

深入浅出
计算机网络

微
视频
版

高 军 陈 君 唐 秀 明 张 剑 / 编 著

清华大学出版社

B站口碑爆棚的“计算机网络微课堂”升级版

深入浅出 计算机网络

高 军 陈 君 唐 秀 明 张 剑 / 编 著



微
视频
版

附赠：100+个视频 | 教学大纲 | PPT课件

思维导图 | 配套习题

清华大学出版社

第2章 物理层

2.1 **物理层概述**

2.2 **物理层下面的传输媒体**

2.3 **传输方式**

2.4 **编码与调制**

2.5 **信道的极限容量**

2.6 **信道复用技术**

2.1 物理层概述

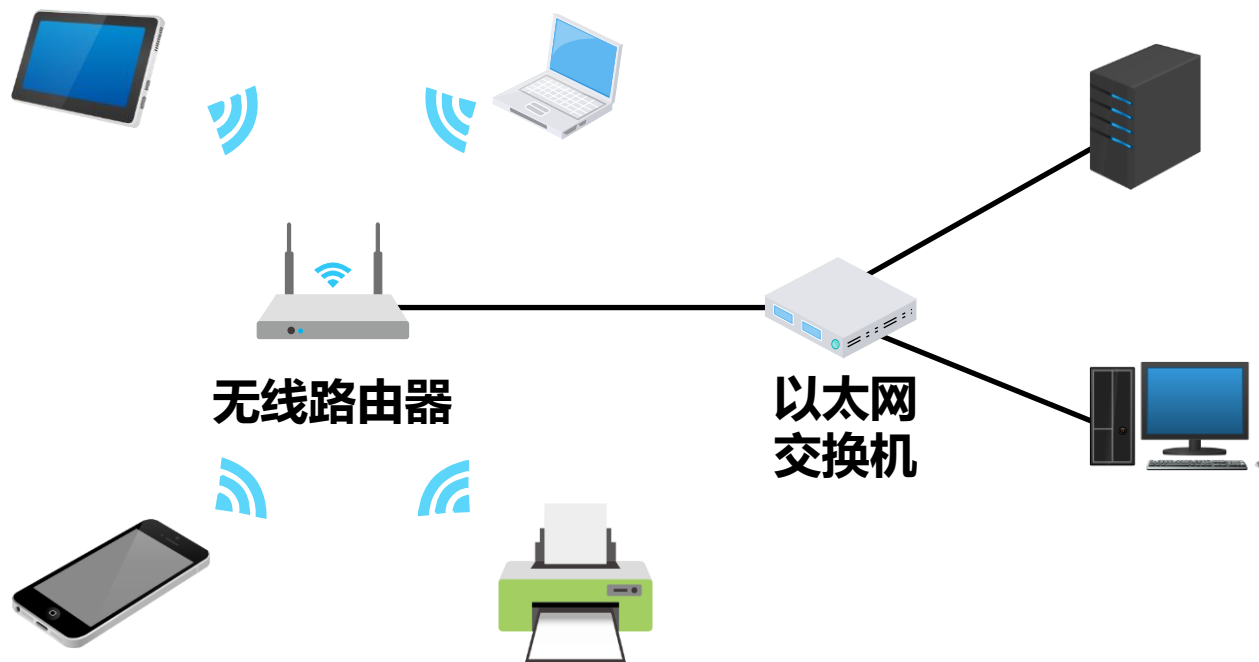
01

物理层要实现的功能

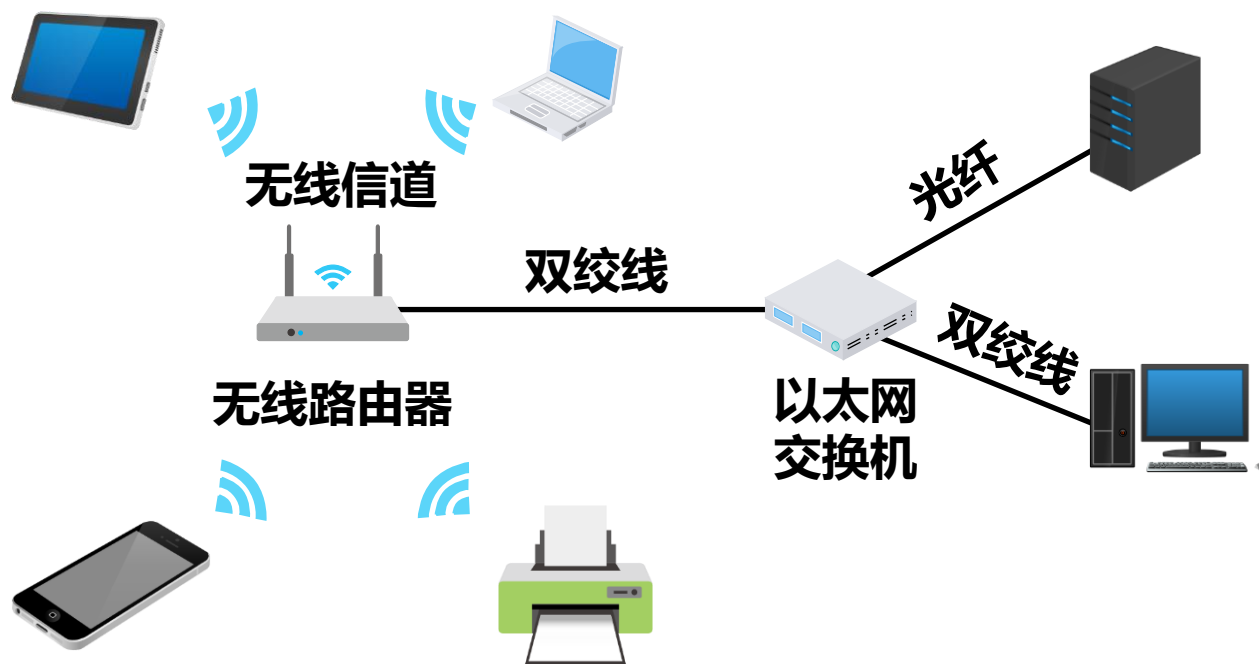
02

物理层接口特性

01 物理层要实现的功能



