

计算机网络

胡亮 等编著

第2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 多路复用技术

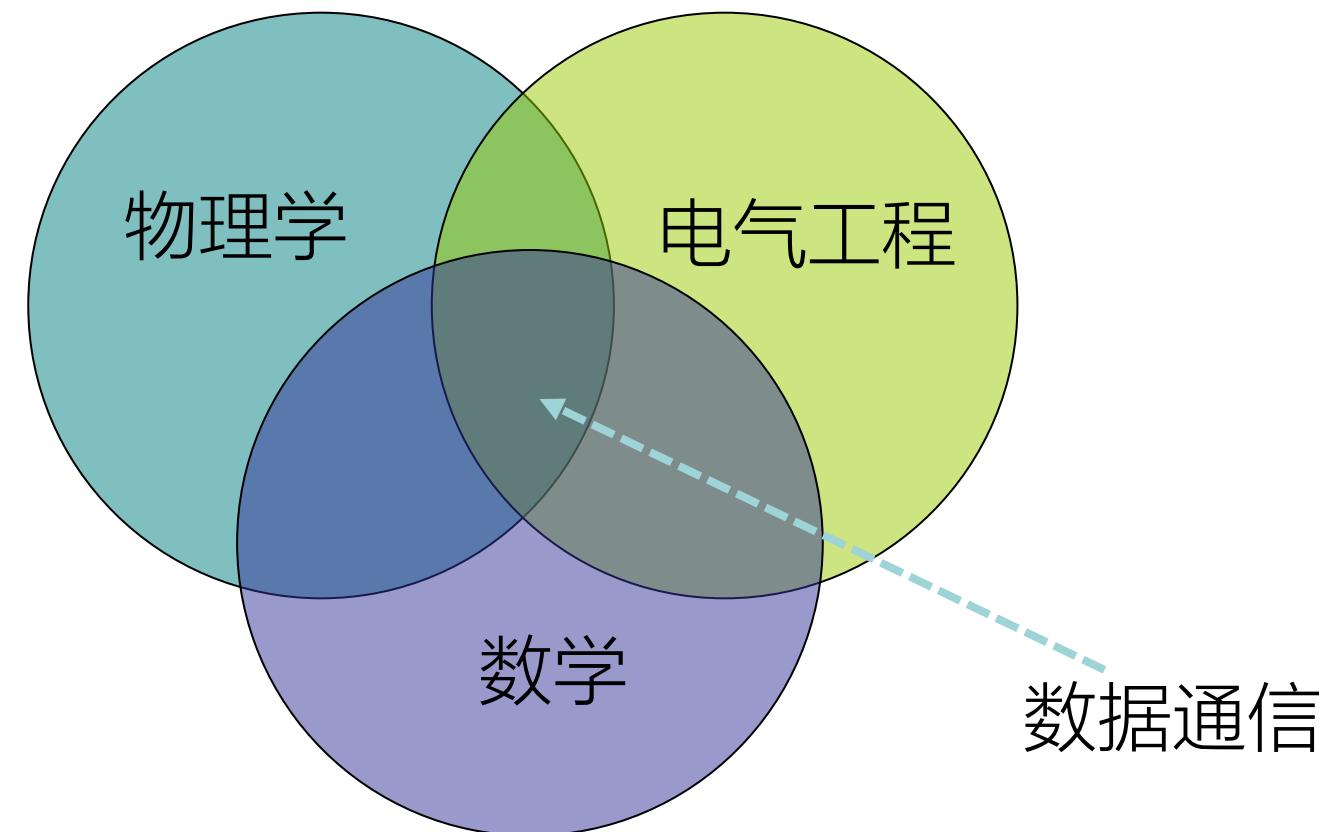
2.4 数据交换技术

2.5 错误检测和控制

2.6 本章小结

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



通信系统的传输方式

■ 模拟传输：

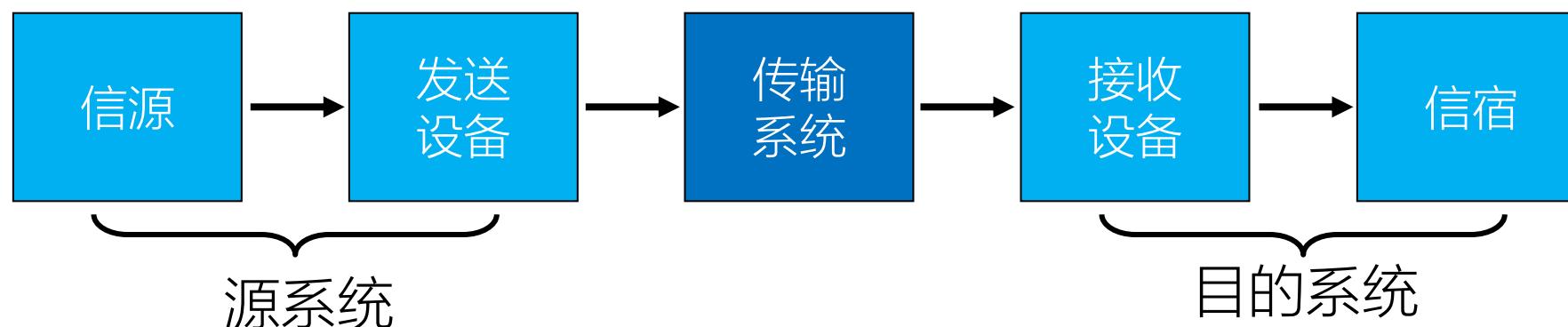
- 模拟数据传输不关注信号的内容，只关心尽量减少信号的衰减和噪声
- 长距离传输时采用信号放大器，同时放大了信号中的噪声

■ 数字传输：

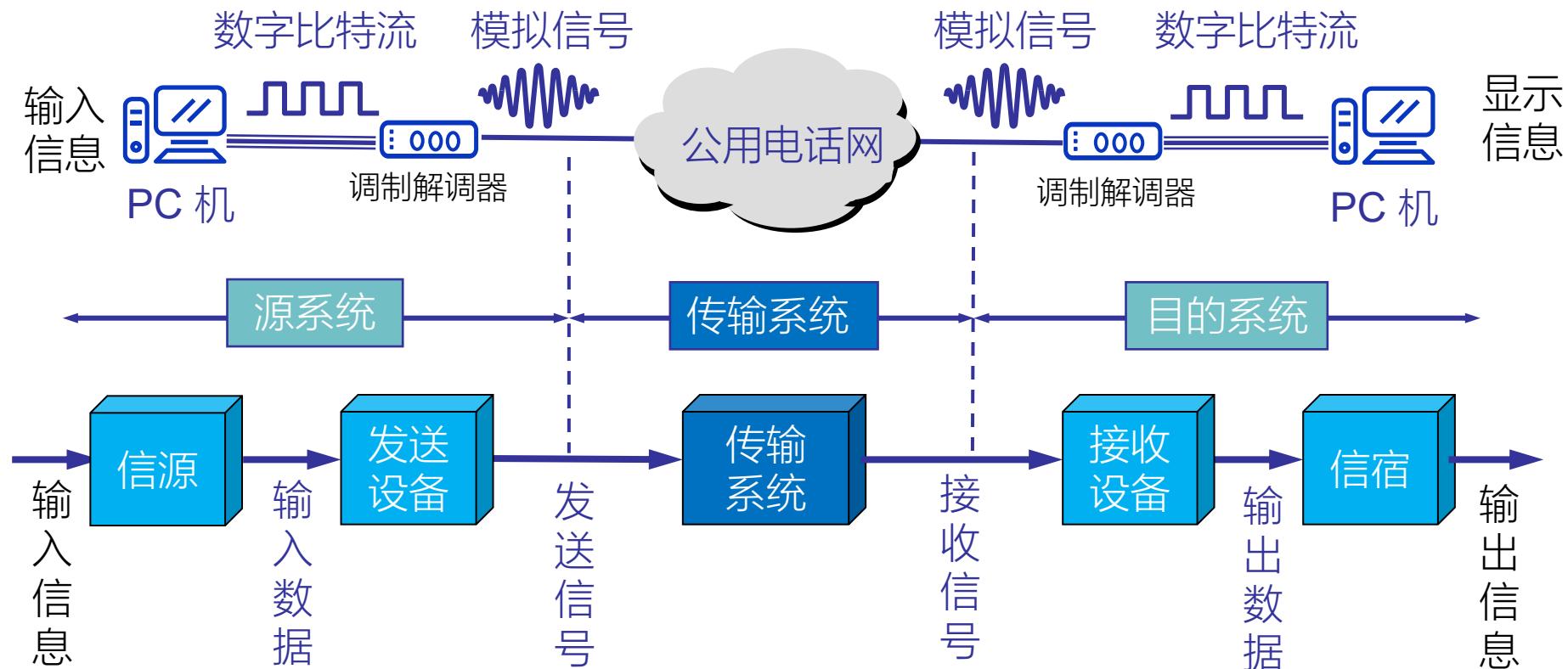
- 数字数据传输关注信号的内容
- 可以传输数字信号和模拟信号
- 长距离传输时采用转发器，可以消除噪声的累积

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



数据通信系统示例



数据通信系统解决的问题与技术指标

■ 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
- 恢复
- 报文格式
- 网络管理

■ 主要技术指标

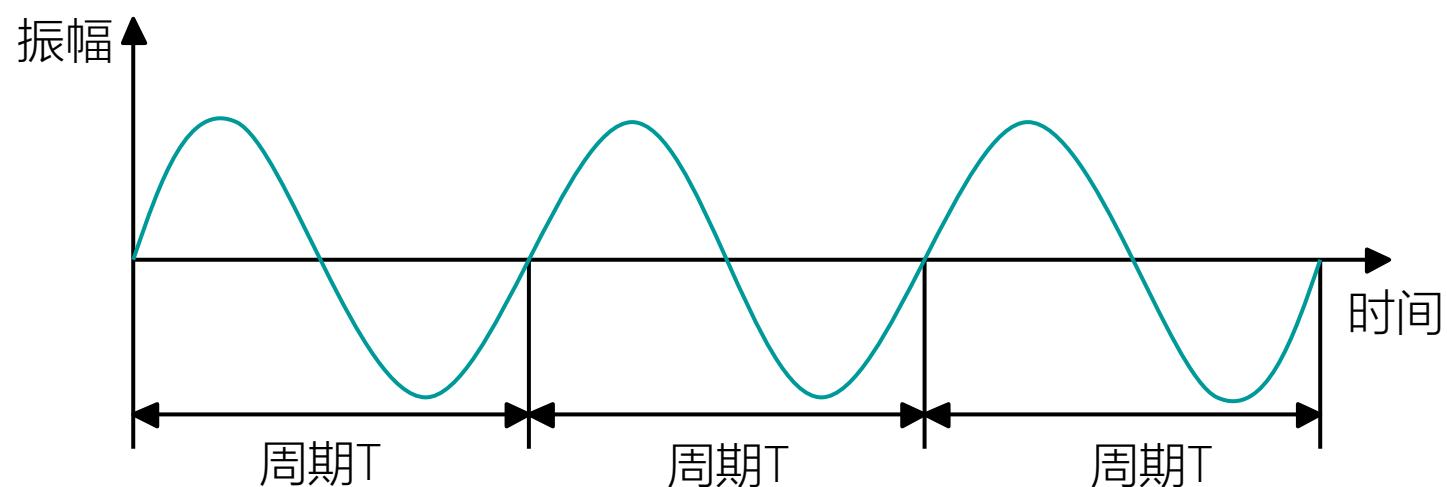
- 码元速率
- 数据传输率
- 误码率
- 误比特率

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

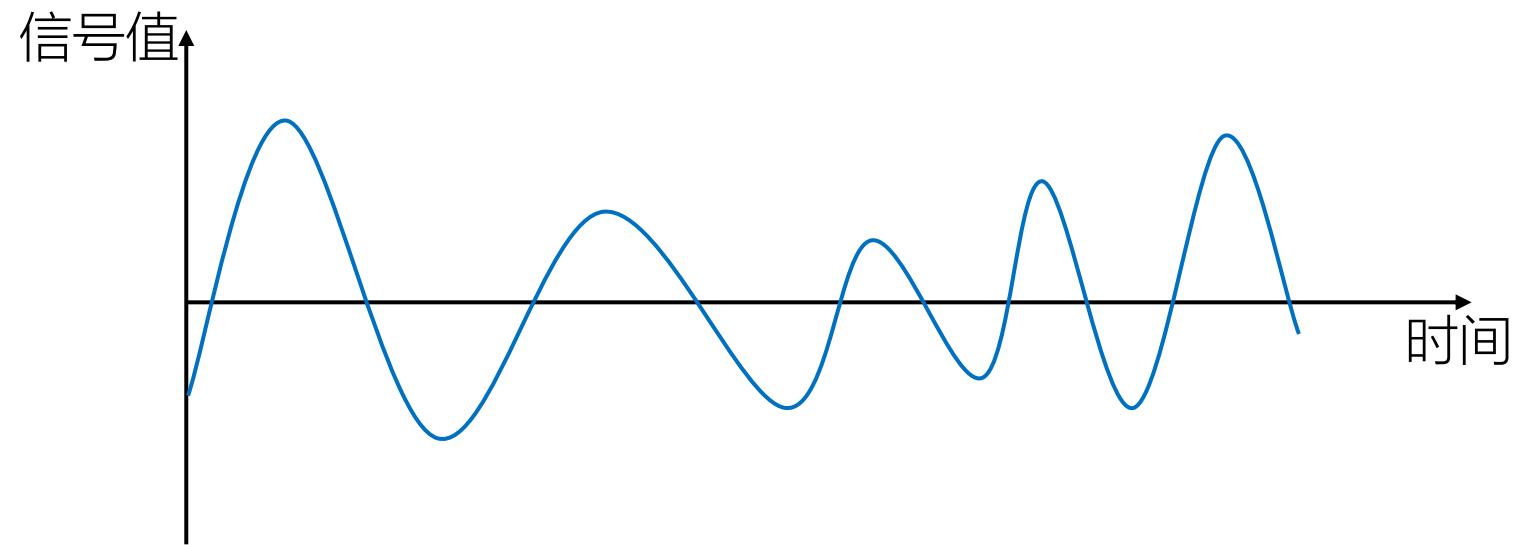
模拟信号

- 模拟信号：随时间而连续变化的信号，分为简单模拟信号和复杂模拟信号
- 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



模拟信号

■ 复杂模拟信号

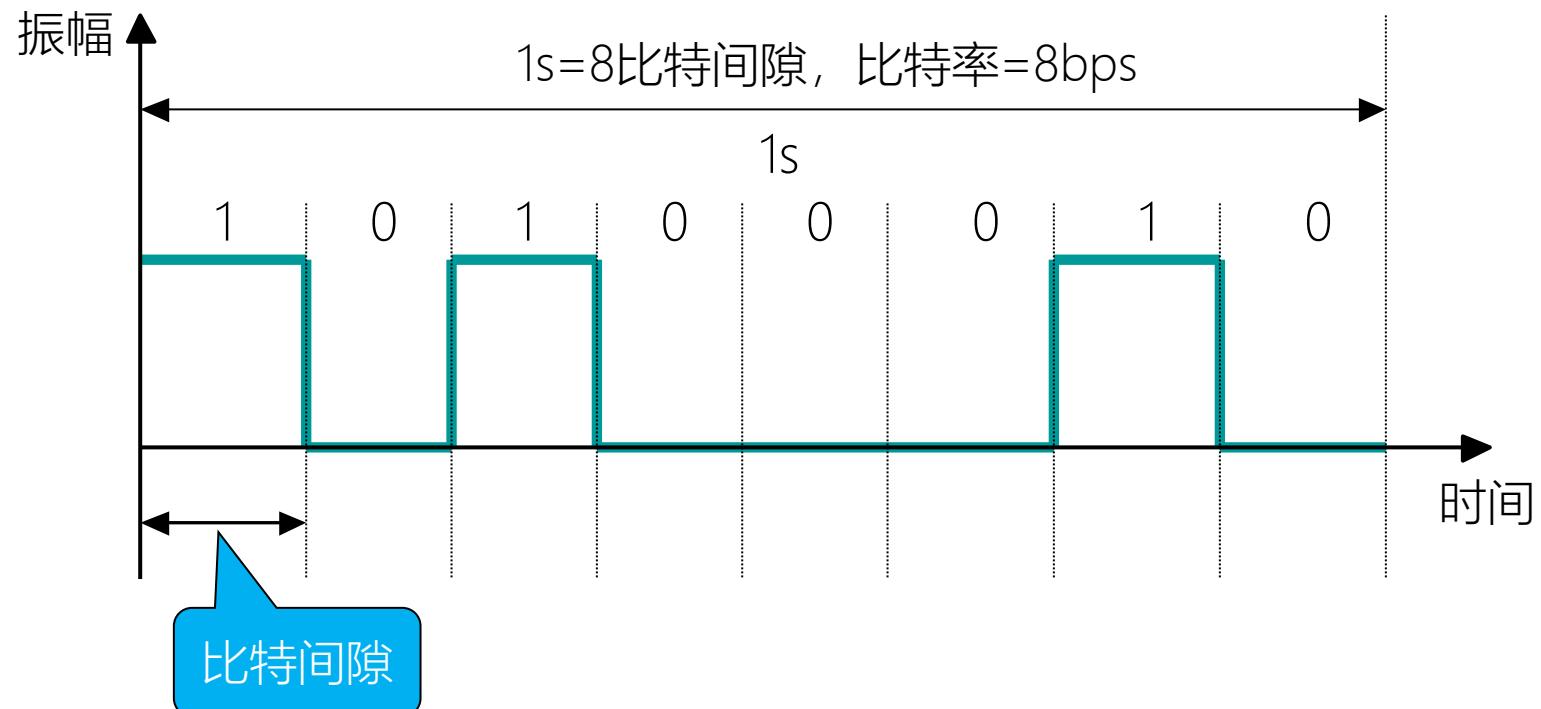


$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

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 (bps或b/s)



