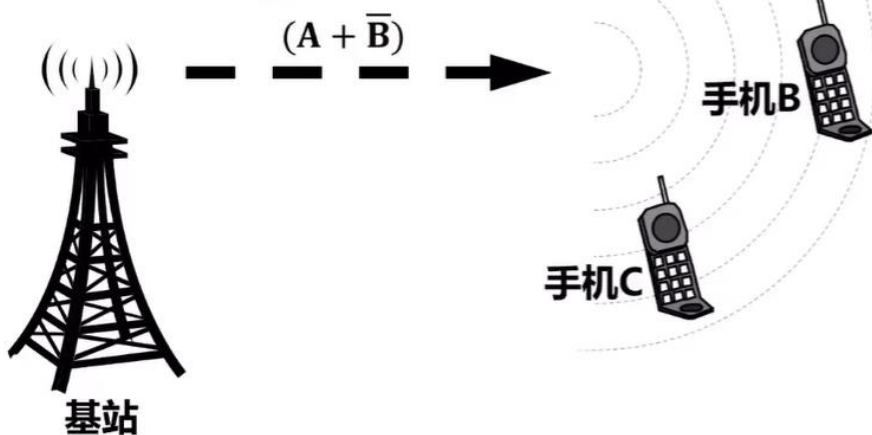
则站A的码片向量为 $(-1 +1 -1 +1 +1 -1 -1 +1)$ ，站B的码片向量为 $(-1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 +1)$ 。

将站A和站B各自的码片向量代入上式计算规格化内积：

$$\frac{(-1) \times (-1) + (+1) \times (-1) + (-1) \times (+1) + (+1) \times (+1) + (+1) \times (-1) + (-1) \times (+1) + (-1) \times (-1) + (+1) \times (+1)}{8} = 0$$

码分复用举例

知道各手机的码片序列
给手机A发送比特1
给手机B发送比特0



各手机用自己的码片向量与收到的叠加后的码片向量，
做规格化内积运算：

$$(A + \bar{B}) \cdot A = A \cdot A + A \cdot \bar{B} = 1 + 0 = 1$$

运算结果为1，表明收到的是比特1

$$(A + \bar{B}) \cdot B = A \cdot B + \bar{B} \cdot B = 0 + (-1) = -1$$

运算结果为-1，表明收到的是比特0

$$(A + \bar{B}) \cdot C = A \cdot C + \bar{B} \cdot C = 0 + 0 = 0$$

运算结果为0，表明没有收到信息

码分复用举例

知道各手机的码片序列
给手机A发送比特串101
给手机B发送比特串110



(+1 -1 +1 -1)

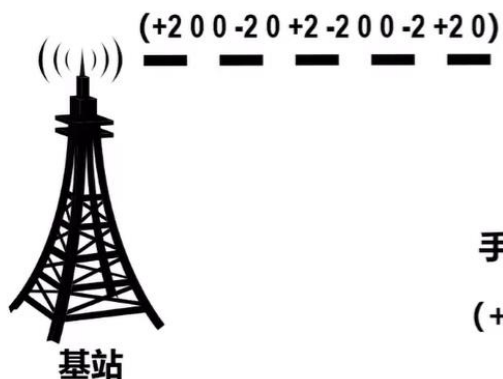


手机B
(+1 +1 -1 -1)



手机C
(+1 +1 +1 +1)

知道各手机的码片序列
给手机A发送比特串101
给手机B发送比特串110



(+1 -1 +1 -1)



手机B
(+1 +1 -1 -1)



手机C
(+1 +1 +1 +1)

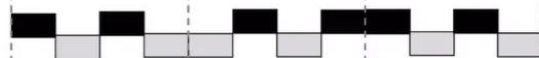
给A发送的比特串

1 0 1

相应的码片向量

+1 -1 +1 -1 -1 +1 -1 +1 +1 -1 +1 -1

相应的信号



给B发送的比特串

1 1 0

相应的码片向量

+1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 +1

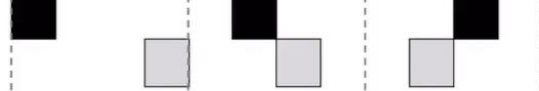
相应的信号



基站发送叠加向量

+2 0 0 -2 0 +2 -2 0 0 -2 +2 0

相应的信号



手机A收到基站发来的叠加后的信号，就用自己的码片向量与收到的叠加后的码片向量，做规格化内积运算：

$$\frac{(+1) \times (+2) + (-1) \times 0 + (+1) \times 0 + (-1) \times (-2)}{4} = 1$$

$$\frac{(+1) \times 0 + (-1) \times (+2) + (+1) \times (-2) + (-1) \times 0}{4} = -1$$

$$\frac{(+1) \times 0 + (-1) \times (-2) + (+1) \times (+2) + (-1) \times 0}{4} = 1$$