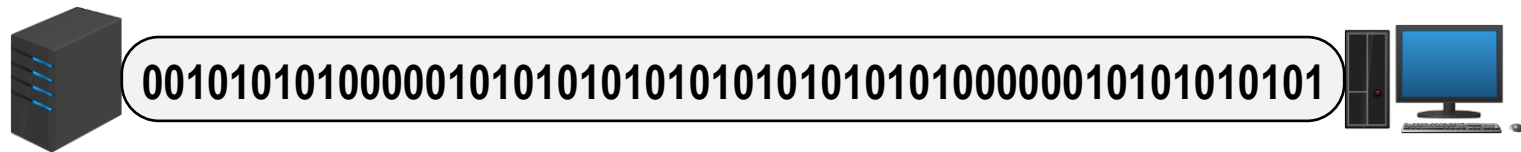
01 物理层要实现的功能



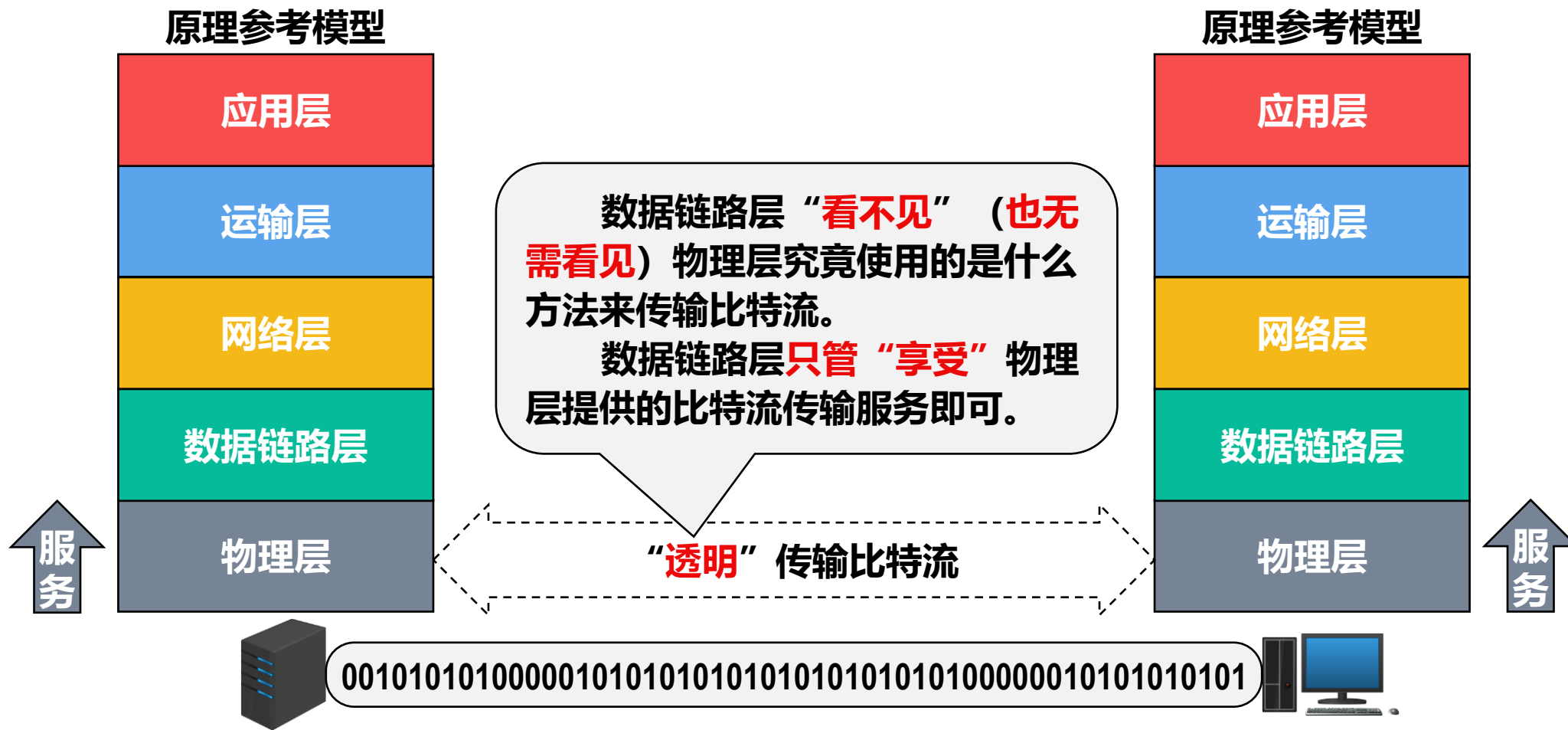
01 物理层要实现的功能



01 物理层要实现的功能



01 物理层要实现的功能



02 物理层接口特性

机械特性

电气特性

功能特性

过程特性

02 物理层接口特性

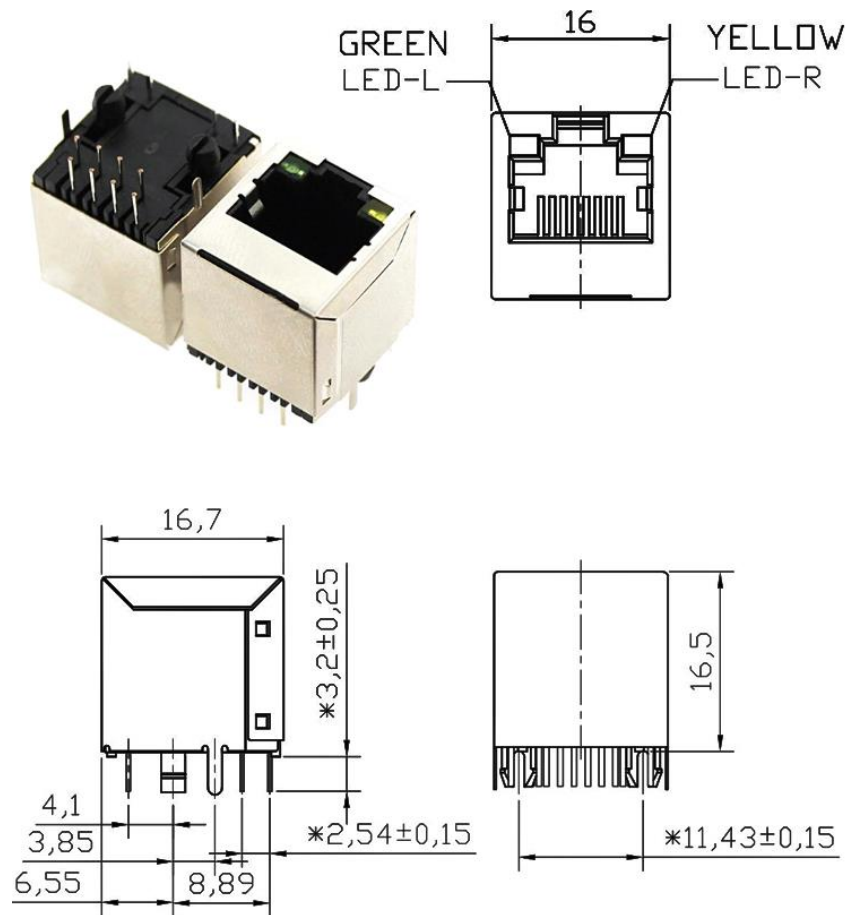
机械特性

- 形状和尺寸
- 引脚数目和排列
- 固定和锁定装置

电气特性

功能特性

过程特性



RJ45插座的机械特性

02 物理层接口特性

机械特性

- 形状和尺寸
- 引脚数目和排列
- 固定和锁定装置

电气特性

- 信号电压的范围
- 阻抗匹配的情况
- 传输速率
- 距离限制

功能特性

过程特性

100BASE-T快速以太网的电气特性