信息编码

■ 编码：信息用信号来表示的方法

■ 编码的四种方式：

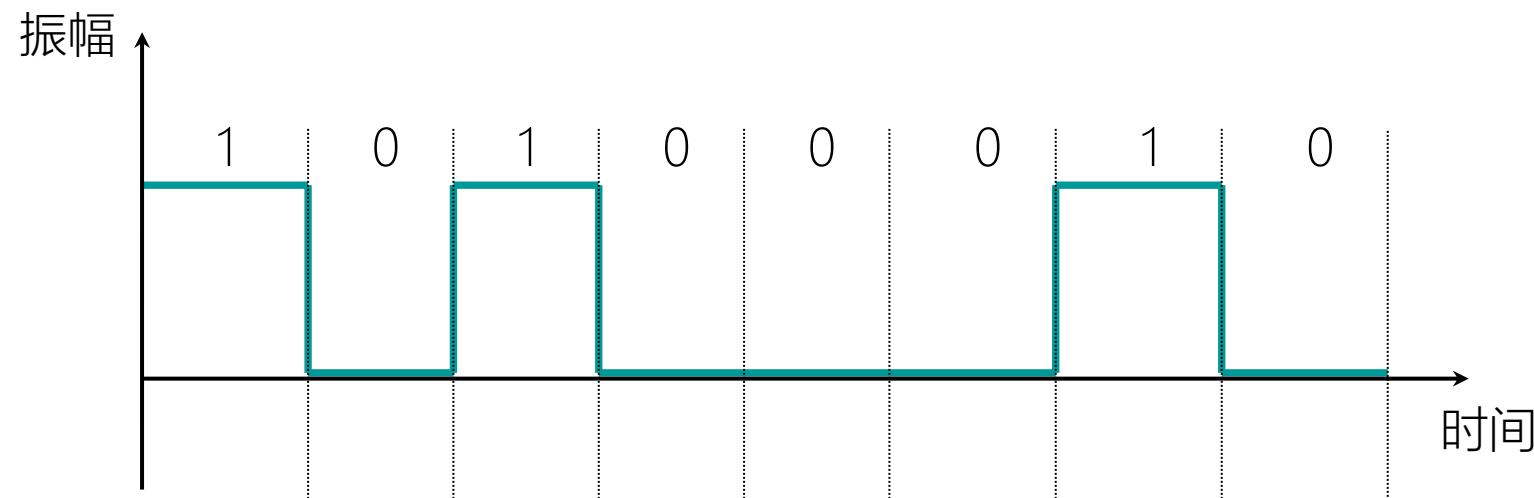
- 数字—数字
- 数字—模拟
- 模拟—数字
- 模拟—模拟

数字—数字编码

- 数字—数字编码：用数字信号来表示数字信息。
- 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
- 数字—数字编码常见方案：
 - 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：正、负电压

- 减轻了单极性编码中的直流分量问题

- 常见极化编码

- 非归零编码(NRZ)

- 非归零电平编码
 - 非归零反相编码

- 归零编码(RZ)

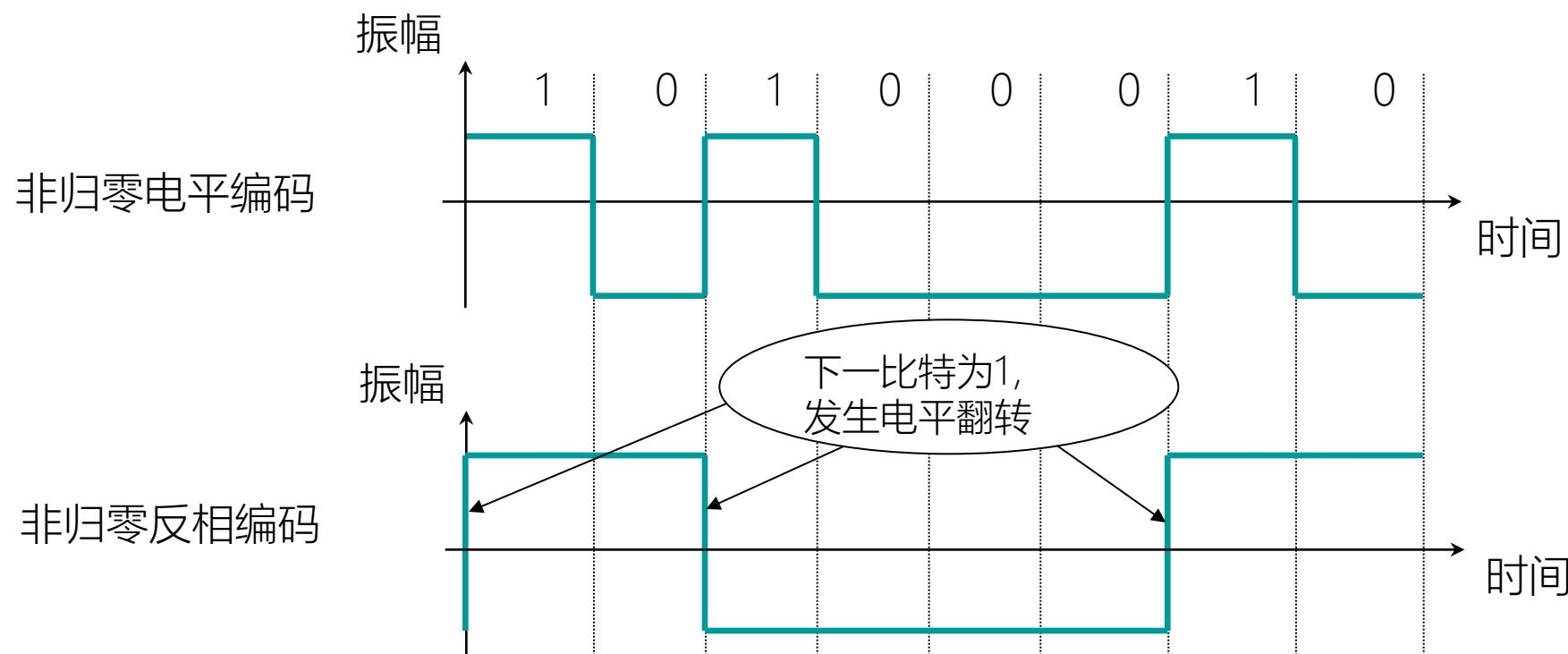
- 非归零电平编码
 - 非归零反相编码

- 双相位编码

- 曼彻斯特编码
 - 差分曼彻斯特编码

非归零编码

- NRZ-L：信号的电平代表比特
- NRZ-I：电平翻转代表1，否则代表0



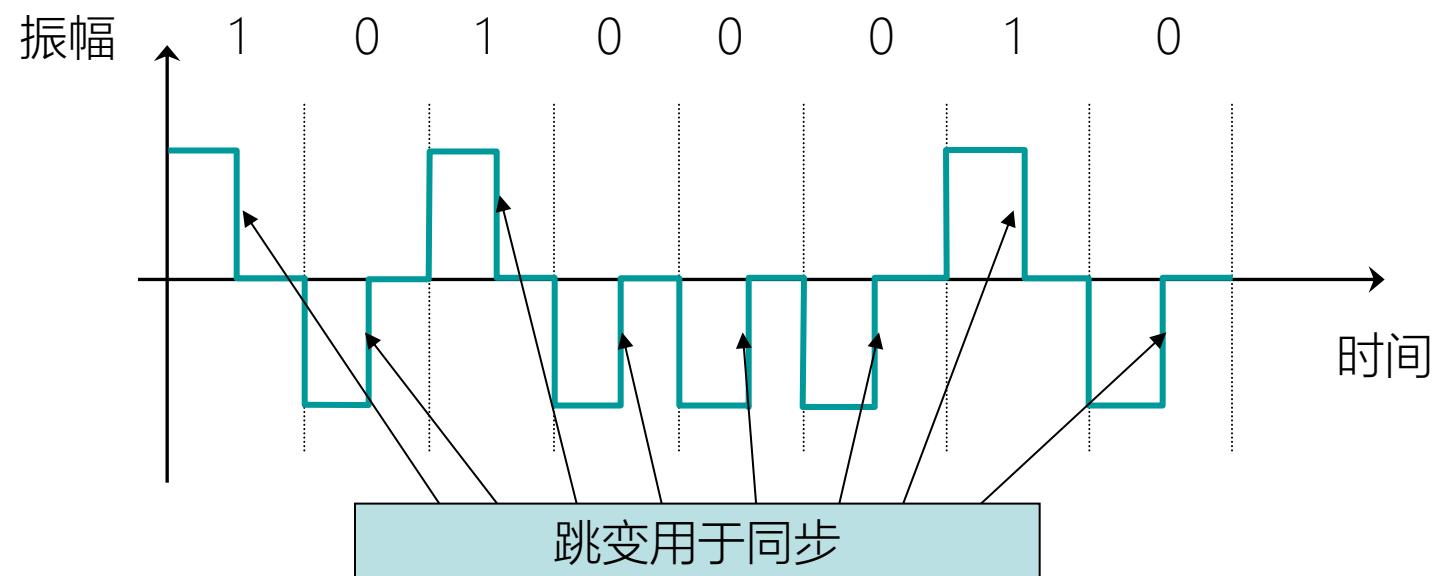
4B/5B编码

- 解决连续0或1导致的同步丢失问题
- 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16种组合，5位32种组合
- 组合选取原则
 - 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

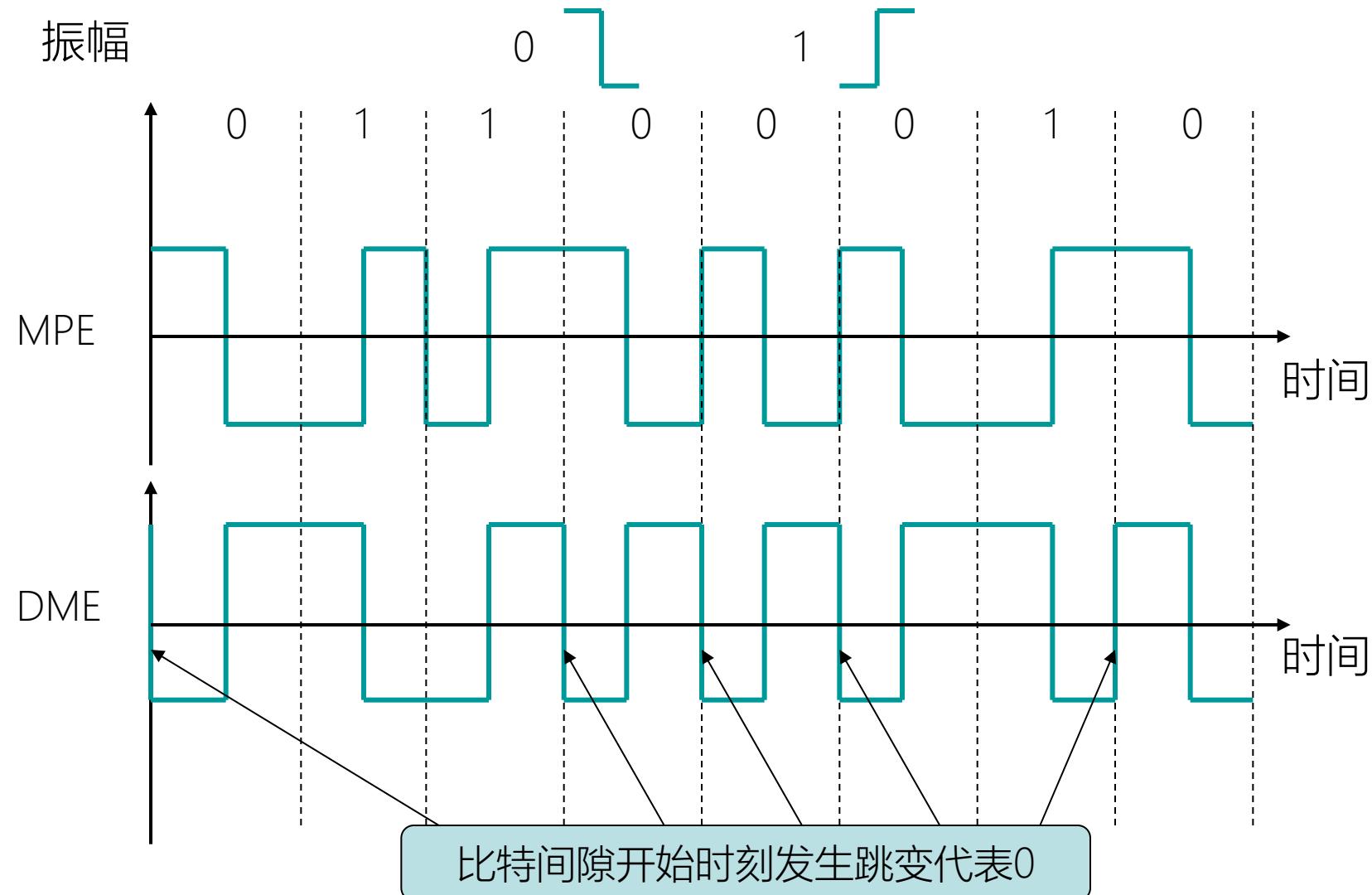
- 使用3个电平：正电平、负电平和零
- 在每个比特间隙的中间，信号将归零
- 正电压到零的跳变代表1，负电压到零的跳变代表0，比特中间的跳变可用于同步



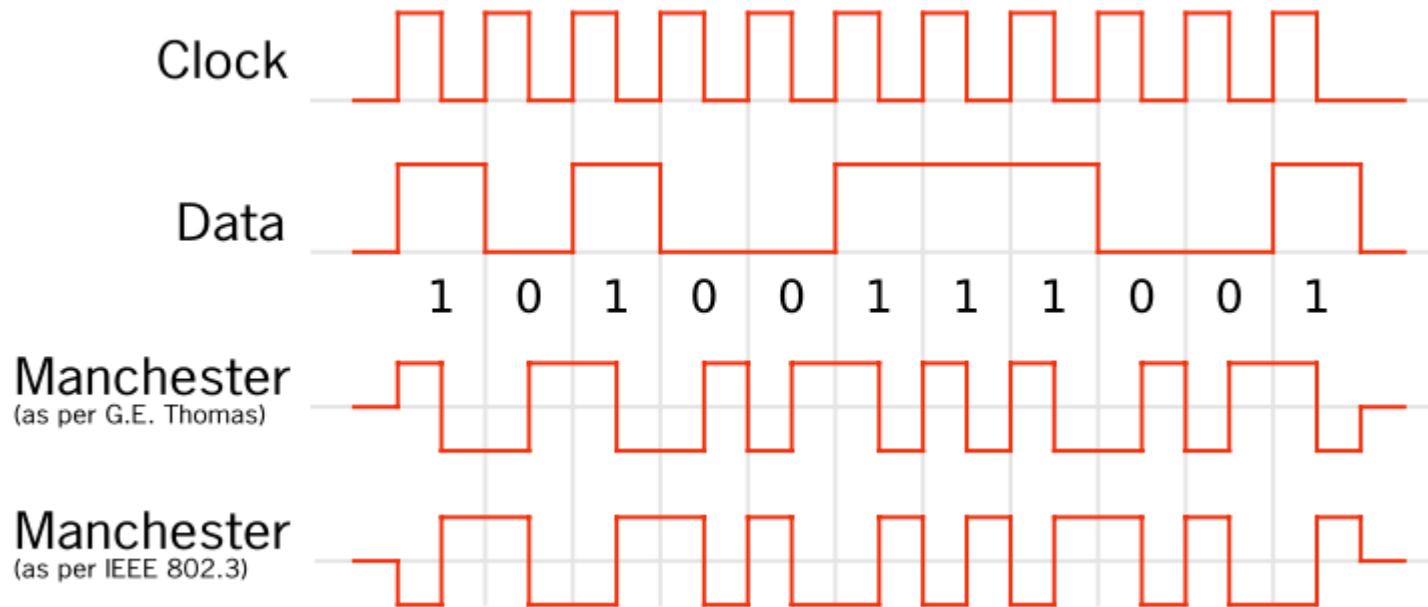
双相位编码

- 信号在每比特间隙的中间发生改变，并不归零，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（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 和 DME