根据运算结果可知：

手机A收到基站发来的数据是比特串101。

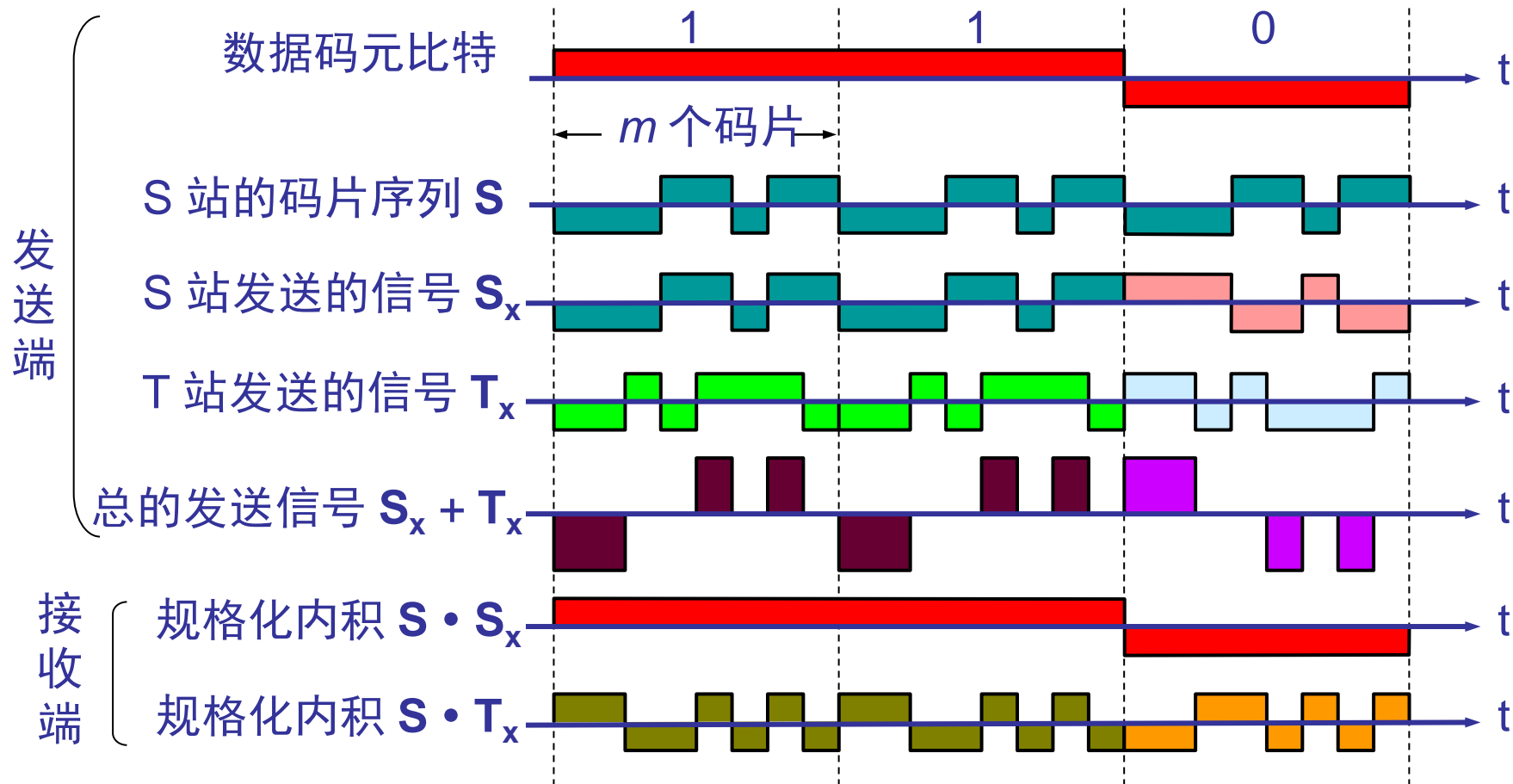
B、C以此类推

码分复用示例

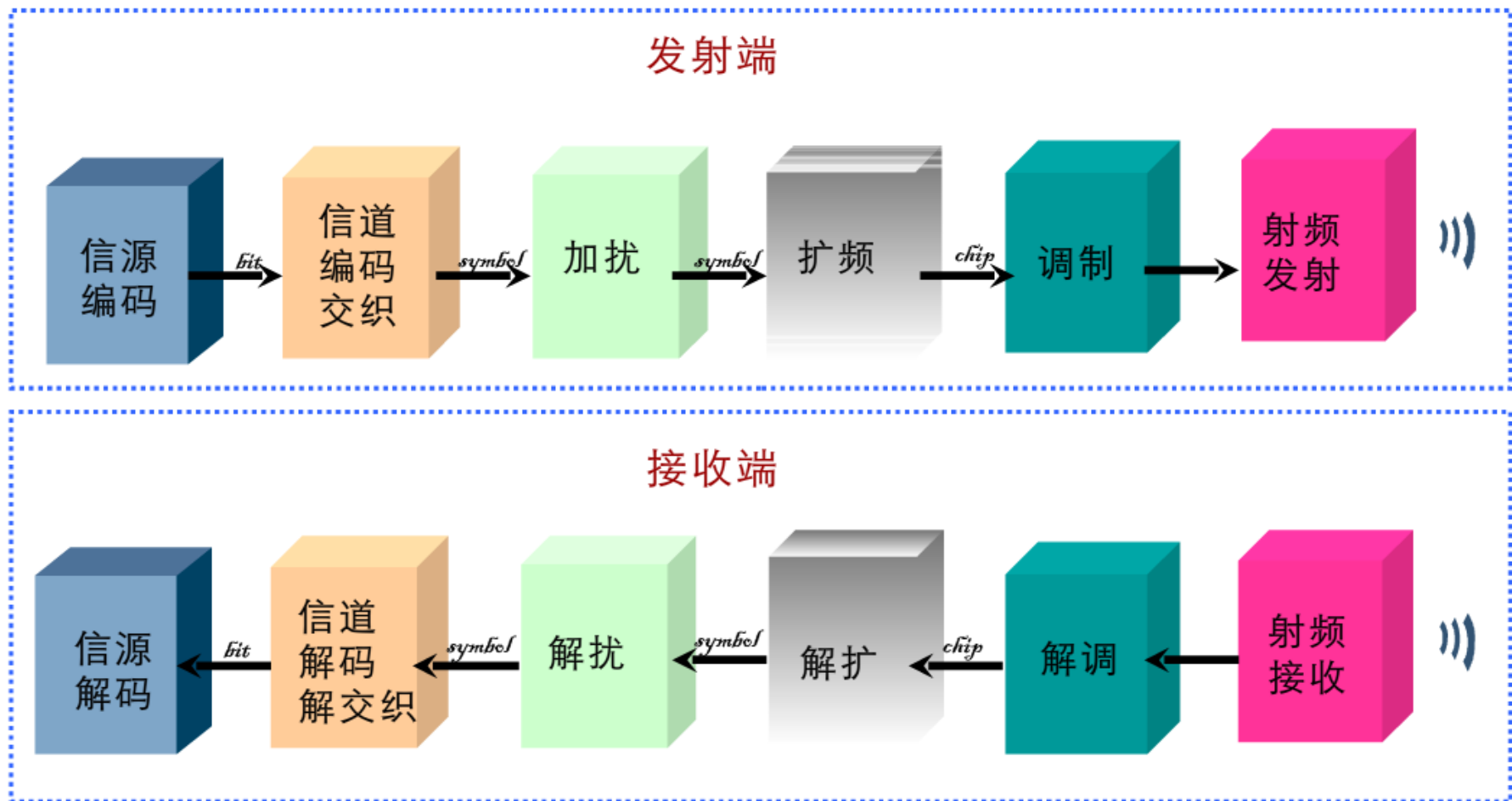
站	双极型码片序列								发送比特序列					
A	-1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-	-	1	1	1	1
B	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-	1	0	0	1	1
C	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	1	1	-	1	1	0
D	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-	-	-	-	1	1