发送引脚 (TX) 上的 V_{OUT+} : 950mV ~ 1050mV

发送引脚 (TX) 上的 V_{OUT-} : -1050mV ~ -950mV

使用5类无屏蔽双绞线UTP, 在100MHz频率下的特性阻抗为100Ω

最大传输速率为100Mb/s

单段最大长度为100m

02 物理层接口特性

机械特性

- 形状和尺寸
- 引脚数目和排列
- 固定和锁定装置

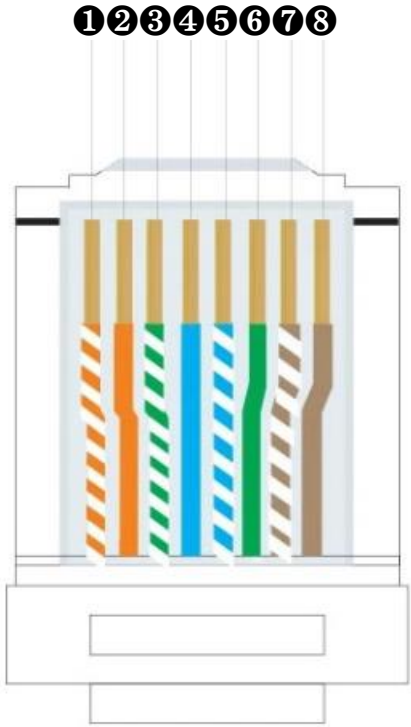
电气特性

- 信号电压的范围
- 阻抗匹配的情况
- 传输速率
- 距离限制

功能特性

- 规定接口电缆的各条信号线的作用

过程特性



T568B标准

引脚序号	引脚名称	描述
1	TX+	数据发送
2	TX-	数据发送
3	RX+	数据接收
4	n/c	不连接
5	n/c	不连接
6	RX-	数据接收
7	n/c	不连接
8	n/c	不连接