MPE信号的生成



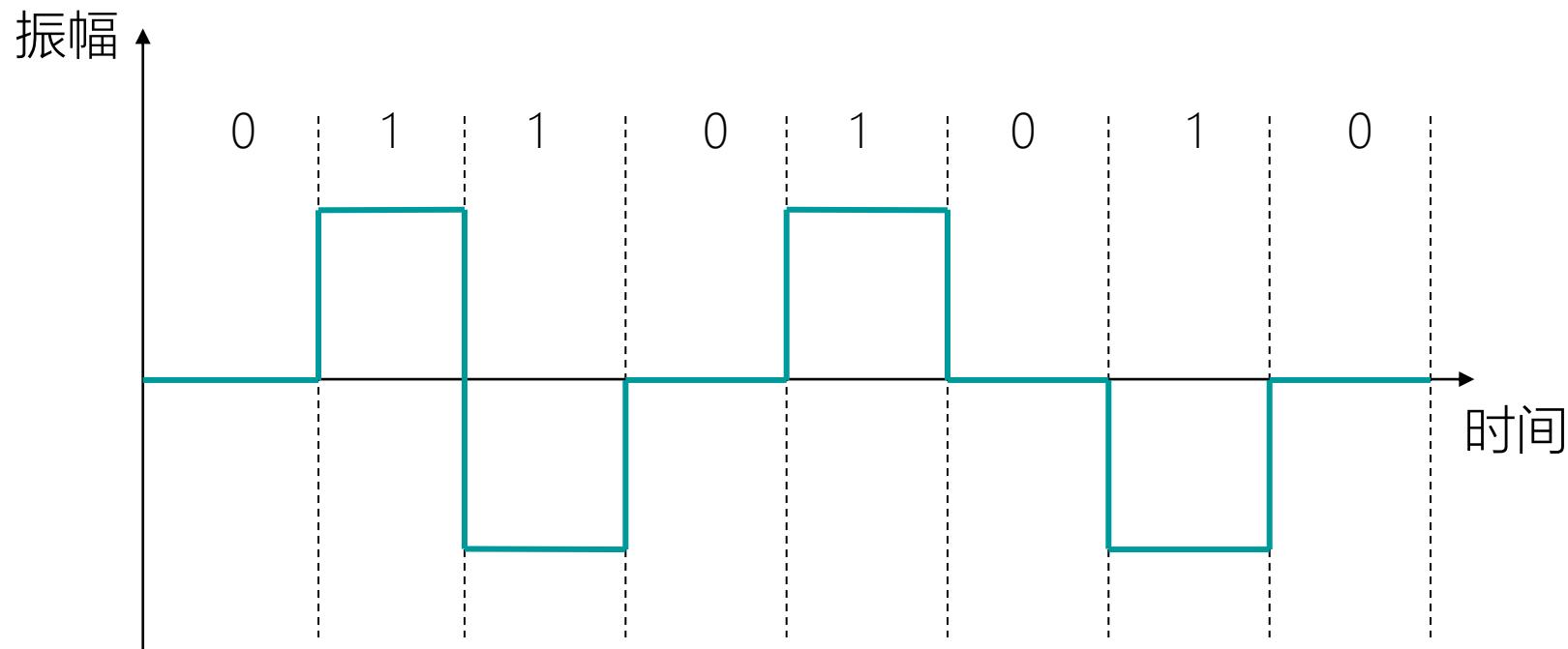
时钟与数据 XOR运算	时钟	数据	信号
	0	0	0
	1	0	1
	0	1	1
	1	1	0

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)
 - 8零替换吗(B8ZS)
 - 高密度双极性3零编码(HDB3)

信号交替反转码

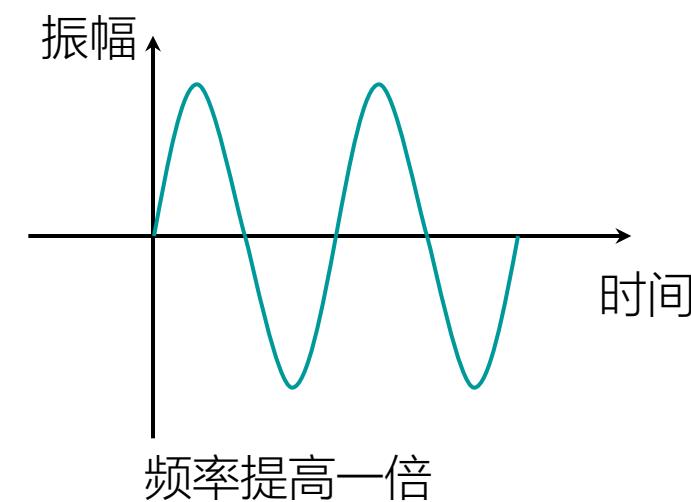
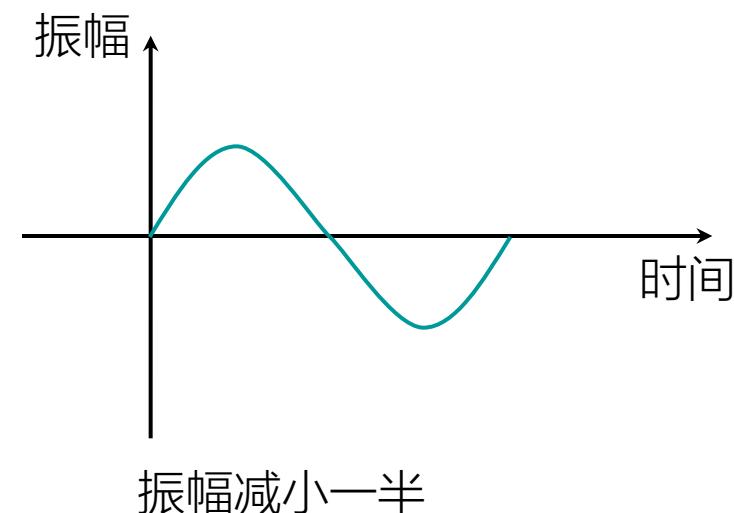
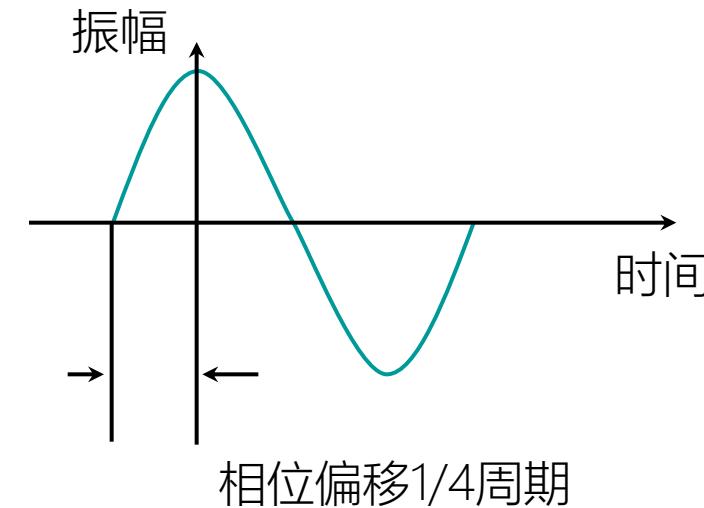
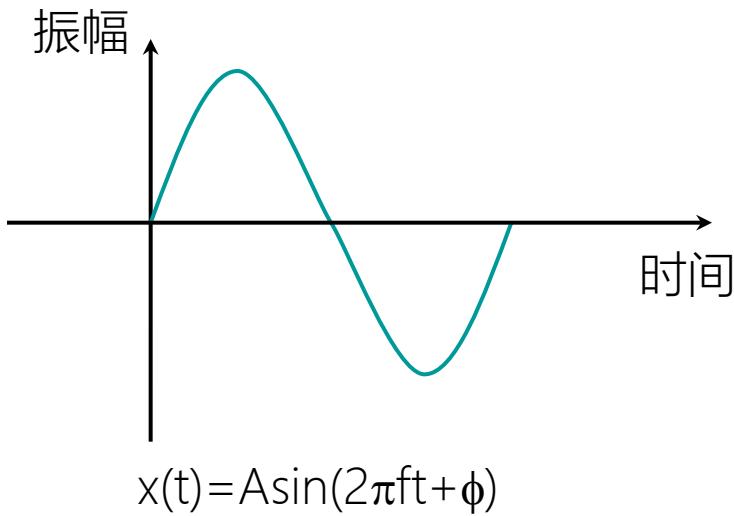
- 0电平代表比特0，
- 比特1由交替的正负电平代表



数字—模拟编码

- 利用模拟信号表示数字信息的技术
- 调制技术：用模拟信号的幅值、频率、相位来代替数字1和0。
- 四种常用编码机制：
 - 幅移键控 (ASK)
 - 频移键控 (FSK)
 - 相移键控 (PSK)
 - 正交调幅 (QAM)

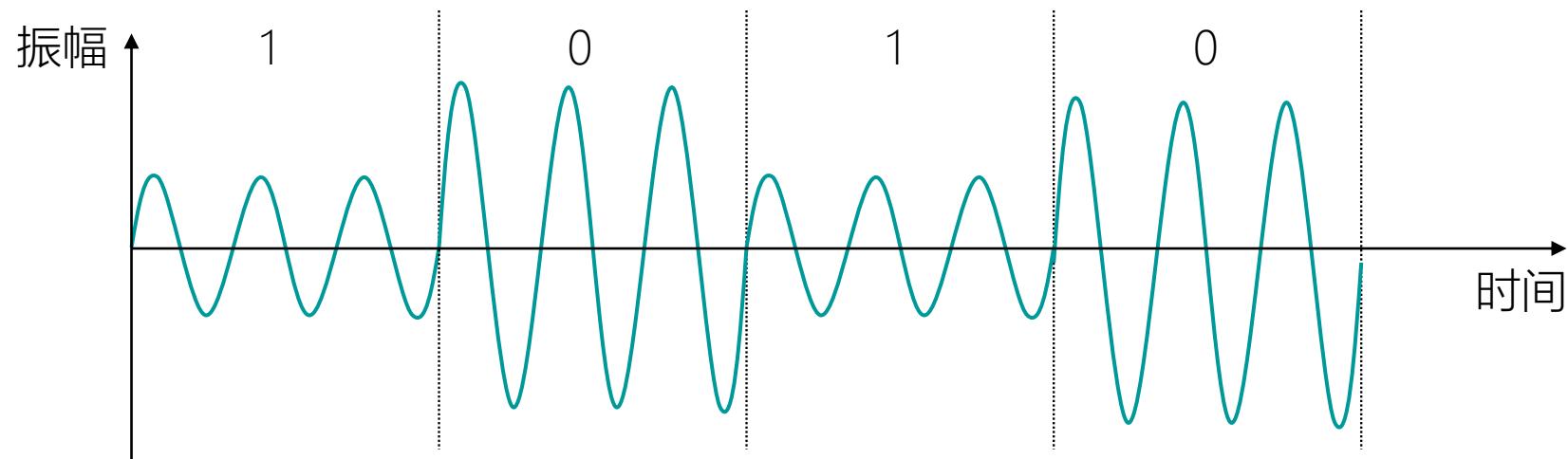
正弦波的参数变化



幅移键控(ASK—Amplitude shift key)