S1	C	时刻1	S1·C	$(C) \cdot C = 1$
S2	B+C	时刻2	S2·C	$(B+C) \cdot C = 1$
S3	$A+\overline{B}$	时刻3	S3·C	$(A+\overline{B}) \cdot C = 0$
S4	$A+\overline{B}+C$	时刻4	S4·C	$(A+\overline{B}+C) \cdot C = 1$
S5	A+B+C+D	时刻5	S5·C	$(A+B+C+D) \cdot C = 1$
S6	$A+B+\overline{C}+D$	时刻6	S6·C	$(A+B+\overline{C}+D) \cdot C = -1$

码分复用图示



码分复用应用——CDMA通信模型



2.5 数据交换技术

- 当存在多个通信设备时，如何使每两个设备之间能够通信？
- 交换使得没有物理链路直接连接的两个或多个设备之间能够通信的技术。

交换技术

■ 传统的交换方式有三种：

① 电路交换(Circuit Switch)

② 分组交换(Packet Switch)现在用的

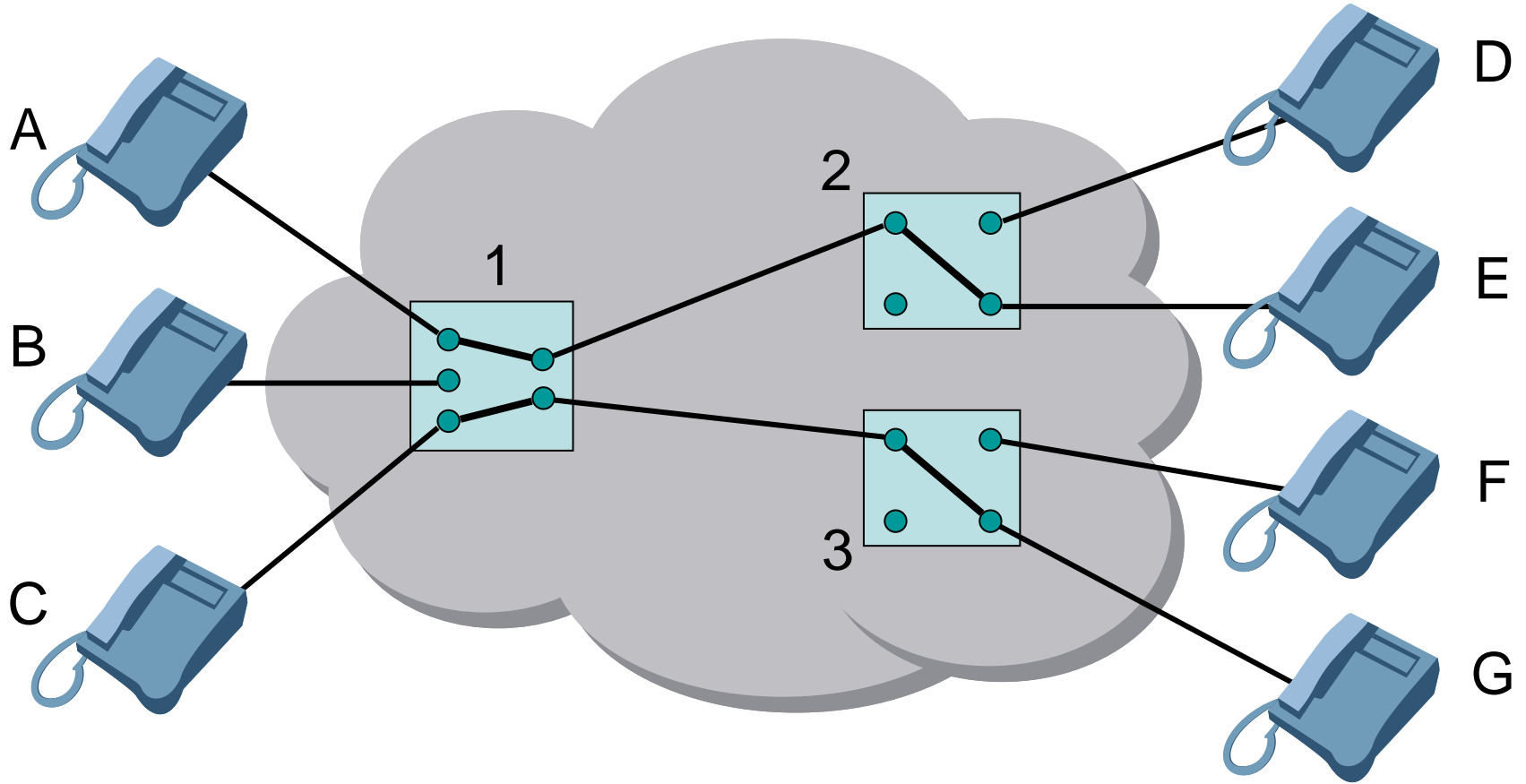
③ 报文交换(Message Switch)