02 物理层接口特性

机械特性

- 形状和尺寸
- 引脚数目和排列
- 固定和锁定装置

电气特性

- 信号电压的范围
- 阻抗匹配的情况
- 传输速率
- 距离限制

功能特性

- 规定接口电缆的每条信号线的作用

过程特性

- 规定在信号线上传输比特流的一组操作过程，包括各信号间的时序关系

【2012年 题34】在物理层接口特性中，用于描述完成每种功能的事件发生顺序的是（**C**）。

- A. 机械特性
- B. 功能特性
- C. 过程特性
- D. 电气特性

【2018年 题34】下列选项中，不属于物理层接口规范定义范畴的是（**C**）。

- A. 接口形状 物理层接口 机械特性
- B. 引脚功能 物理层接口 功能特性
- C. 物理地址 硬件地址或MAC地址
- D. 信号电平 物理层接口 电气特性

数据链路层

2.2 物理层下面的传输媒体

01

传输媒体的分类

02

导向型传输媒体

03

非导向型传输媒体

01 传输媒体的分类

■ **传输媒体**是计算机网络设备之间的物理通路，也称为传输介质或传输媒介。

■ 传输媒体并不包含在计算机网络体系结构中。

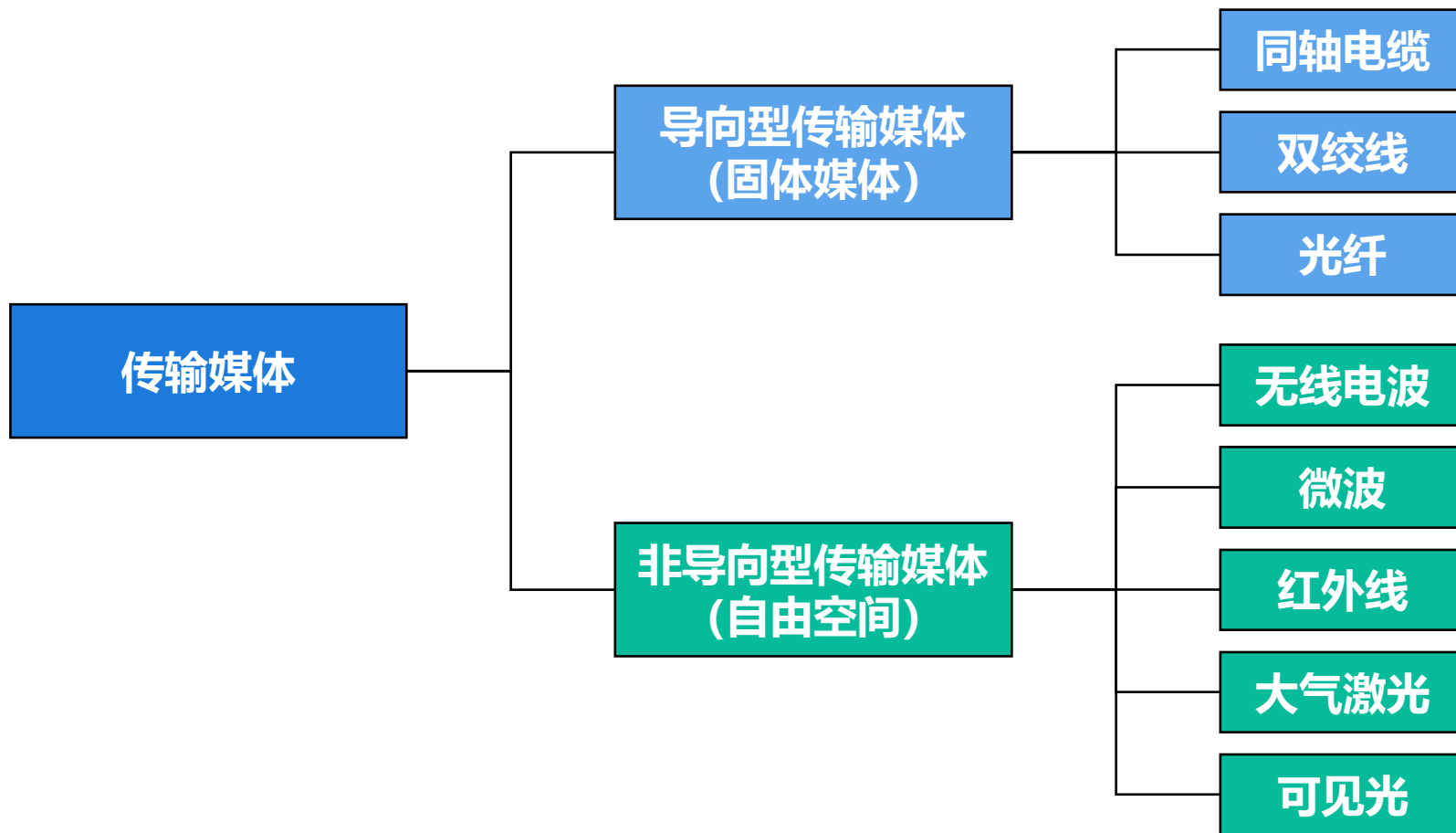
原理体系结构



01 传输媒体的分类

■ **传输媒体**是计算机网络设备之间的物理通路，也称为传输介质或传输媒介。

■ 传输媒体**并不包含**在计算机网络体系结构中。



02 导向型传输媒体

同轴电缆

双绞线

光纤

02 导向型传输媒体

同轴电缆

双绞线

光纤