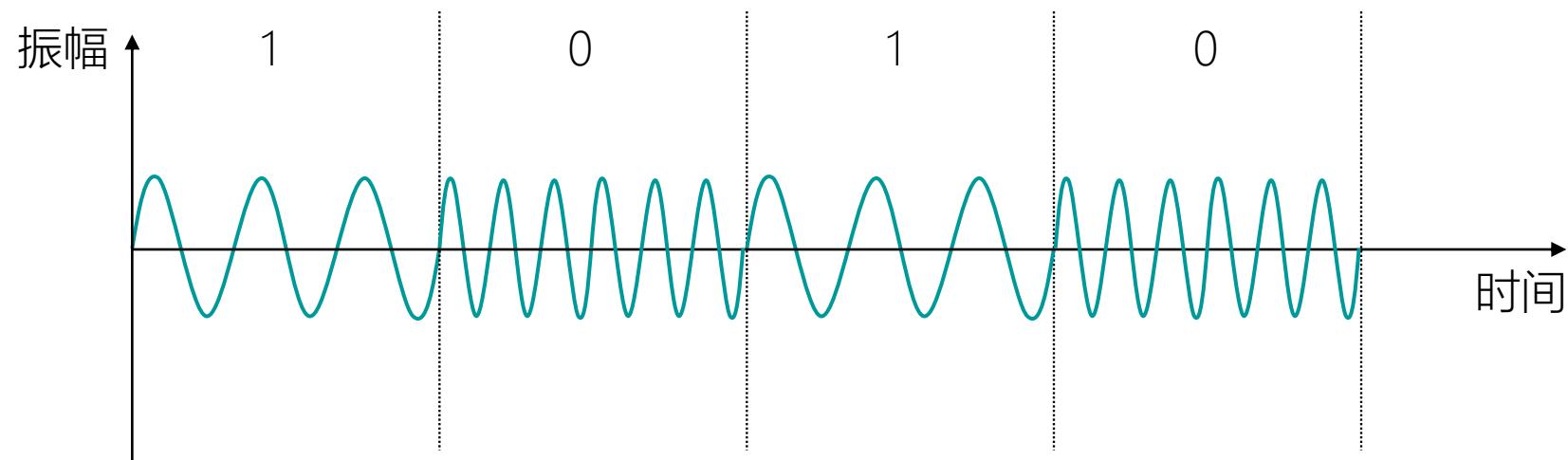
- 用载波的不同幅度代替数字0, 1

- 例如：高幅表示0，低幅表示1
 - 缺点：抗干扰能力差



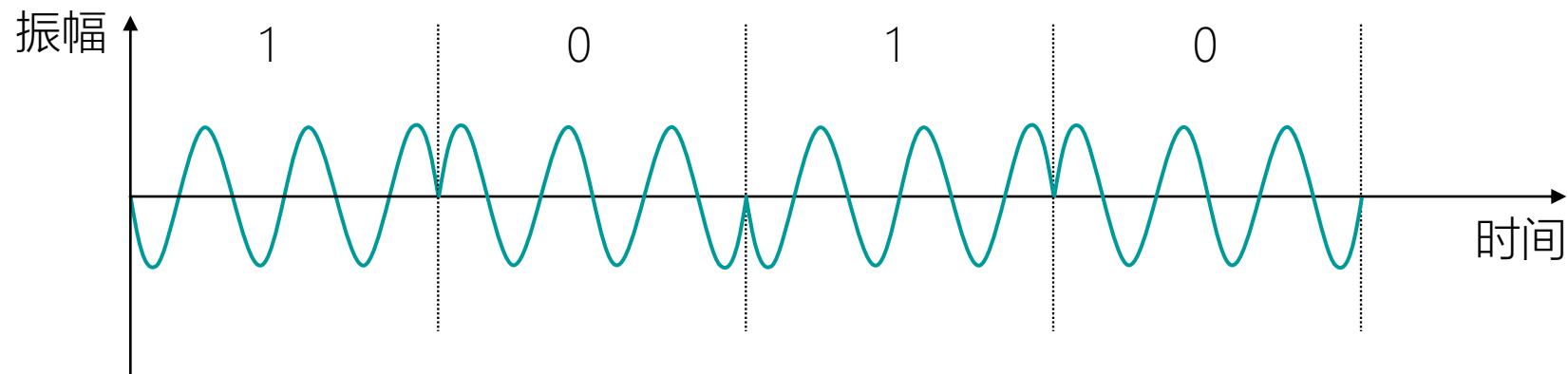
频移键控

- 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



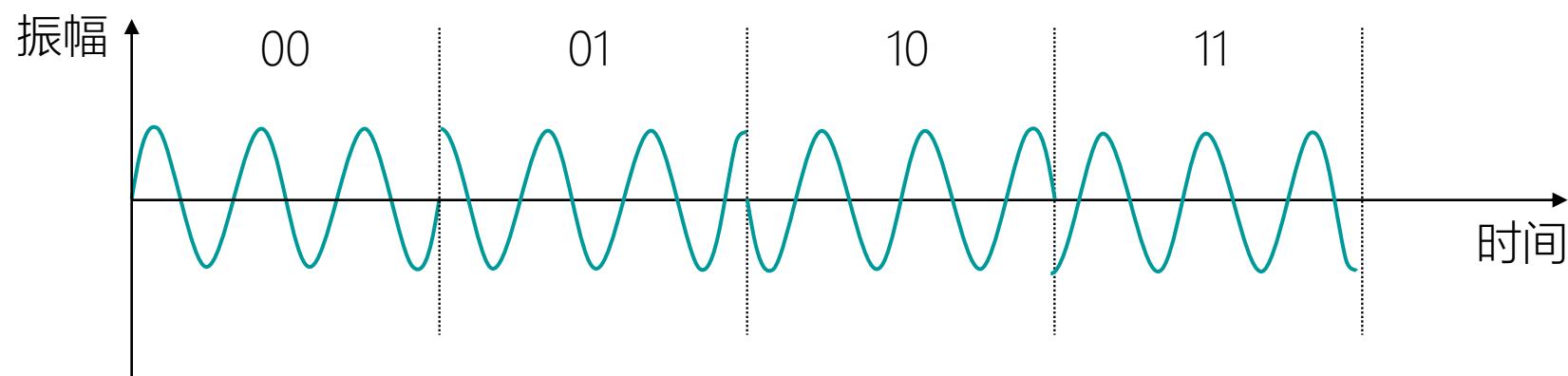
相移键控

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

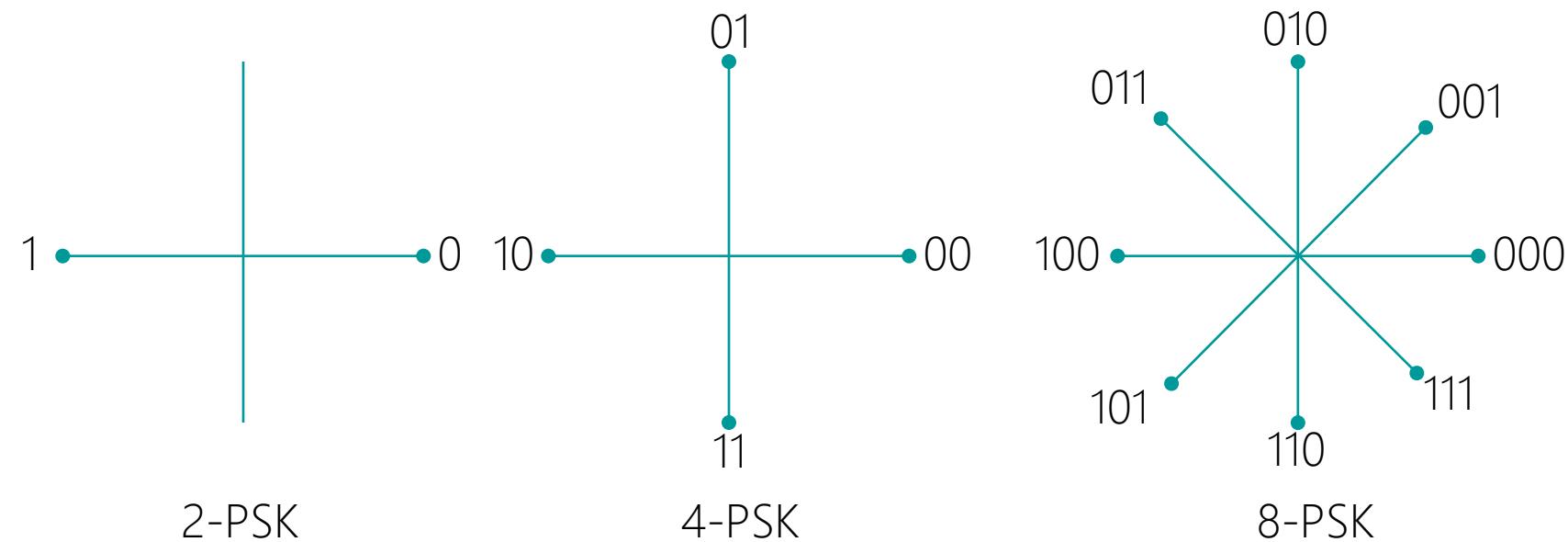


相移键控

- 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。

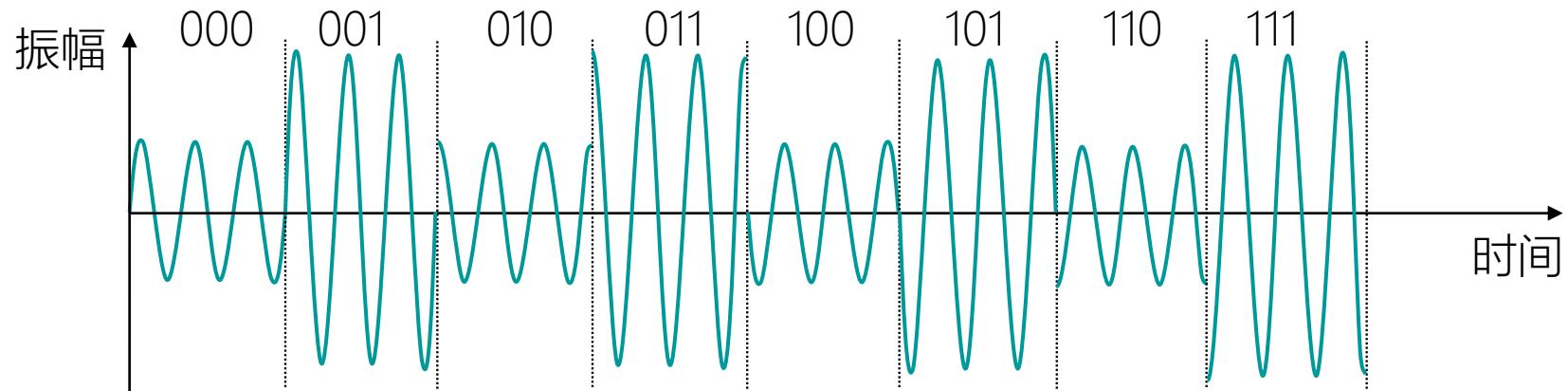


相移键控星座图

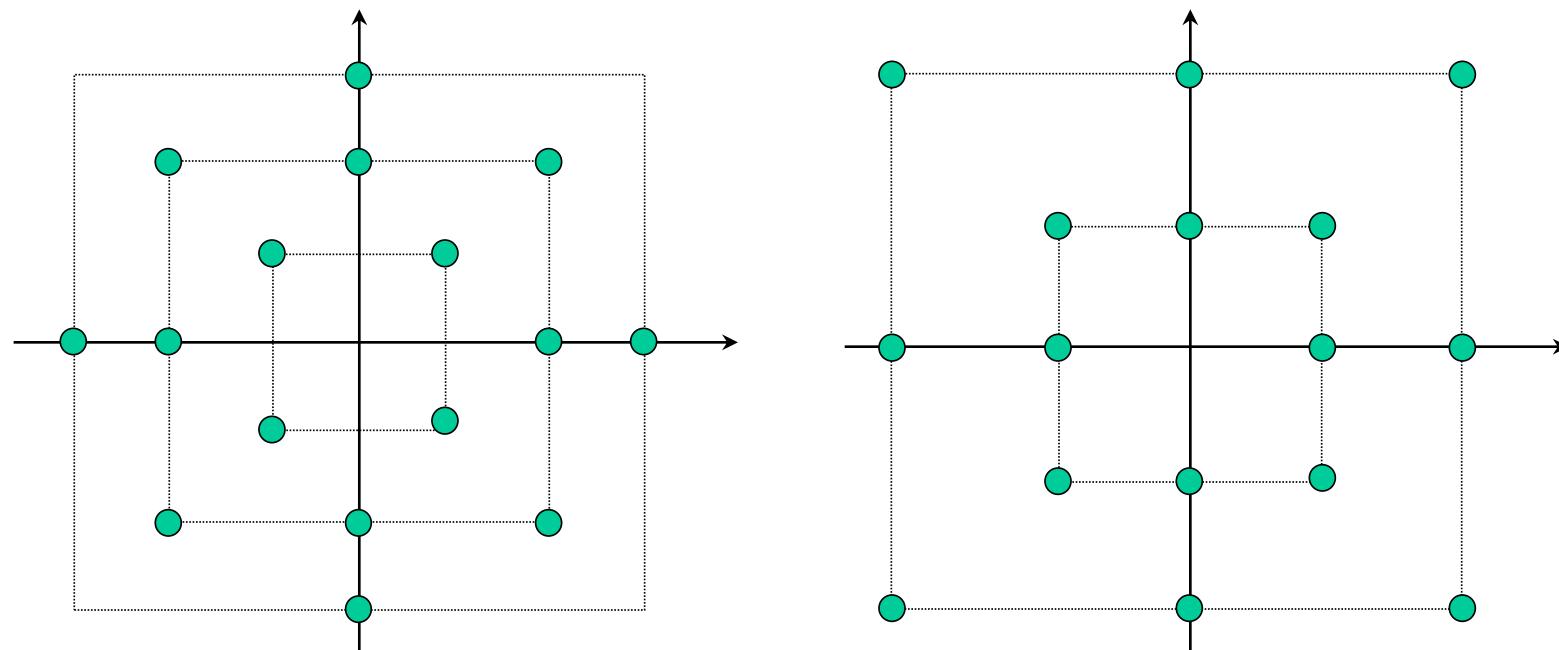


正交调幅

- 正交调幅：ASK和PSK结合起来的编码方法



正交调幅星座图



两种16相位QAM星座图

模拟—数字编码

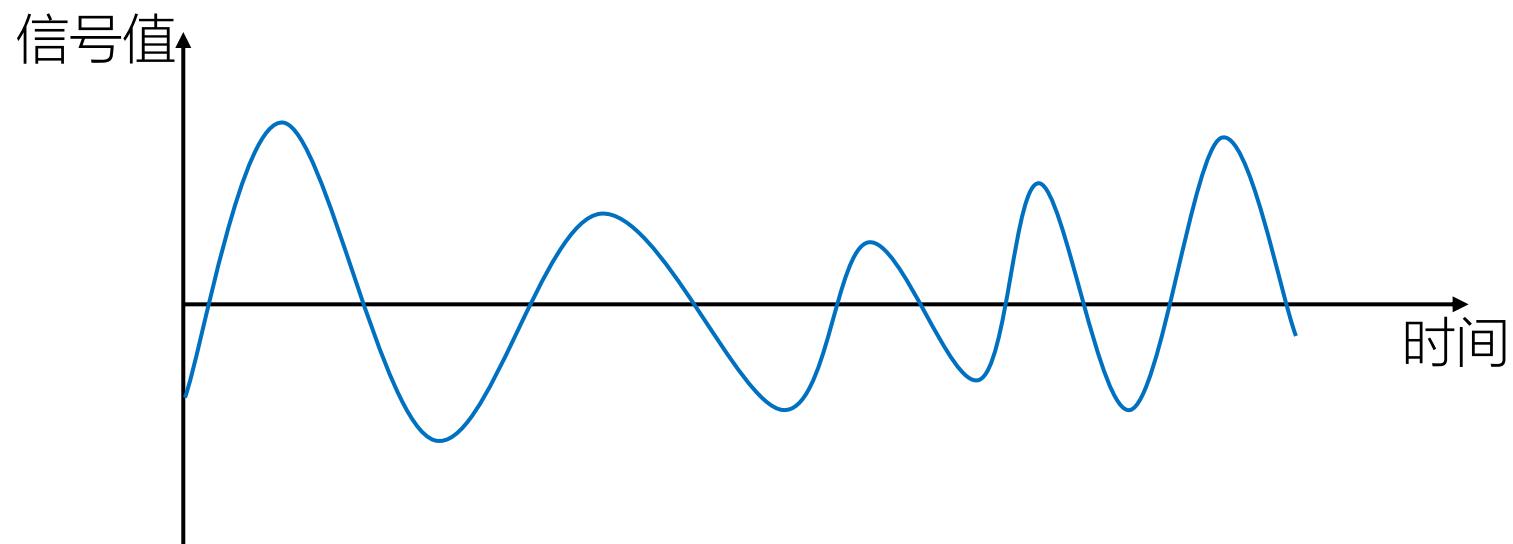
- A/D数据采集：主要应用自动控制系统
- 需要3步：
 - 采样：将连续的模拟信号离散化
 - 量化：离散的采样值用2进制位数量化
 - 编码：对量化后的数据用2进制编码
- 采样定理：采样频率大于信号最高频率的2倍。

模拟—模拟编码

- 传统有线电视、电话系统等
- 声音信号的频率范围： $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$
 - 主要能量集中在 $300\text{Hz} \sim 3000\text{Hz}$ 之间

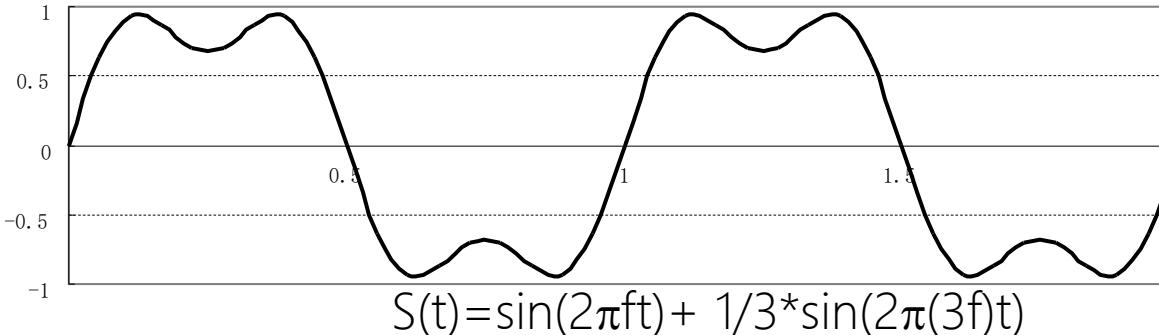
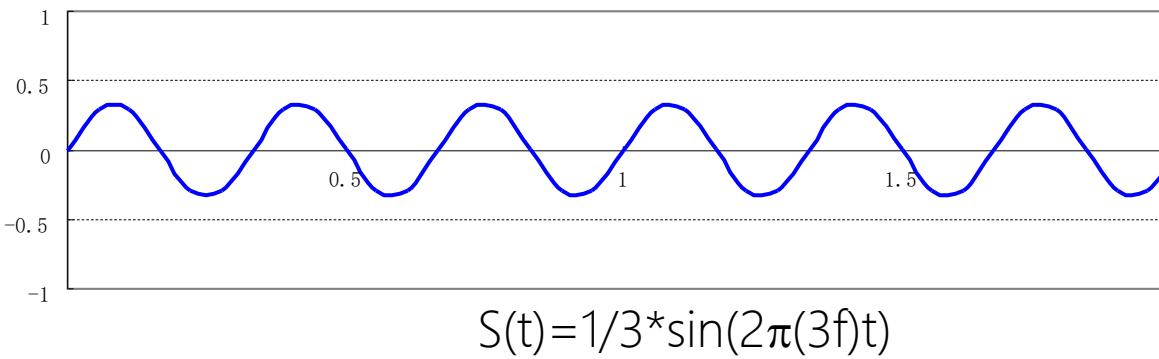
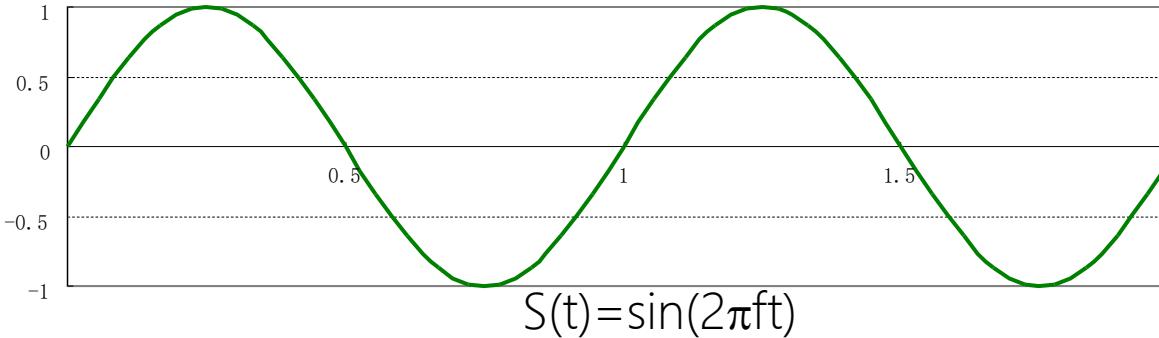
傅里叶分析与有限带宽信号

- 复杂模拟信号可以被分解为多个正弦波的迭加



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

傅里叶分析



几个相关的概念

- 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。

基带信号和带通信号

■ 基带信号(基本频带信号)

- 来自信源的信号，未进行频谱搬移和变换
- 计算机输出的代表各种文字、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
 - 解决方法：发送设备产生一个高频信号作为基波来承载信息信号
 - 基波称为载波信号

■ 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

奈氏准则

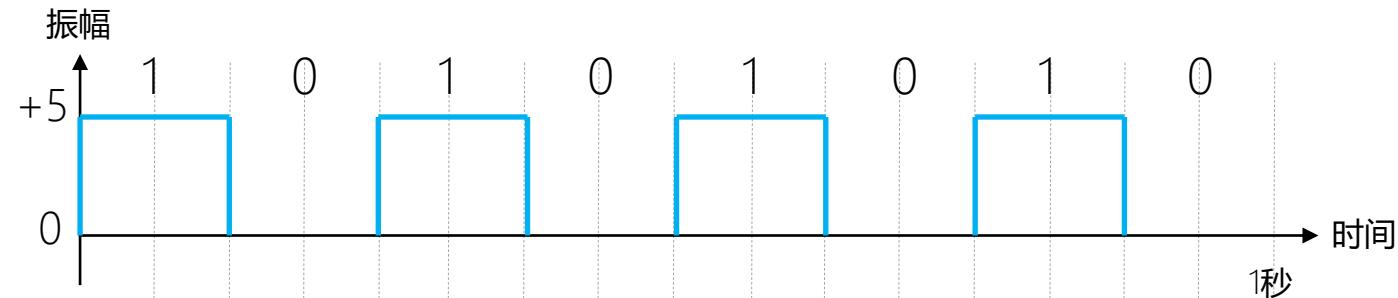
- 码元：携带数据信息的信号单元叫码元
 - 数字通信中用时间间隔相同的符号来表示二进制数字
 - 二进制码元：单位时间间隔内的信号，这个间隔被称为码元长度
- 码元速率：每秒通过信道传输的码元数（信号速率、波特率）
- 奈氏准则：无噪声(理论状态)情况下波特率B（波特）与信道带宽W（赫兹Hz）的关系：