■ 随着交换技术的发展，出现了一些新的交换技术，例如ATM交换（也称信元交换）和帧中继等。

2.5.1 电路交换

- 电路交换是在两个设备之间创建一条临时的物理连接。
- 可以把电路交换机看作是一个多路开关。
- 物理的连接

电路交换

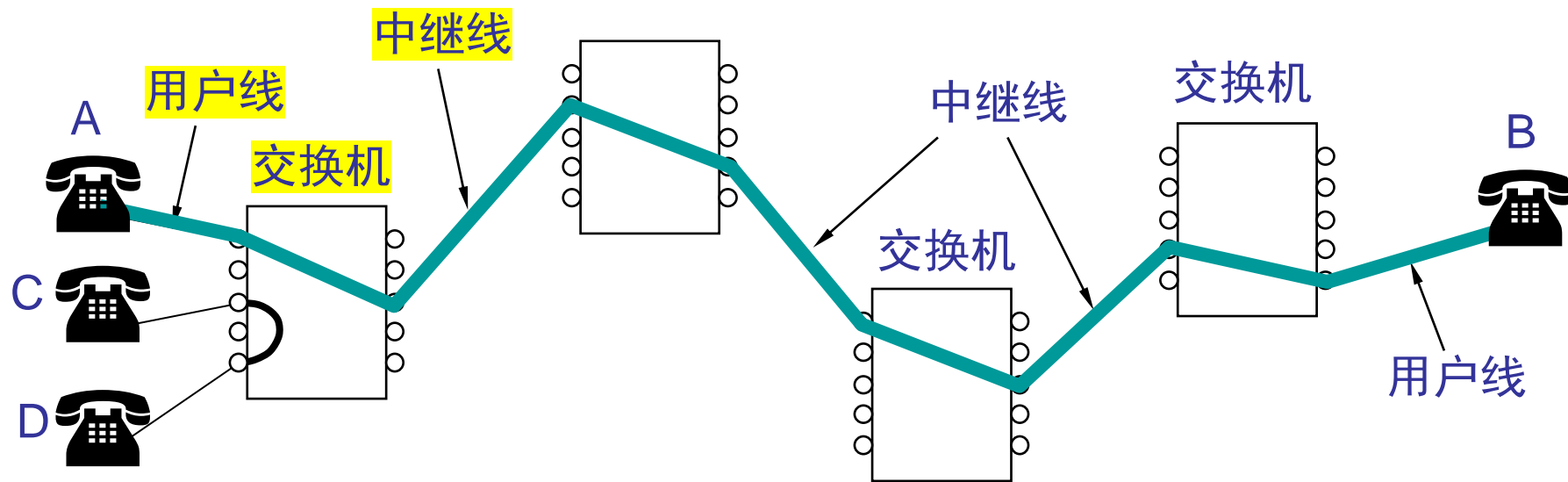


电路交换的特点

- 在通信开始之前，要在两个通信设备之间建立起一条完全被通信双方所占用的物理通路。其过程包括以下三个步骤：
 - ① 电路建立
 - ② 数据传输
 - ③ 电路拆除

电路交换例

- A 和 B 通话经过四个交换机
- 通话在 A 到 B 的连接上进行



2.5.2 报文交换

- 报文交换又称为存储转发。
- 基本原理：在报文的传输过程中，由网络的中间节点将报文暂时存储起来，检查它的正确性和完整性，然后再发往下一个节点。
- 缺点：在报文交换中，整个报文是作为一个整体来处理，由于报文较长，报文传输的延迟很大。
- 报文交换技术已被淘汰。

2.5.3 分组交换

- 较长的报文被分为较短的数据单元，然后每个数据单元被加上一些通信控制信息等内容，形成一个信息包(packet)。
- 通信时以包为单位发送、存储和转发。
- 信息包长度一般比报文短得多，因此可以在中间站点的主存队列中存储，而且只要信息包到达后就可以转发，而不必等待很长的报文全部到达。缩短了信息传输过程中的延迟时间。

分组交换与电路交换的比较，分组交换的特点

- 共享传输链路，提高使用效率；
- 有流量和拥塞控制，不会发生阻塞，但会使延迟增大；
- 可工作于广播和多播的方式；
- 具有提供多种通信设备互连；

分组交换两种类型

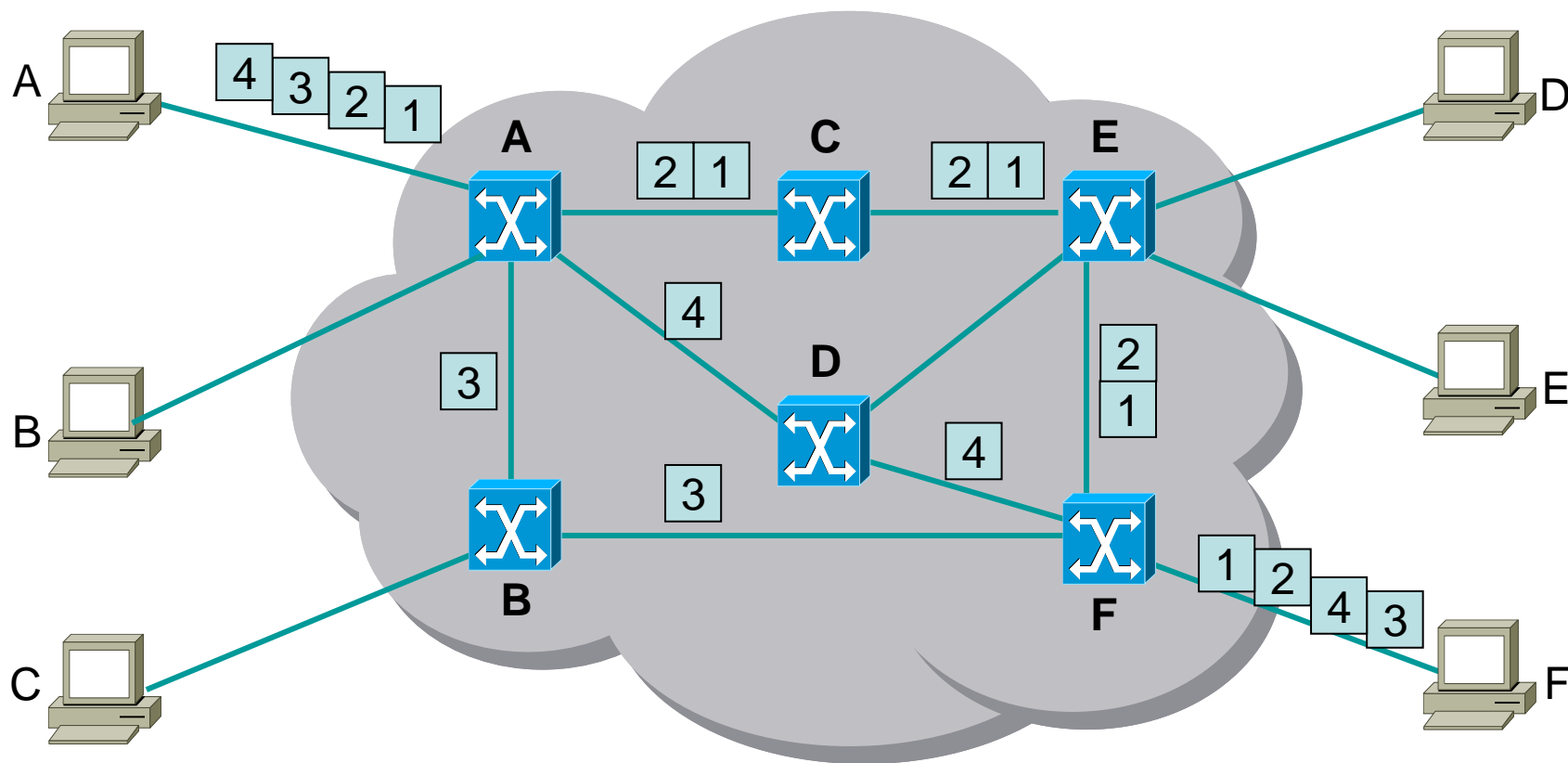
■ 数据报——面向无连接

- 在传输中每个包都将独立于其他包进行处理。任何一条链路可以同时为多对设备之间的通信服务。一次传输的数据报可能不是次序地到达目的地。重新排序的任务由传输层来完成。