同轴电缆价格较贵且布线不够灵活和方便。随着技术的发展和集线器的出现，在局域网领域基本上都采用双绞线作为传输媒体。

同轴电缆

基带同轴电缆 (50Ω)

用于数字传输，在早期局域网中广泛使用。

宽带同轴电缆 (75Ω)

用于模拟传输，目前主要用于有线电视的入户线。

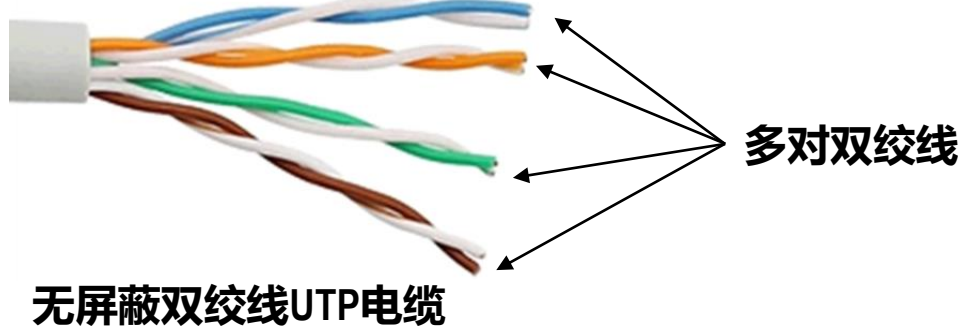
02 导向型传输媒体

同轴电缆

双绞线

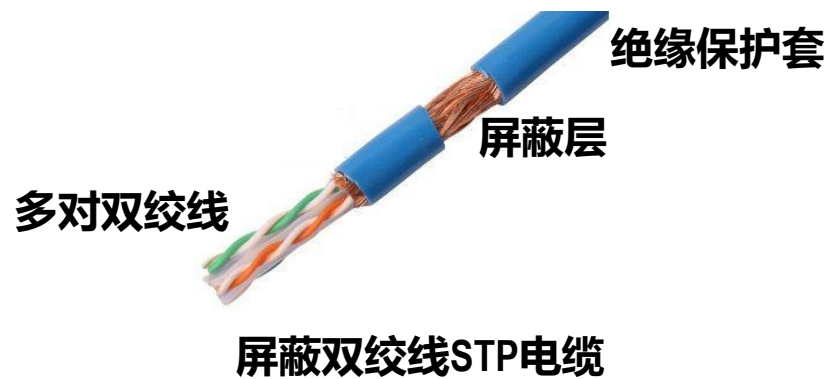
光纤

绝缘保护套



多对双绞线

无屏蔽双绞线UTP电缆



绝缘保护套

屏蔽层

多对双绞线

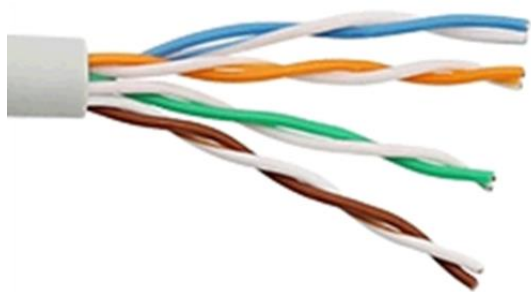
屏蔽双绞线STP电缆

02 导向型传输媒体

同轴电缆

双绞线

光纤



无屏蔽双绞线UTP电缆



绞合的作用

- 减少相邻导线间的电磁干扰
- 抵御部分来自外界的电磁干扰



多对双绞线

屏蔽双绞线STP电缆

02 导向型传输媒体

同轴电缆

双绞线

光纤



双绞线类别	带 宽	线缆特点	典型应用
3	16MHz	2对4芯双绞线	传统以太网10Mb/s；模拟电话
4	20MHz	4对8芯双绞线	曾用于令牌局域网
5	100MHz	与4类相比增加了绞合度	传输速率不超过100Mb/s的应用
5E（超5类）	125MHz	与5类相比衰减更小	传输速率不超过1Gb/s的应用
6	250MHz	与5类相比改善了串扰等性能	传输速率高于1Gb/s的应用
7	600MHz	使用屏蔽双绞线	传输速率高于10Gb/s的应用