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

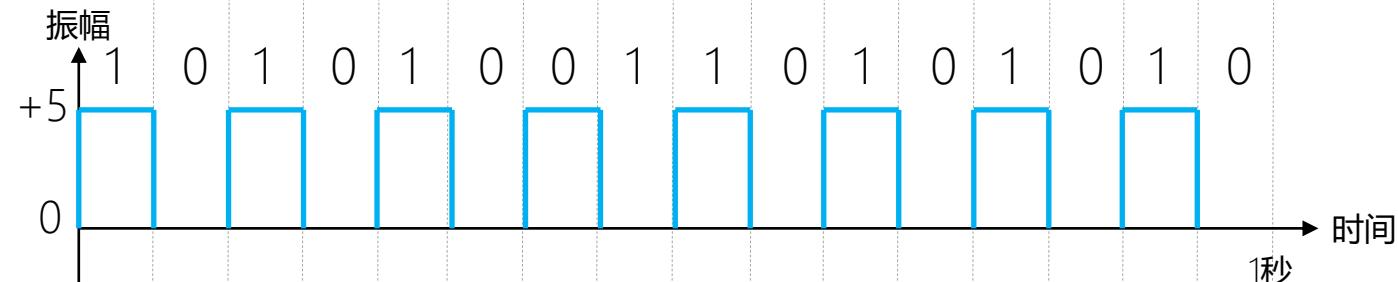
- 比特率与波特率、码元状态

$$\begin{aligned} S &= B \times \log_2 N \quad (N: \text{码元状态数}) \\ &= 2 \times W \times \log_2 N \end{aligned}$$

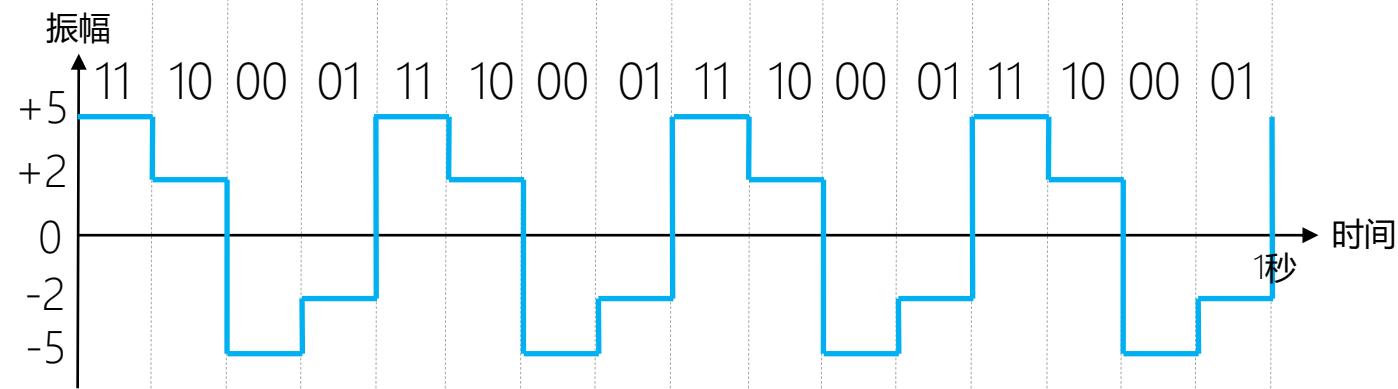
比特率、波特率、码元状态的关系



波特率：8波特
码元状态：2
比特率：8bps



波特率：16波特
码元状态：2
比特率：16bps



波特率：16波特
码元状态：4
比特率：32bps

香农(Shannon)定理

- 信道总是要受到噪声的干扰
- 香农定理：噪声环境中有限带宽介质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

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

- W: 信道带宽
- S: 平均信号功率
- N: 平均噪声功率

- 信噪比：单位分贝(dB)

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

示例

- 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？
- 根据奈氏准则

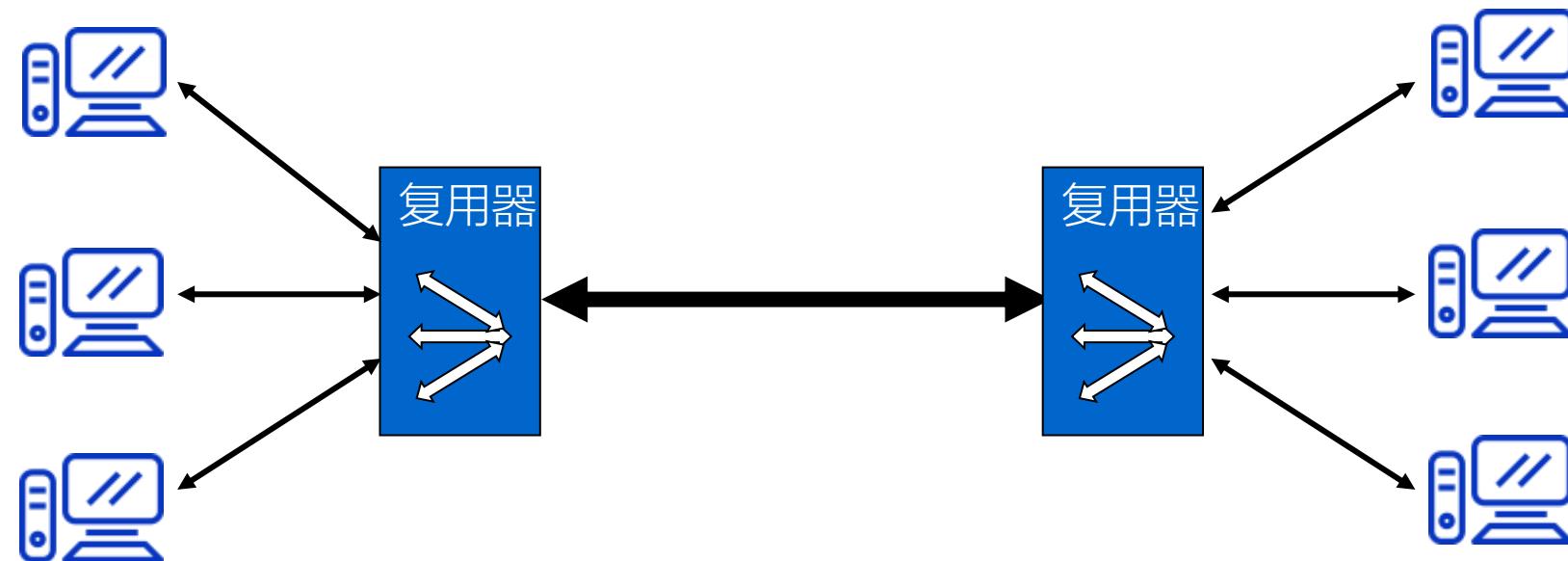
$$\begin{aligned} S &= 2 \times W \times \log_2 N \\ &= 2 \times 3.5 \text{kHz} \times \log_2 16 \\ &= 28 \text{kbps} \end{aligned}$$

- 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？
- 根据香浓定理

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

2.3 多路复用技术

- 多路复用：利用一条链路同时传输多路信号
- 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

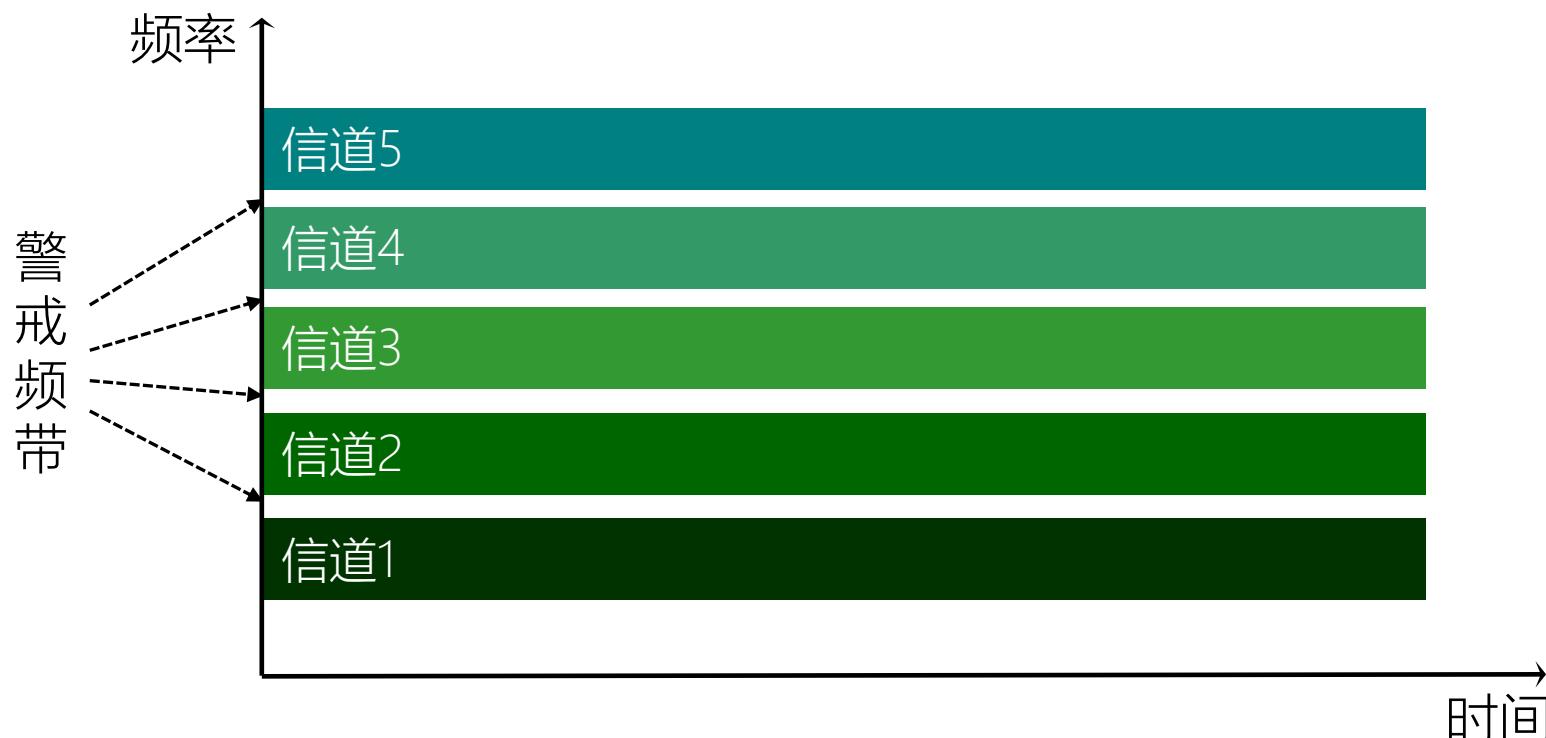


多路复用技术类型

- 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)

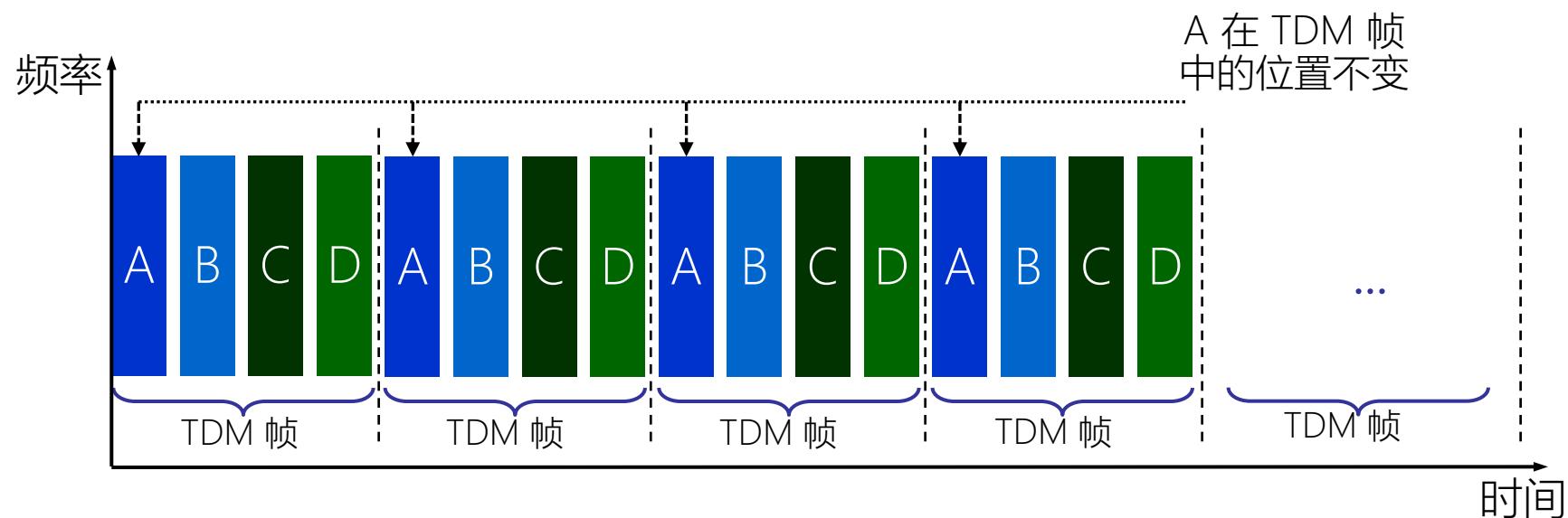
频分复用

- 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
 - “带宽”是频率带宽，不是数据的发送速率



时分复用

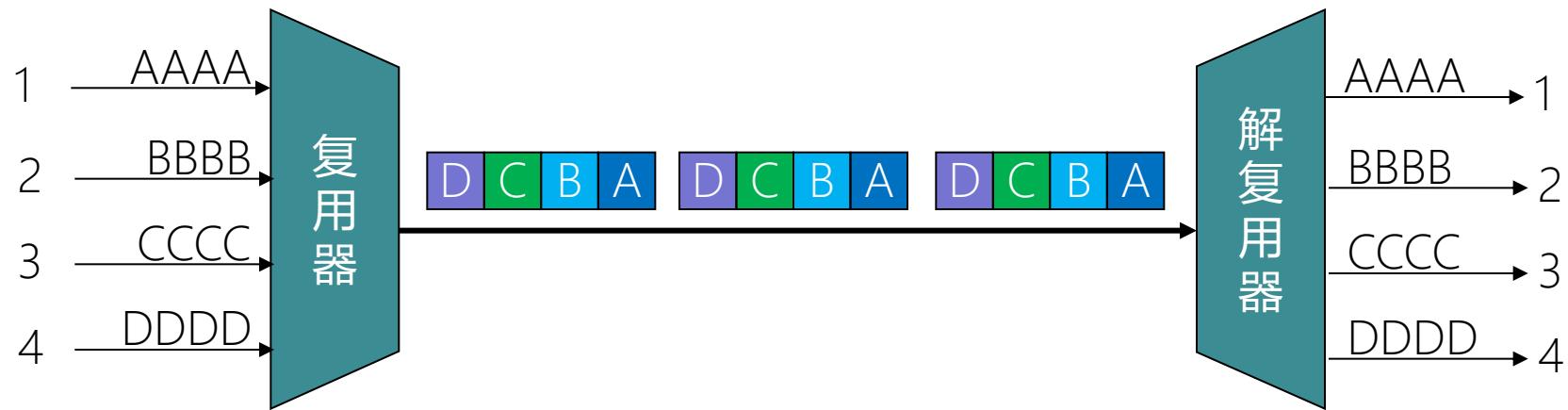
- 通过分割时间片来划分信道
- 每个时间片由一个复用信号占用
- 适用于数字信号



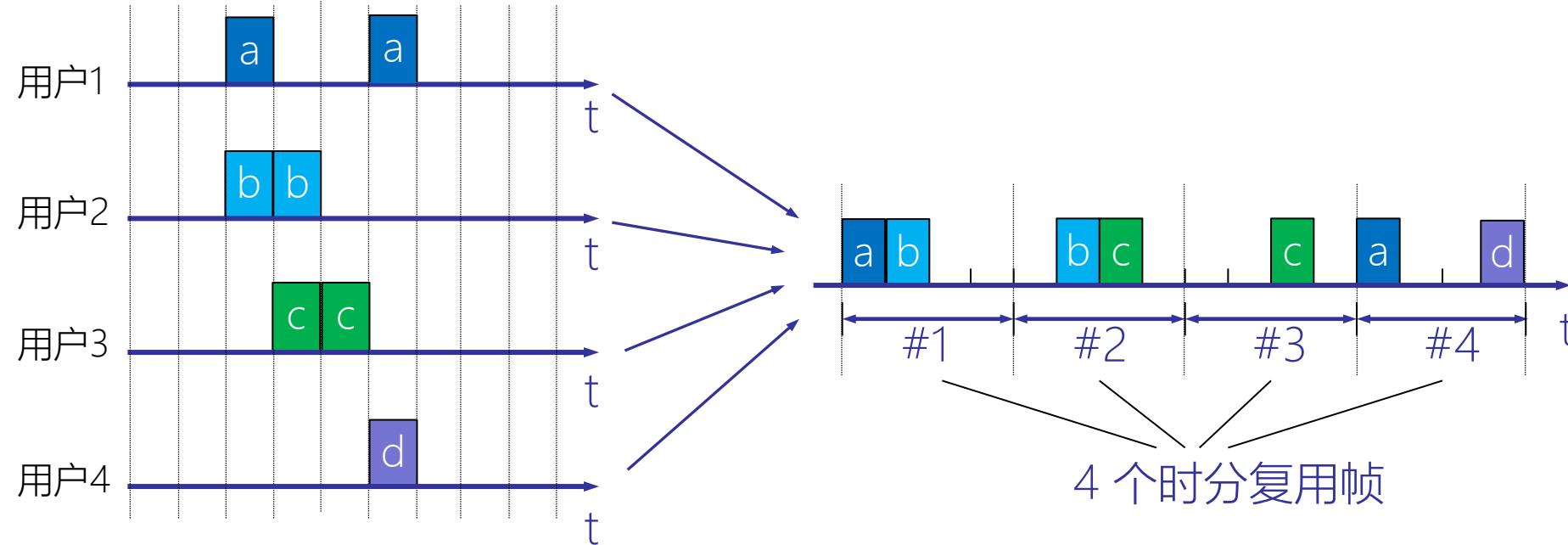
时分复用

- 每一个用户所占用的时隙是周期性地出现
 - 周期：TDM帧的长度
- 所有用户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