■ 虚电路——面向连接

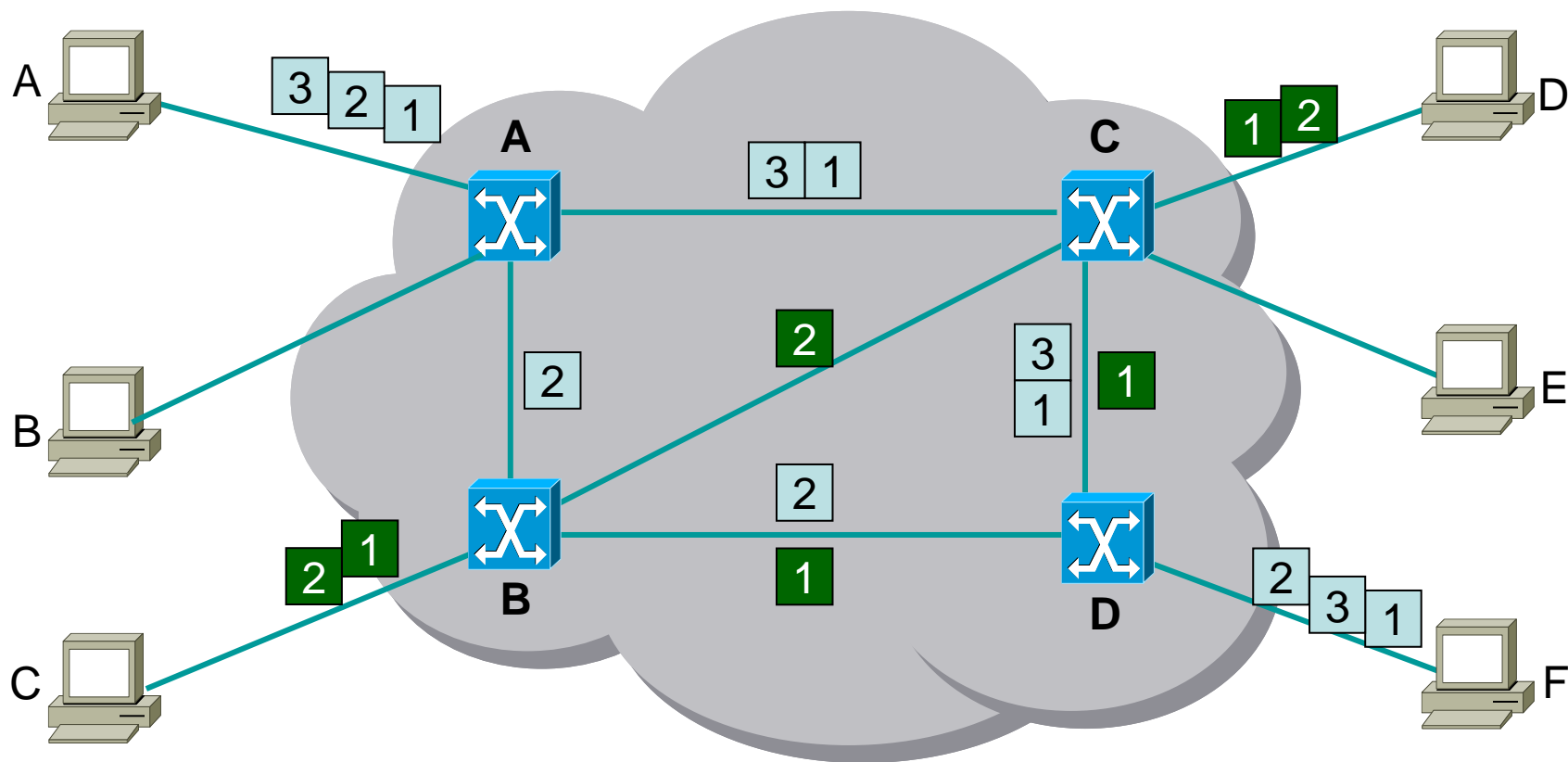
- 属于同一次通信的所有包之间的关系得以维持。路径是在数据传输的开始之前就被选定。
- 与电路交换的区别：虚电路可以同时为多个设备提供通信服务，而电路交换是独占的。