02 导向型传输媒体

同轴电缆

双绞线

光纤

1966年，华裔科学家**高锟**发表了一篇题为《光频率介质纤维表面波导》的论文，开创性地提出将光导纤维应用于通信的基本原理。



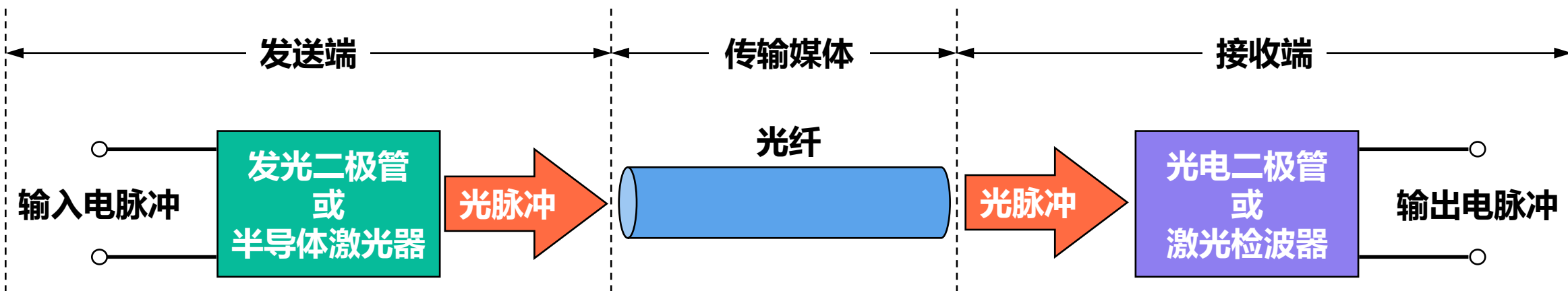
02 导向型传输媒体

同轴电缆

双绞线

光纤

■ 光纤通信利用光脉冲在光纤中的传递来进行通信。由于可见光的频率非常高（约为 10^8 MHz量级），因此一个光纤通信系统的**传输带宽远大于**目前其他各种传输媒体的带宽。