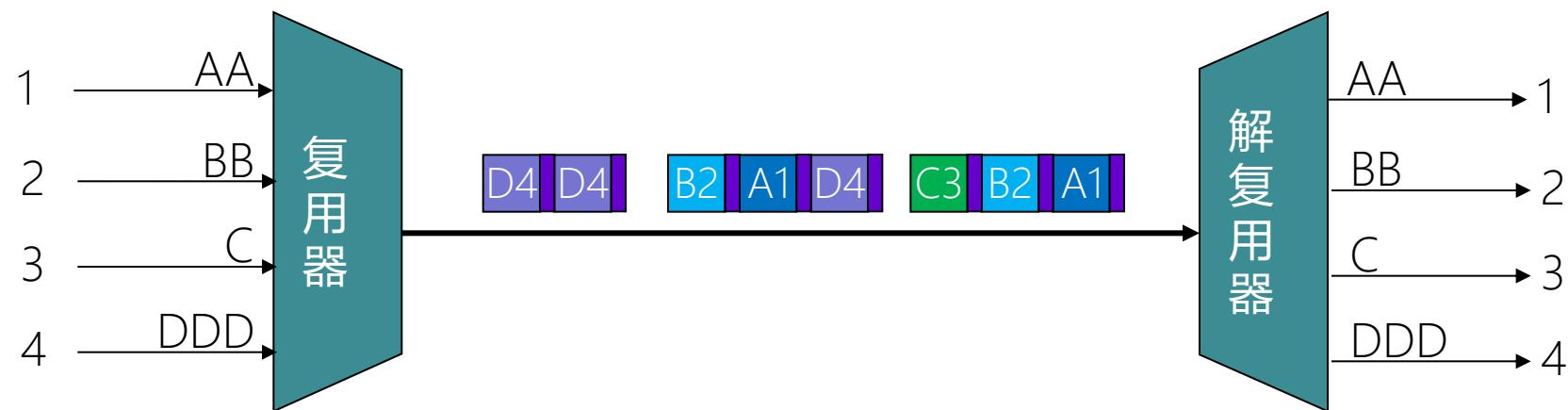


同步TDM可能浪费资源

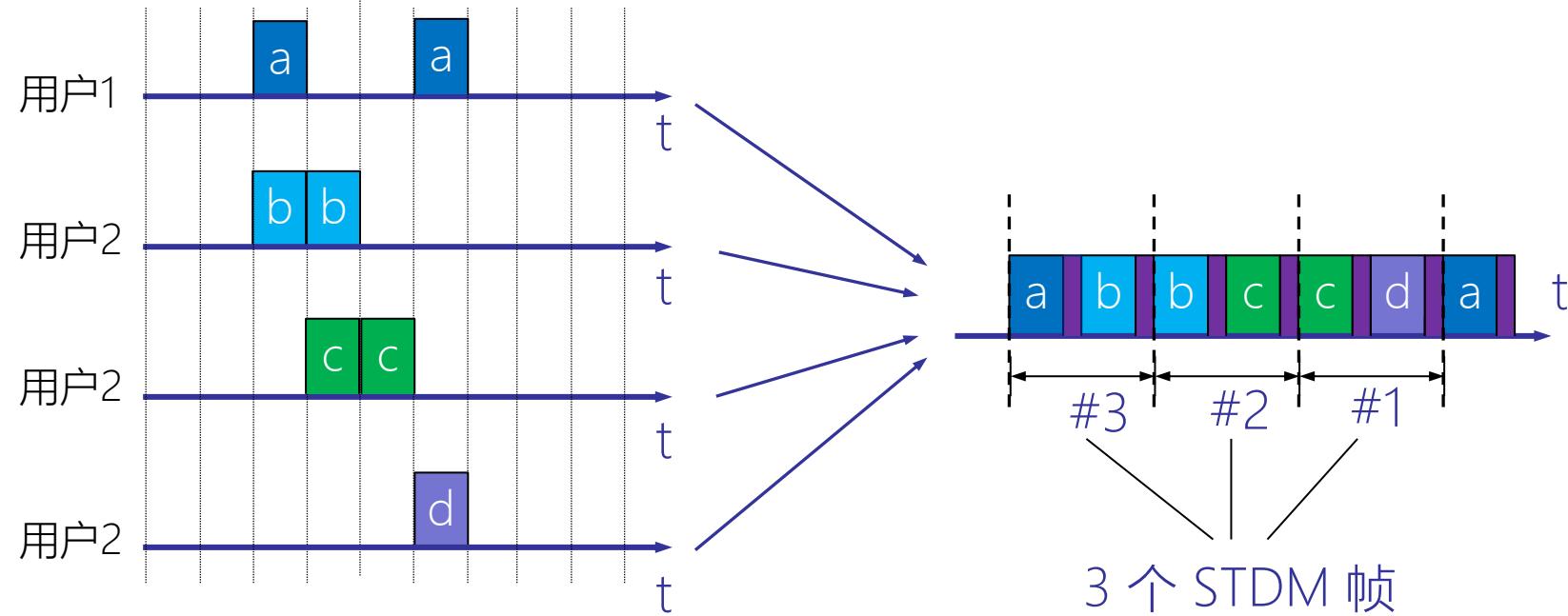


异步TDM

- 异步TDM又称统计复用(STDM)
- 每帧的时间片数量小于输入设备数量



异步TDM

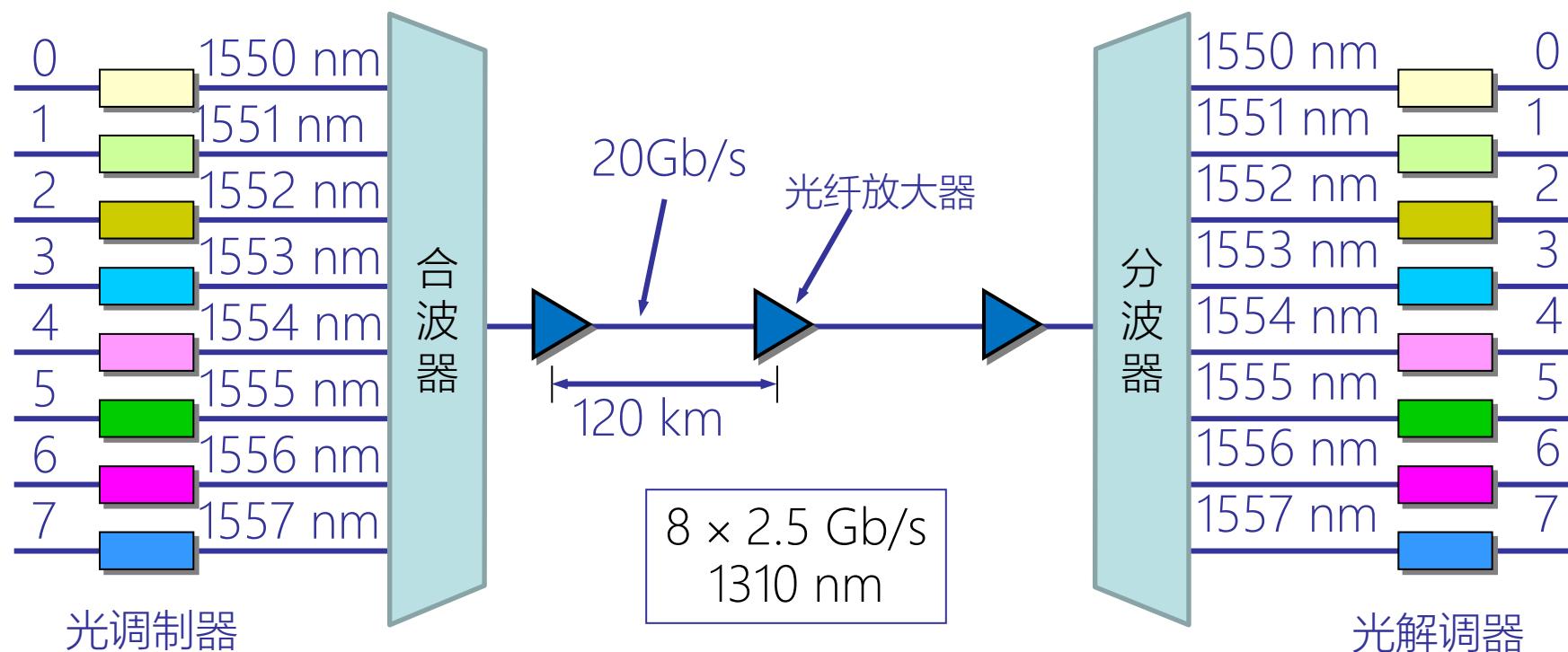


同步TDM vs 异步TDM

- 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，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

波分多路复用

- 波分多路复用：光的频分复用
- 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
- 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



码分多路复用

- 码分多路复用又称码分多址复用CDMA
- 复用时根据码型结构的不同来实现信号分割的多路复用
- 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

码分多路复用

- 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： $0 \rightarrow -1$, $1 \rightarrow +1$, $0 \rightarrow \text{无信号}$
 - A的码片序列为 $(-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)$
 - 其反码为 $(+1 +1 +1 -1 -1 +1 -1 -1)$

正交性

- 正交性可以表示为

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

- 可以得到

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

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

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

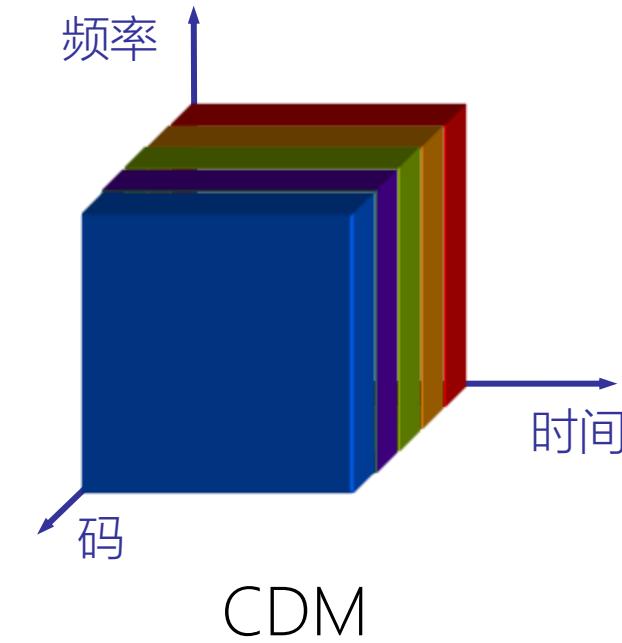
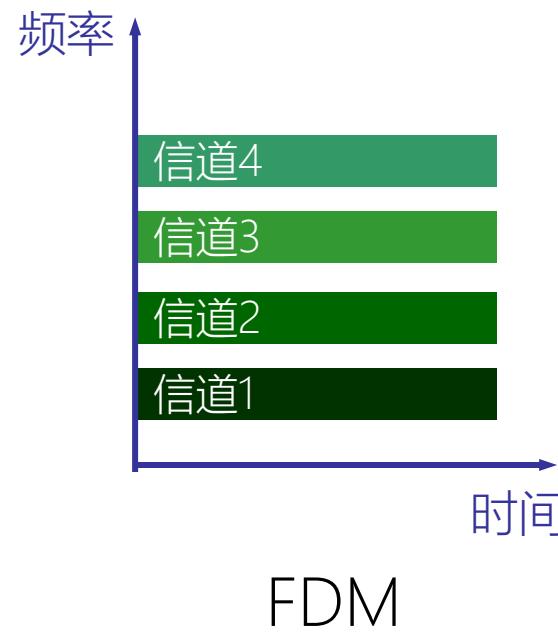
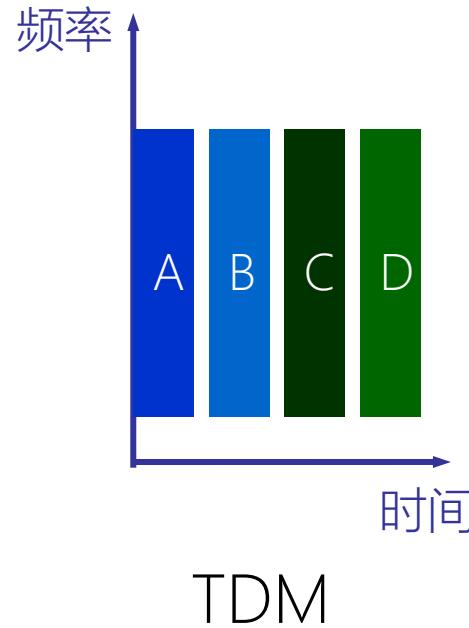
码分复用示例

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
B	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-	1	0	0	1
C	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	1	1	-	1	1
D	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-	-	-	-	1

S1	C
S2	B+C
S3	A+ \overline{B}
S4	A+ \overline{B} +C
S5	A+B+C+D
S6	A+B+ \overline{C} +D

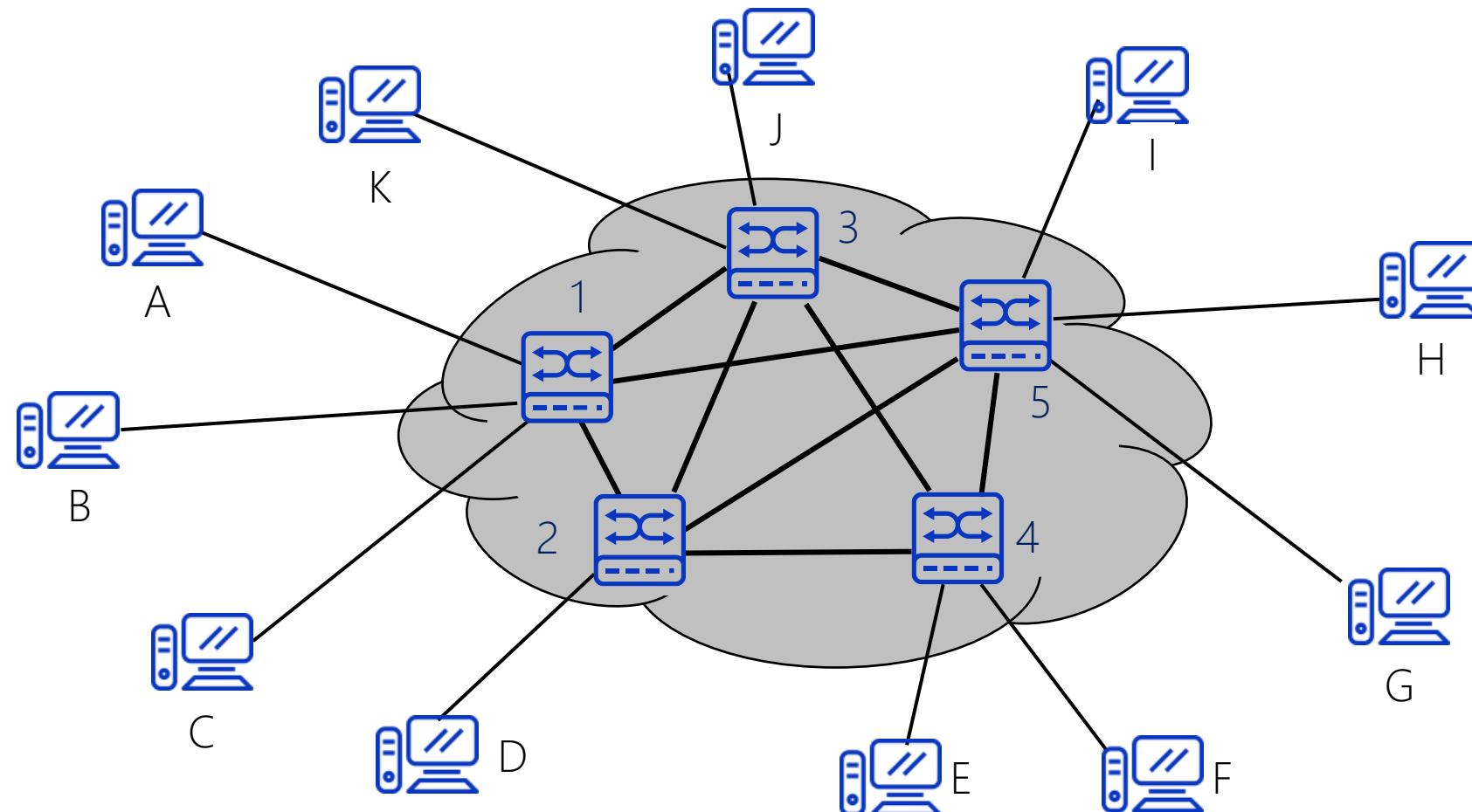
t1	S1·C	(C)·C=1
t2	S2·C	(B+C)·C=1
t3	S3·C	(A+ \overline{B})·C=0
t4	S4·C	(A+ \overline{B} +C)·C=1
t5	S5·C	(A+B+C+D)·C=1
t6	S6·C	(A+B+ \overline{C} +D)·C=-1