数据报



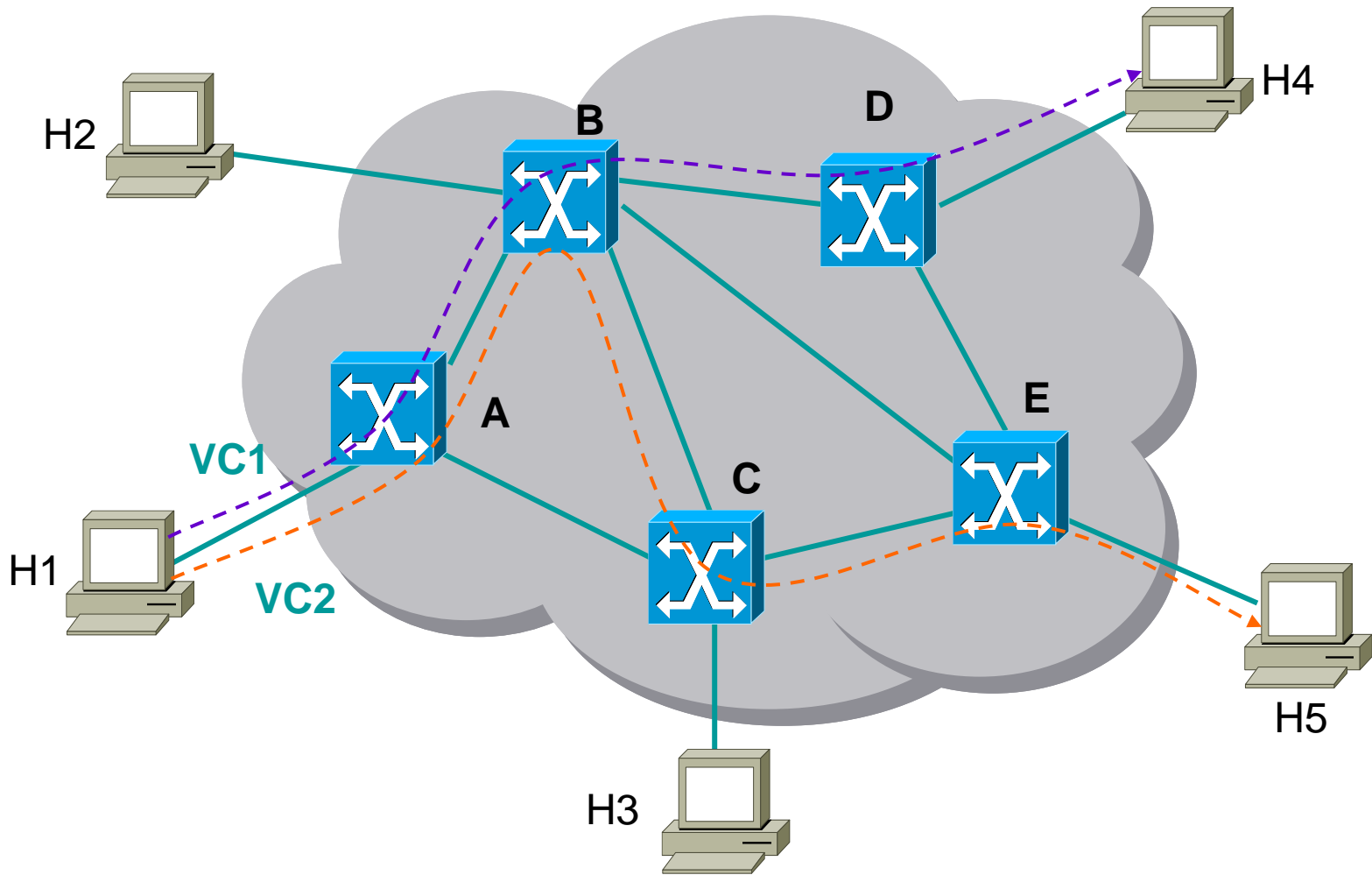
一条链路可以同时为多个设备服务

数据报



一条链路可同时为多个设备服务

虚电路



两种虚电路交换

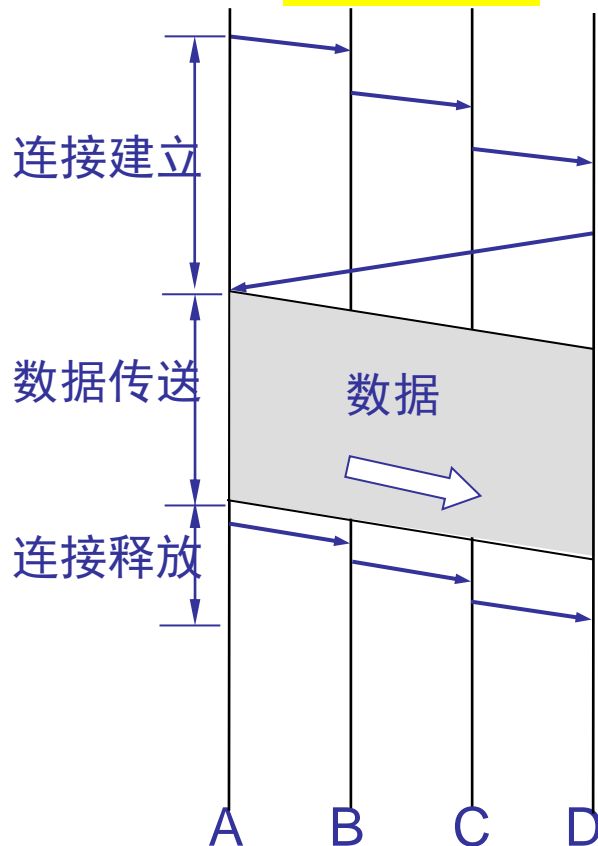
- 交换虚电路(SVC): 每条虚电路在需要的时候被创建, 而且仅仅在这次通信交换的过程中存在。
- 永久虚电路(PVC): 类似于租用线路, 在这种方法中, 两个用户之间存在一条相同的虚电路, 该电路是专门提供给特定用户的, 这条虚电路总是建立好的。

虚电路交换优点

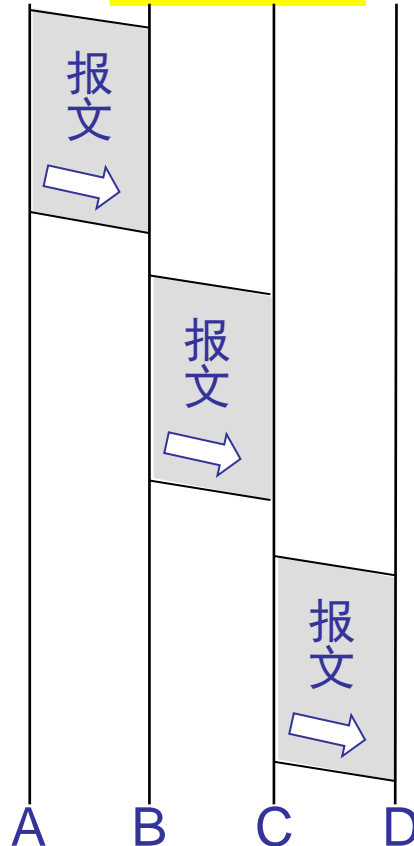
- 在采用虚电路的情况下，仅在建立虚电路时需要目的地址，而进行数据传送时，每个包不需要携带完整的目的地址，而仅需要一个虚电路的号码标志。这就减少了包的控制信息，从而减少了额外开销。