三种复用方式对比



2.4 数据交换技术

- 交换是将多条物理链路连接起来，在两个设备间形成一条临时通信路径

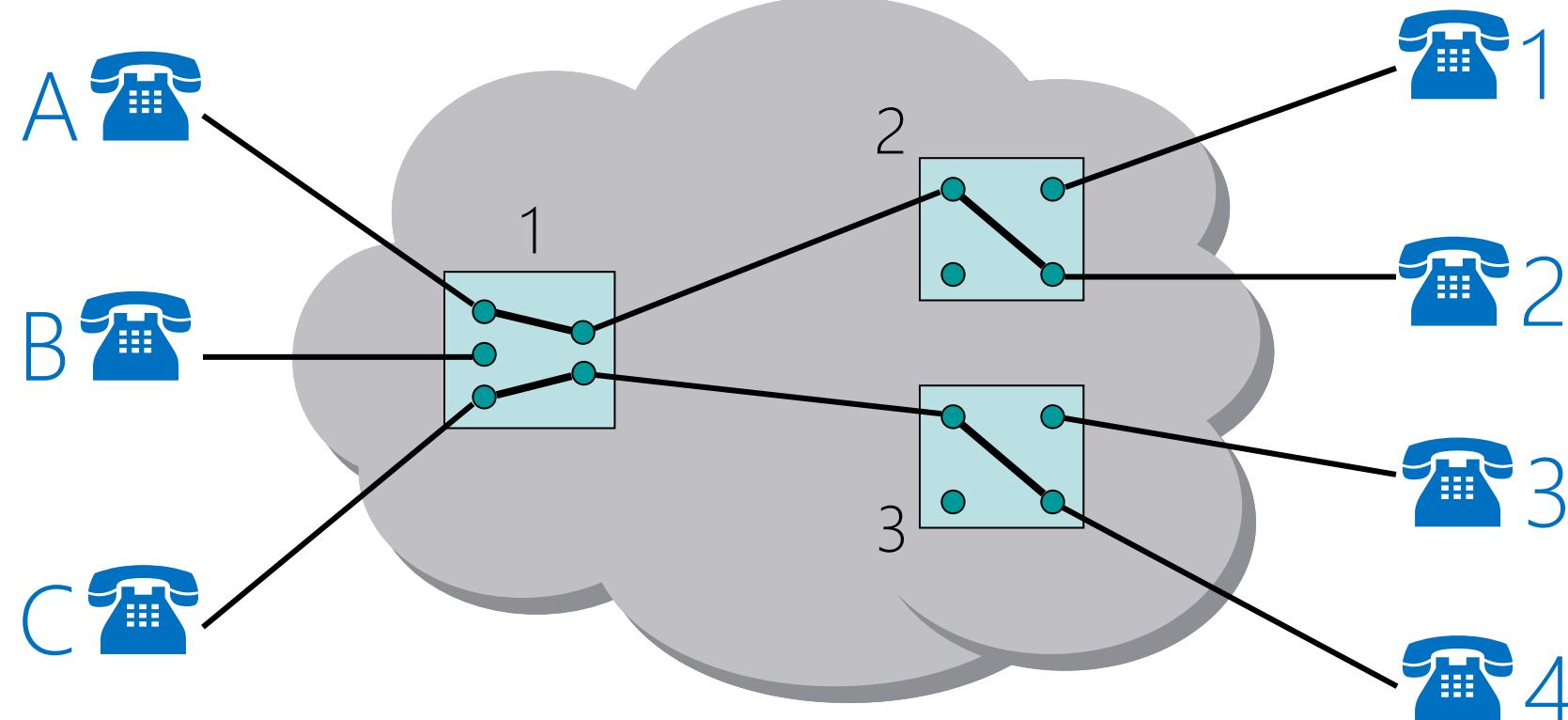


2.4 数据交换技术

- 当存在多个通信设备时，如何使每两个设备之间能够通信？
- 交换技术
 - 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
- 三种基本交换方式
 - 电路交换
 - 分组交换
 - 报文交换
- 其它交换技术
 - ATM交换（信元交换）
 - 帧中继

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
 - 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
 - 可以把电路交换机看作是一个多路开关
- 电路交换过程包括：电路建立、数据传输、电路拆除



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

分组交换

- 较长的报文被分为较短的数据单元
- 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
- 包长度一般比报文短得多，只要包到达后就可以转发。不必等待报文全部到达，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

- 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
- 提供多种通信设备互连

分组交换两种类型

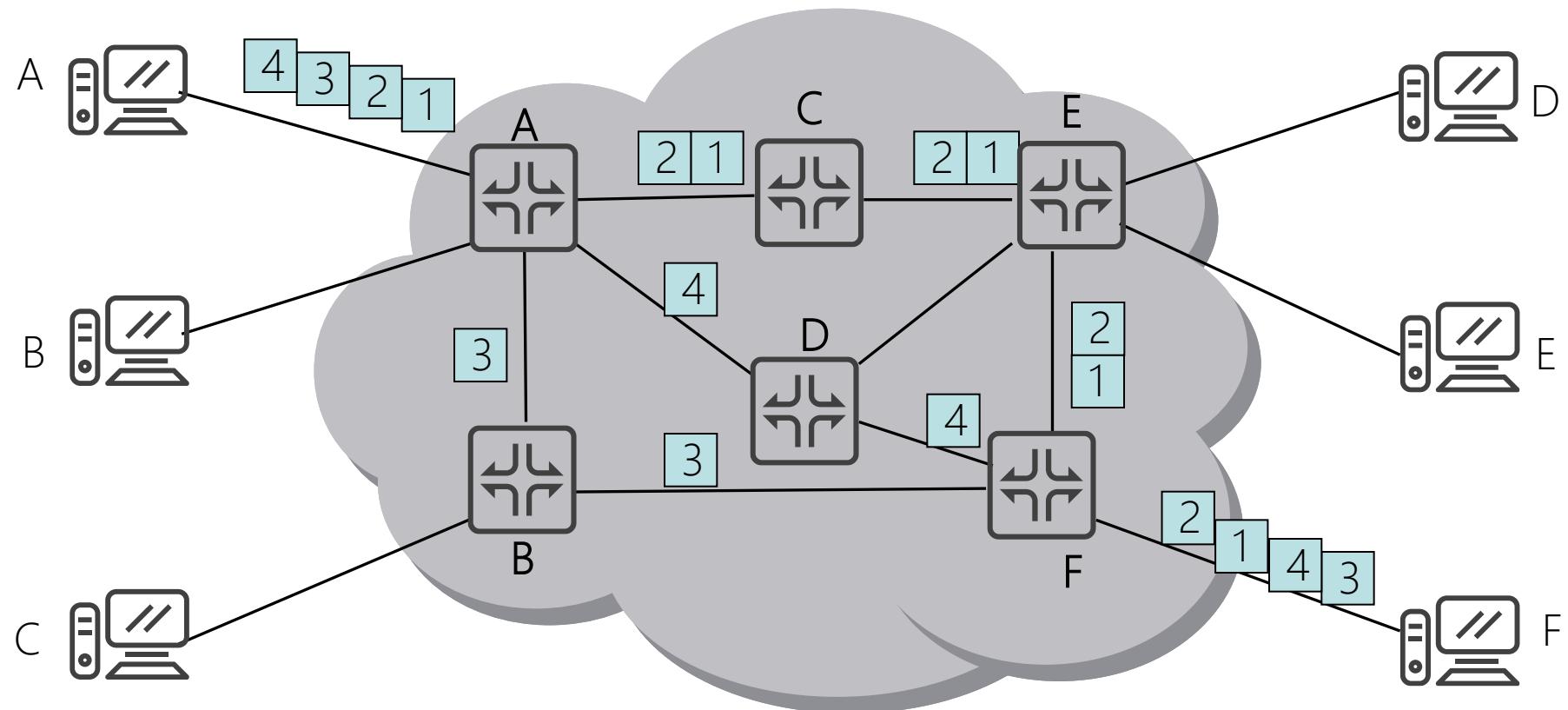
■ 数据报

- 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

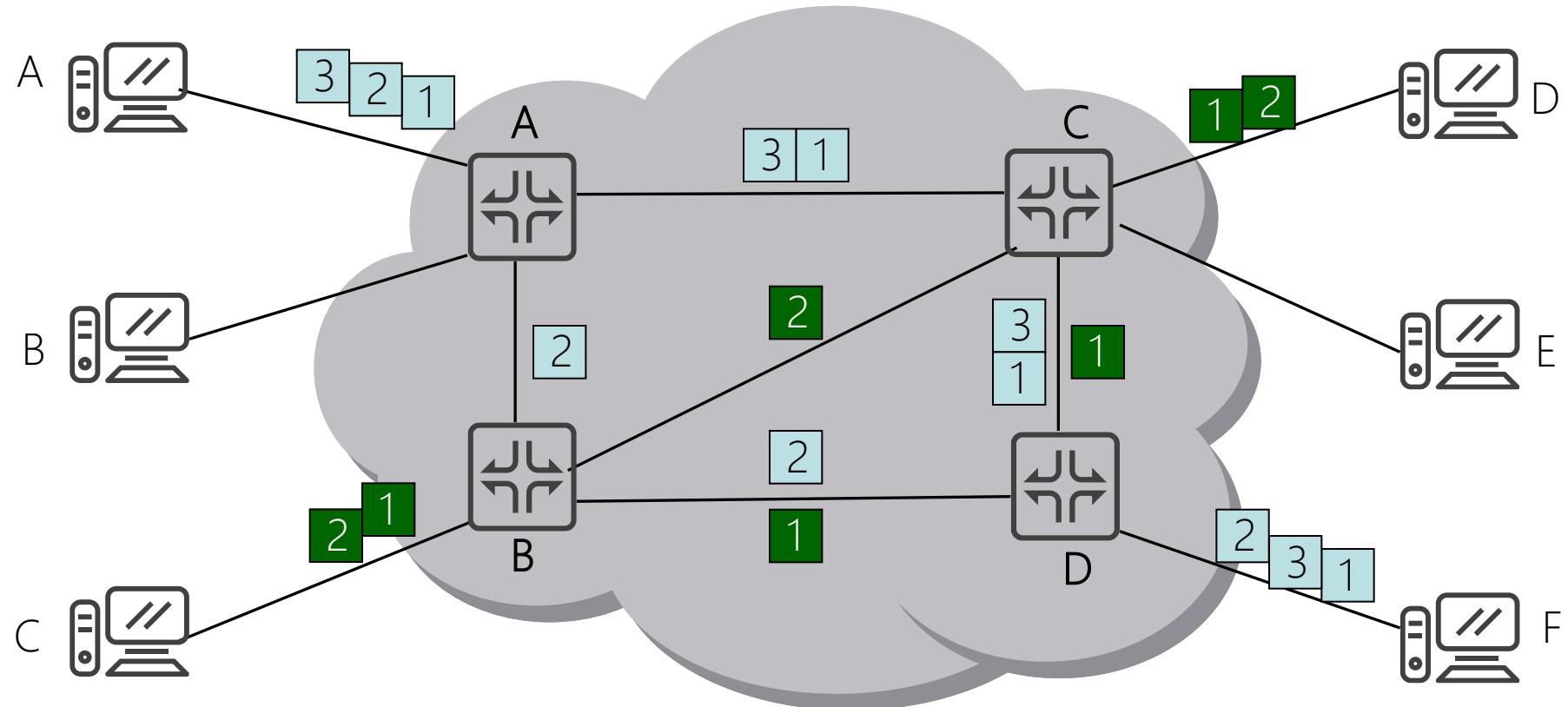
■ 虚电路

- 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
 - 虚电路所使用的电路可以同时为多个设备提供通信服务
 - 电路交换所使用的电路是独占的

数据报

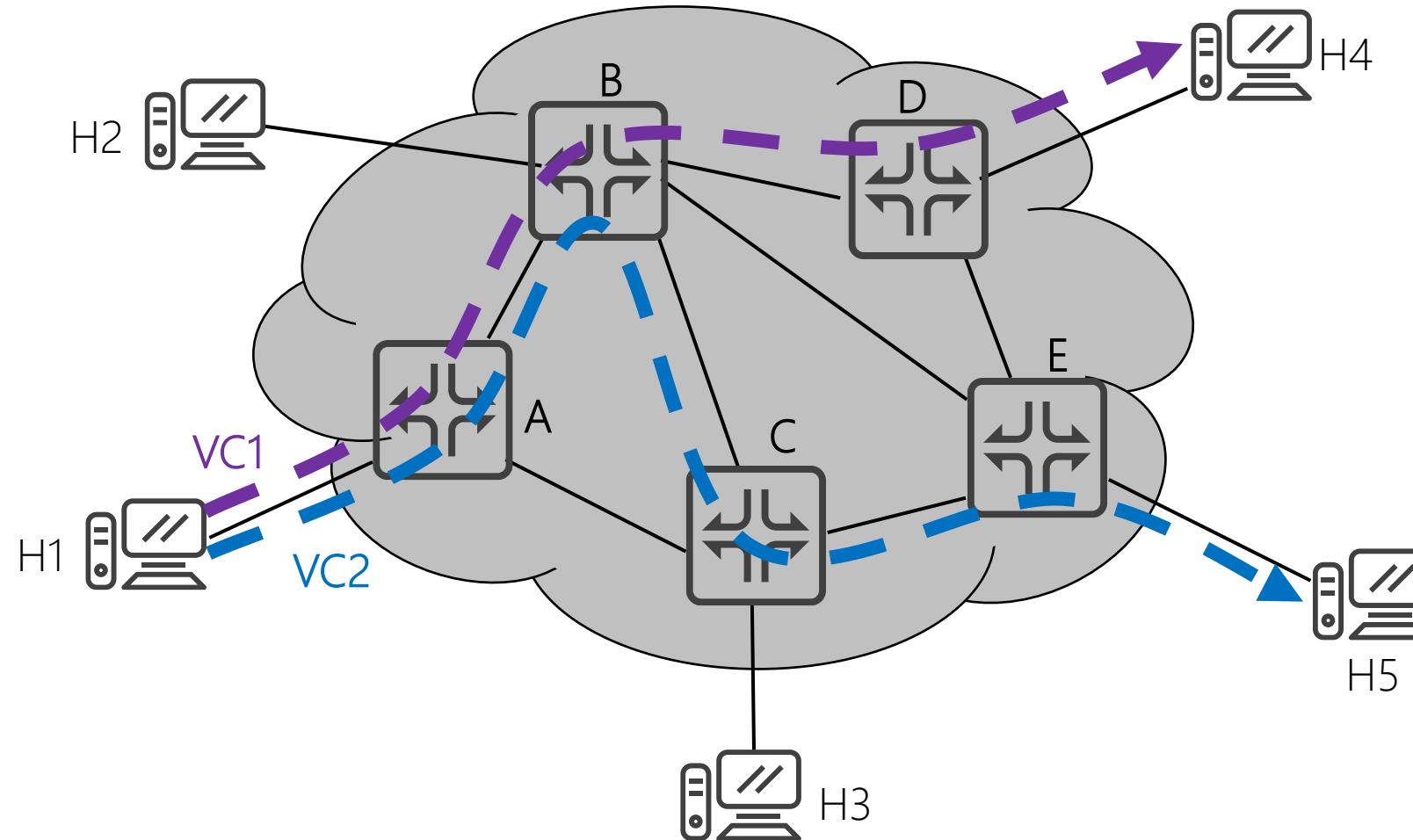


数据报



➤一条链路可同时为多个设备服务

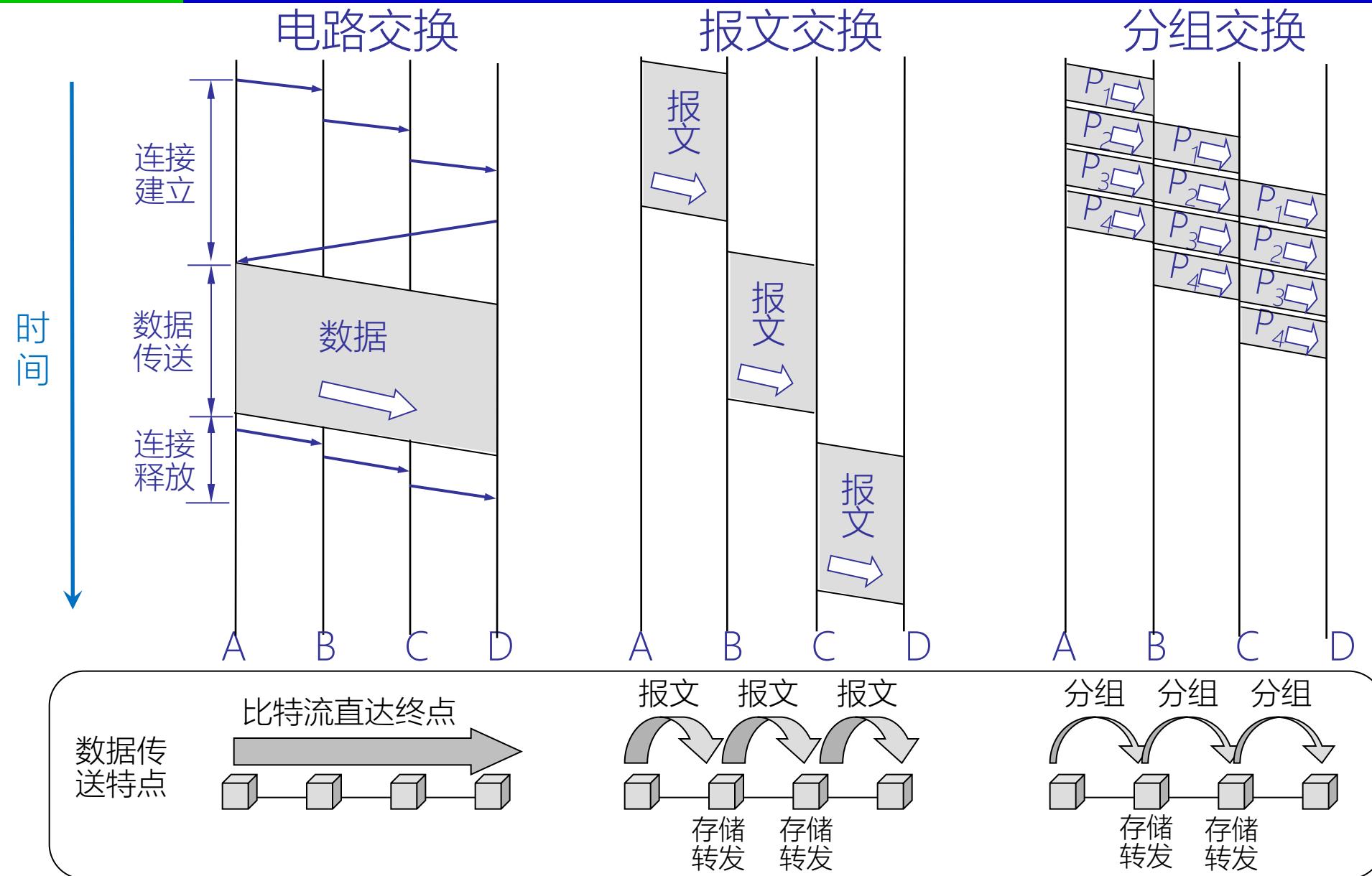
虚电路



两种虚电路

- 交换虚电路(SVC)
 - 每条虚电路在需要的时候被创建，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，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
 - 仅在建立虚电路时需要目的地址
 - 进行数据传送时，每个包不需要携带完整的目的地址，仅需要一个虚电路的号码标志
 - 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



2.5 错误检测编码

■ 基本原理

- 发送方：按照一定规则给数据增加冗余码，将数据和冗余码一起发送
- 接收方：按照约定的规则对收到的信息进行检查
- 编码效率：数据信息在整个发送信息中的比重

■ 两种方法

- 检错码：给发送信息加上冗余位，使其具备检错功能
- 纠错码：不仅能检错，同时能纠正错误的冗余码

■ 三种错误类型：可采用不同的方法处理

- 单比特错误
- 多比特错误
- 突发错误

奇偶校验码

- 奇偶校验码常用于串行通信中
- 奇偶校验码计算规则：计算数据单元中为1的比特个数，附加一个比特位，使得1的个数为偶数（偶校验）或奇数（奇校验）

- 偶校验：设m位数据单元 $b_1b_2b_3\dots b_m$ ，则：

$$r = b_1 \oplus b_2 \oplus b_3 \oplus \dots \oplus b_m$$

- 奇校验：设m位数据单元 $b_1b_2b_3\dots b_m$ ，则：

$$r = b_1 \oplus b_2 \oplus b_3 \oplus \dots \oplus b_m \oplus 1$$

- 发送方发送数据时，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



数据传输方向

- 垂直(纵向)偶校验：每块数据增加一个校验位



数据传输方向

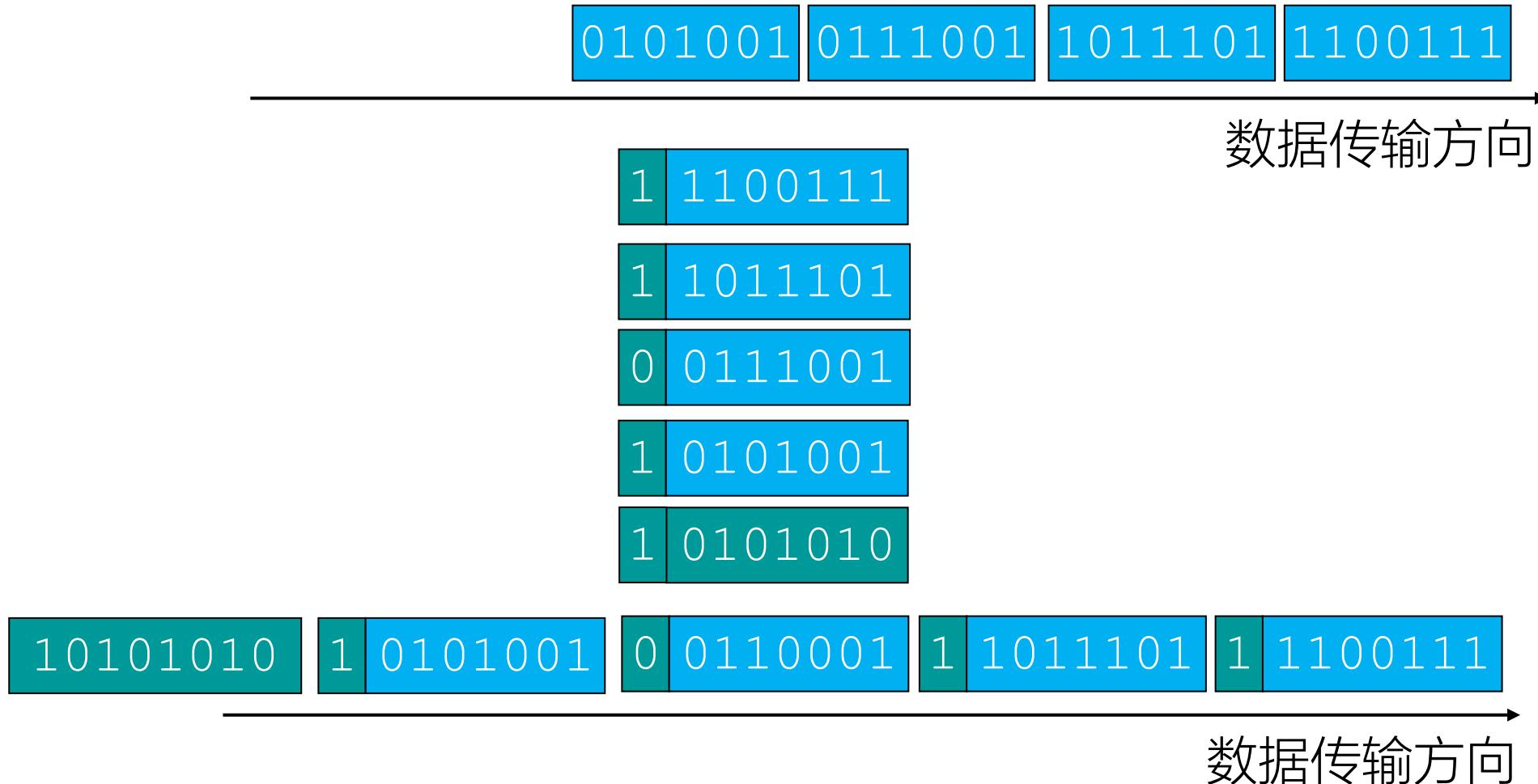
- 水平(横向)偶校验：各块数据相同位置的比特位进行计算



数据传输方向

奇偶校验

■ 水平垂直(纵横)偶校验



奇偶校验检错能力

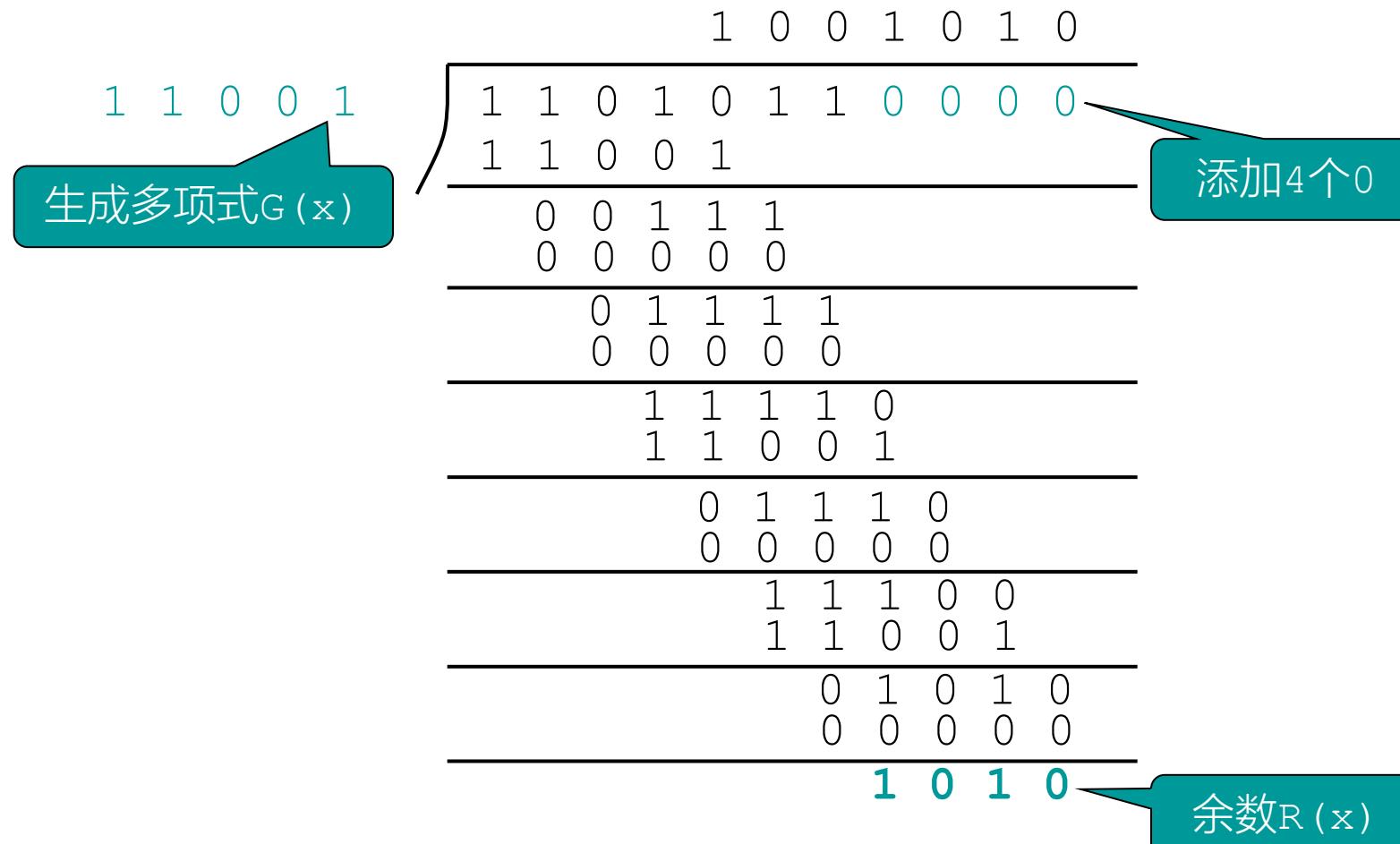
垂直偶校验	数据单元内单比特错误 多比特/突发错误：奇数个比特错误
水平偶校验	数据块内各数据单元同一位上奇数个错误 单个数据单元内的突发错误
纵横偶校验	除了数据块中偶数个数据单元中偶数个相同位发生错误不能检测，其它错误都能检测

循环冗余校验码CRC

- 循环冗余校验码常用于数据链路层
- 通信双方约定一个生成多项式 $G(x)$, 最高阶为 m
 - 例如 $G(x)=x^4+x^3+1=11001$, 即 $m=4$
- 设待发送的信息为 $U(x)$, 例如 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, 一起成为待发送的数据
- 接收方用收到的数据除以生成多项式 $G(x)$
 - 结果为0: 传输没有错误
 - 结果不为0: 传输产生错误
- 除法规则
 - 没有借位, 模2法则 ($1-1=0$; $1-0=1$; $0-0=0$; $0-1=1$)

CRC计算示例

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



➤ 最后发送的数据: 1101011**1010**

CRC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

■ CRC-32:

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

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

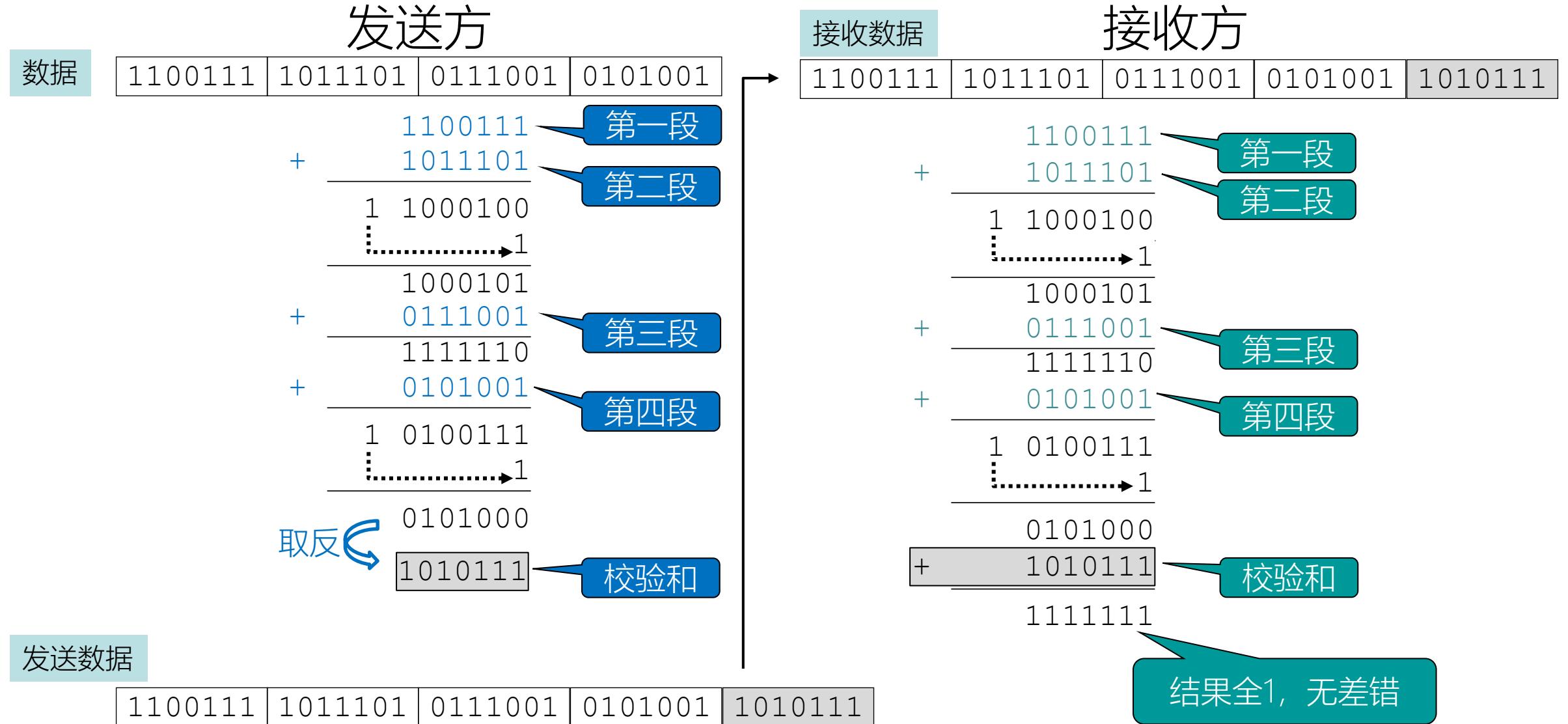
校验和

- 检查和方法常用于高层协议中
- 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

校验和计算示例



2.6 本章小结

- 计算机网络是一个由五部分组成的数据通信网络
- 对于0、1的比特序列需要转化成物理信号传输
 - 数字—数字编码三大类：单极性编码、极化编码、双极性编码
 - 数字—模拟编码三要素：振幅、频率、相位
- 奈氏定理
 - 有限带宽无噪声信道的极限波特率
- 香农定理
 - 信道信息传送速率的上限（比特每秒）和信道信噪比及带宽的关系

本章小结

■ 信号传输的多路复用技术

- 频分多路复用
- 时分多路复用
- 波分多路复用
- 码分多路复用

■ 信号传输的差错控制机制

- 按照一定的规则给数据码加上冗余码
- 将数据码和冗余码一起发送出去
- 在接收端按相应的规则检查数据码和冗余码之间的关系

■ 网络传输常用检错码对数据进行检查，3种常用方法

- 奇偶校验码
- 循环冗余校验码
- 检查和