三种交换方式的对比

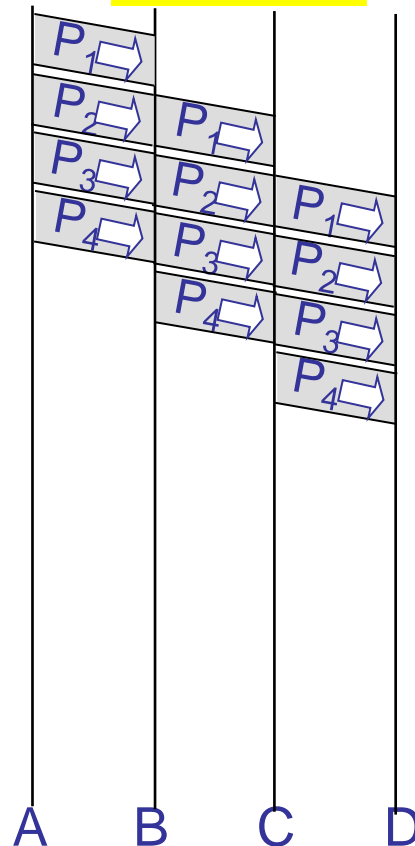
电路交换



报文交换

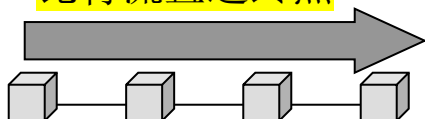


分组交换



数据传送
的特点

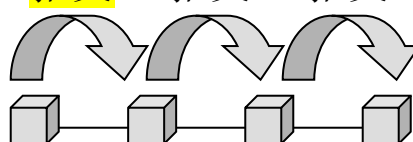
比特流直达终点



报文

报文

报文



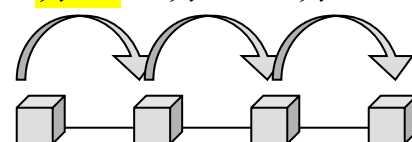
存储
转发

存储
转发

分组

分组

分组



存储
转发

存储
转发

2.6 错误检测和控制

- 三种错误类型:

- 单比特错误

- 多比特错误

- 突发错误

- 检错码: 给发送信息加上冗余位, 使其具备检错功能。

- 纠错码: 能纠正错误的冗余码。

- 编码效率: 数据信息在整个发送信息的比重。

2.6.1 奇偶校验码

- 奇偶校验(Parity checking): 计算数据单元中1的个数
- 偶校验: 设 m 位数据单元 $b_1b_2b_3\cdots b_m$, 则:
$$r = b_1 \oplus b_2 \oplus b_3 \oplus \cdots \oplus b_m$$
- 奇校验: 设 m 位数据单元 $b_1b_2b_3\cdots b_m$, 则:
$$r = b_1 \oplus b_2 \oplus b_3 \oplus \cdots \oplus b_m \oplus 1$$
- 发送数据时, 连同校验位 r 一起发送。接收方根据结果, 判断是否发生差错。

奇偶校验

0101001 0111001 1011101 1100111

数据传输方向

■ 垂直(纵向)偶校验

校验位产生：看后面8位是否有偶数个1

1 0101001 0 0111001 1 1011101 1 1100111

数据传输方向

■ 水平(横向)偶校验

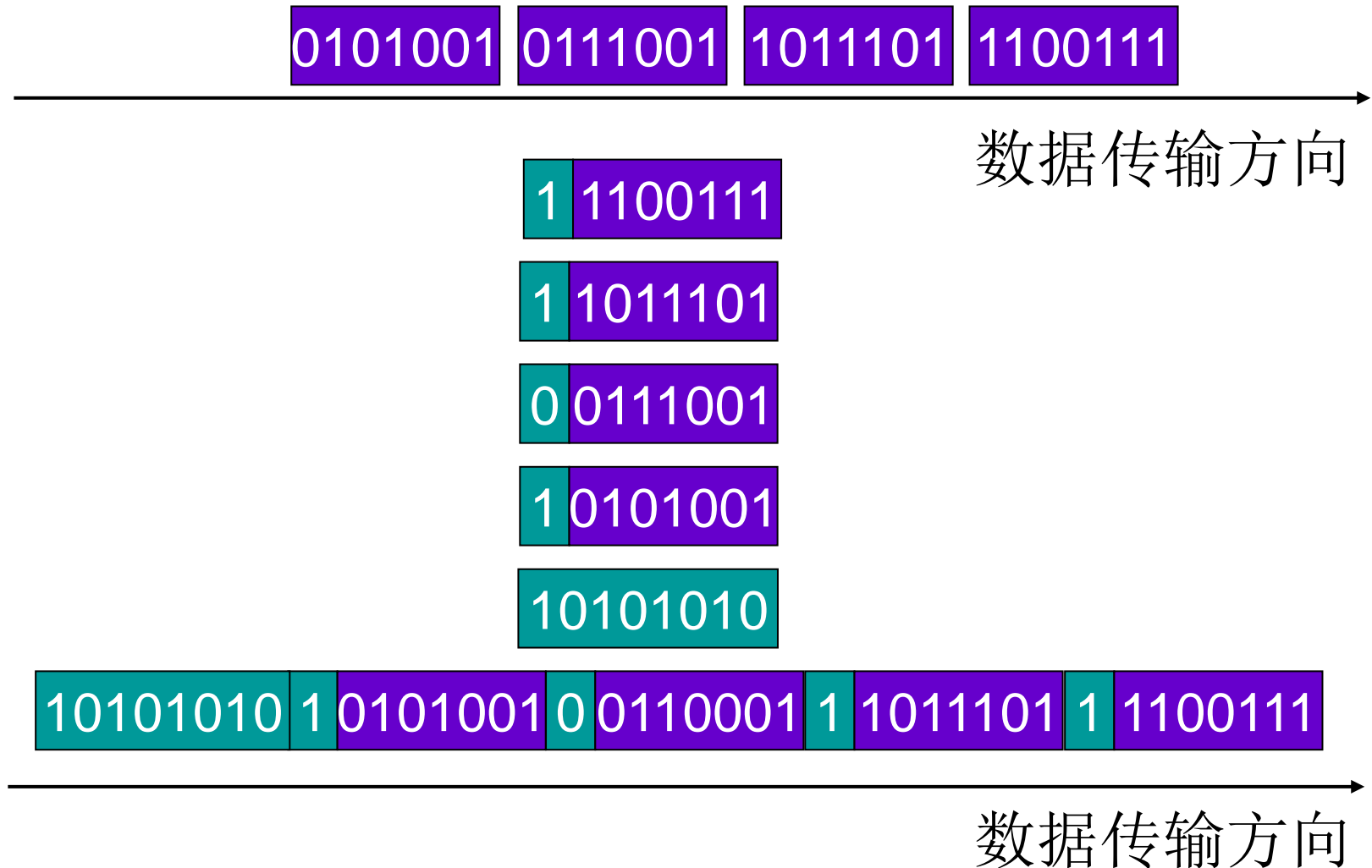
0101010 0101001 0111001 1011101 1100111

校验位产生：看每一块相应位（本例有4个块）总共是否有偶数个1

数据传输方向

奇偶校验

■ 水平垂直(纵横)偶校验



检错能力

垂直偶校验	数据单元内单比特错误 多比特/突发错误：奇数个比特错误
水平偶校验	数据块内各数据单元同一位上奇数个错误 单个数据单元内的突发错误
纵横偶校验	除了数据块中偶数个数据单元中偶数个相同位发生错误不能检测，其它错误都能检测。

2.6.2 循环冗余校验码CRC

- 通信双方约定一个生成多项式 $G(x)$ ，最高阶为 m ；
 - 例： $G(x)=x^4+x^3+1=11001$ ，即 $m=4$
- 设待发送的信息为 $U(x)$ ；
 - 例： 1101011
- 用 $x^m U(x)$ 除以 $G(x)$ 得 m 位余数 $R(x)$ ，即在 $U(x)$ 后面添 m 个零后除以 $G(x)$ 。
- 将 $R(x)$ 放在 $U(x)$ 之后得循环校验码。

CRC

- 接收方用收到的数据除以生成多项式 $G(x)$ ，如果结果为0，传输没有错误，否则，说明传输产生错误。
- 除法的规则是：
 - 没有借位
 - 模2法则
($1-1=0$; $1-0=1$; $0-0=0$; $0-1=1$)

例1

■ $U(x)=1101011$, $G(x)=x^4+x^3+1=11001$

1 1 0 0 1

生成多项式G(x)

							1	0	0	1	0	1	0
1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0		
1	1	0	0	1									
	0	0	1	1	1								
	0	0	0	0	0								
		0	1	1	1	1							
		0	0	0	0	0							
			1	1	1	1	0						
			1	1	0	0	1						
				0	1	1	1	0					
				0	0	0	0	0					
					1	1	1	0	0				
					1	1	0	0	1				
						0	1	0	1	0			
						0	0	0	0	0			
							1	0	1	0			

添加4个0

余数R(x)

最后发送的数据是: 11010111010

例2

■ $U(x)=10010110$, $G(x)=x^5+x^2+x=100110$

1 0 0 1 1 0

生成多项式G(x)

1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0	<div style="text-align: center;">1 0 0 0 1 1 1 1</div>
1 0 0 1 1 0	
0 0 0 1 1 1 0 0 0	
1 0 0 1 1 0	
1 1 1 1 0 0	
1 0 0 1 1 0	
1 1 0 1 0 0	
1 0 0 1 1 0	
1 0 0 1 0 0	
1 0 0 1 1 0	
0 0 0 1 0	

添加5个0

最后发送的数据是: 1001011000010

余数R(x)

检错能力

- 选择合适的 $G(x)$ ，其最高阶次为 r ，能检出：
 - 所有奇数位的突发性错误
 - 所有长度小于 r 的突发性错误
 - 以 $(2^{r-1}-1)/2^{r-1}$ 概率检测长度为 $r+1$ 的突发性错误
 - 以 $(2^r-1)/2^r$ 概率检测长度大于 $r+1$ 的突发性错误

■ 例CRC-32:

$$x^{32}+x^{26}+x^{23}+x^{22}+x^{16}+x^{12}+x^{11}+x^{10}+x^8+x^7+x^5+x^4+x^2+x+1$$

以99.999 999 98%的准确率检测出所有长度大于33的突发性错误

2.6.3 校验和

■ 发送方:

- 将要发送的整个数据单元分成大小都为 n （一般为16）比特的若干段。
- 将这些分段采用反码加法算法加在一起，得到一个 n 比特长的结果。
- 该结果取反后得到一个 n 比特长的检查和。
- 将检查和当作冗余位加在原始数据单元的末尾，随原始数据单元一起发送给接收方。

■ 接收方:

- 按照发送方的方法将整个数据块分成大小为 n 的若干段，其中最后一段为检查和。
- 将这些分段采用反码加法算法加在一起，得到一个 n 比特长的结果。
- 如果结果为 n 个1，则传输正确，反之，则是错误的。

数据单元的校验和

发送方

1100111	1011101	0111001	0101001
---------	---------	---------	---------

相加，
如果最后有进位加到第一位

取反，
得到的校验和放到发送数据的末尾

第一段
第二段
第三段
第四段
校验和

1100111
+ 1011101

1 1000100
.....→ 1

1000101
+ 0111001

1111110
+ 0101001

1 0100111
.....→ 1

0101000
↓ 取反
1010111

1100111	1011101	0111001	0101001	1010111
---------	---------	---------	---------	---------

接收方

1100111	1011101	0111001	0101001	1010111
---------	---------	---------	---------	---------

相加，
如果最后有进位加到第一位

校验和相加，
结果全为1则无差错

第一段
第二段
第三段
第四段
校验和
结果为全1 无差错

1100111
+ 1011101

1 1000100
.....→ 1

1000101
+ 0111001

1111110
+ 0101001

1 0100111
.....→ 1

0101000
+ 1010111

1111111

小结

- 信息、数据和信号
- 模拟通信和数字通信
- 数据通信的技术指标
- 数据的传输
- 通信线路的连接方式
- 信道的通信方式
- 信号的传输方式
- 数据传输的同步技术
- 复用和数据交换技术
- 错误检测和控制

第二次随堂考试

- XX代表该名学生的学号后两位。
- 请在试卷上端书写以下内容：
- 第二次随堂考试,日期：21.10.04
- 行号：YY 列号：YY
- 班级：YY 学号：YY 姓名：YY
- 第一题：基带以太网的波特率是(XX)MBaud, 则其数据传输率是多少？。