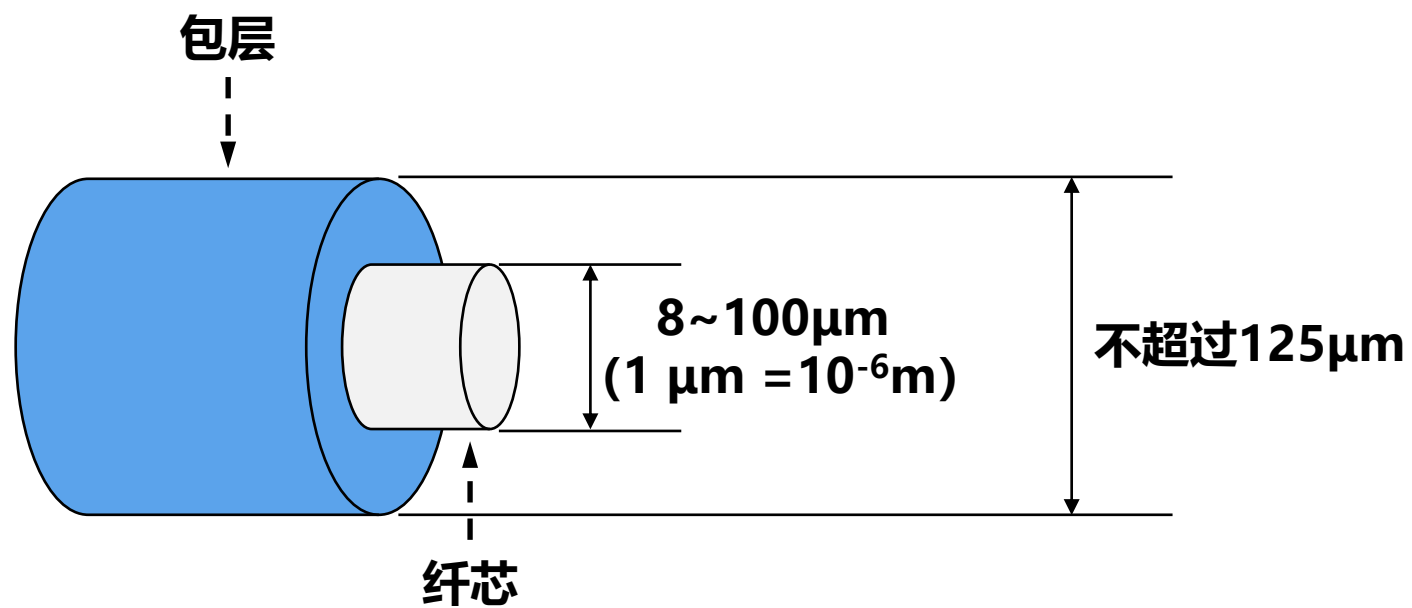
典型光纤通信系统结构示意图

02 导向型传输媒体

同轴电缆

双绞线

光纤

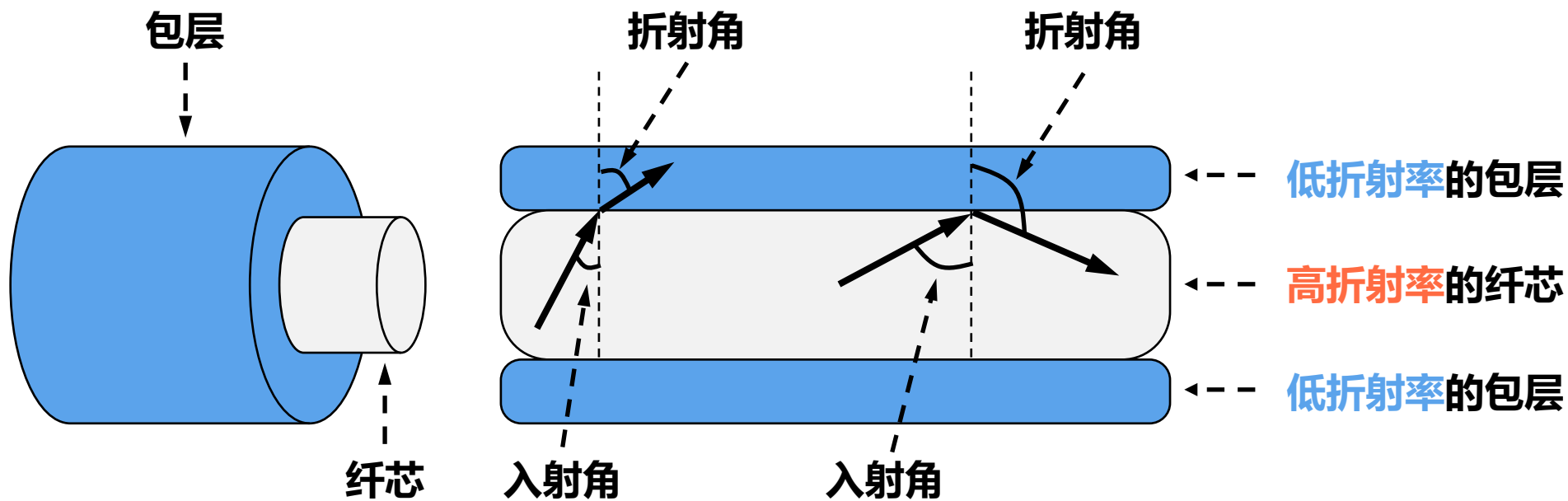


02 导向型传输媒体

同轴电缆

双绞线

光纤



当光从高折射率的媒体射向低折射率的媒体时，其折射角大于入射角。

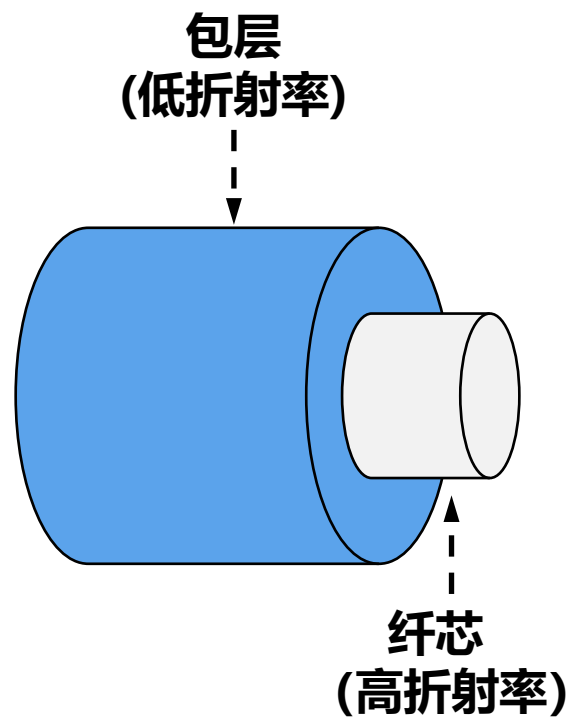
如果入射角足够大，就会出现全反射，即光碰到包层时，就会反射回纤芯。

02 导向型传输媒体

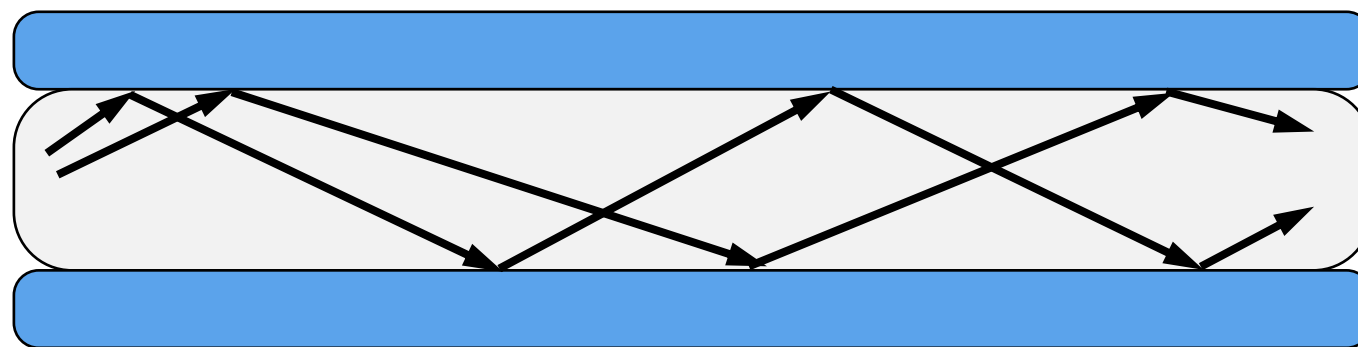
同轴电缆

双绞线

光纤



光在光纤中传输的方式是不断地全反射



多条光波在多模光纤中不断地全反射

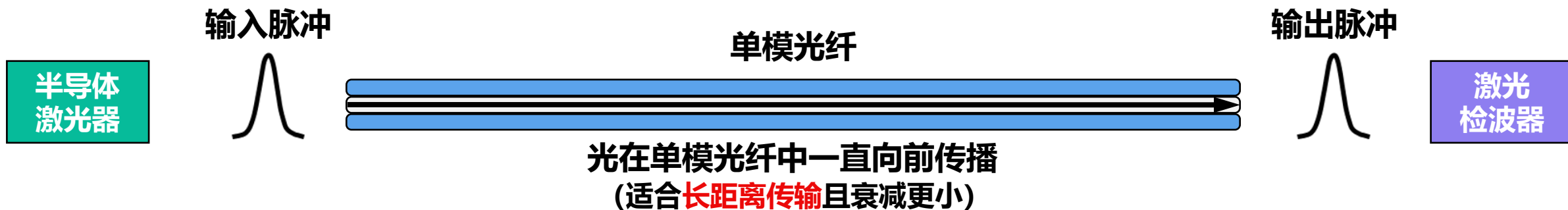
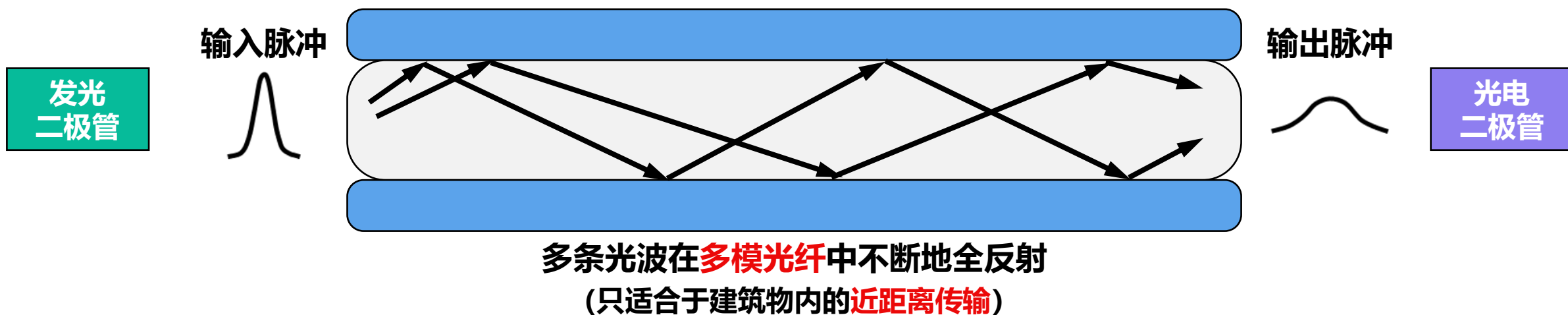
02 导向型传输媒体

同轴电缆

双绞线

光纤

多模光纤



02 导向型传输媒体

同轴电缆

双绞线

光纤

在光纤通信中，常用的三个光波波段的**中心波长**分别为

- | | | |
|---------------------------------|--------------|--|
| <input type="checkbox"/> 850nm | 衰减较大，但其他特性较好 | } 25000~30000GHz的带宽
光纤的 通信容量很大 |
| <input type="checkbox"/> 1300nm | 衰减较小 | |
| <input type="checkbox"/> 1550nm | 衰减较小 | |

常用的光纤规格有

- ☐ 单模光纤 8/125 μm 、9/125 μm 、10/125 μm
- ☐ 多模光纤 50/125 μm （欧洲标准），62.5/125 μm （美国标准）

02 导向型传输媒体

- 同轴电缆
- 双绞线
- 光纤

光 纤	波 长	传输速率	传输距离
G.652单模光纤（纤芯直径9μm）	1550nm	2.5Gb/s	100km
		10Gb/s	60km
		40Gb/s	4km
G.655单模光纤（纤芯直径9μm）	1550nm	2.5Gb/s	390km
		10Gb/s	240km
		40Gb/s	16km
普通多模光纤（纤芯直径50μm）	850nm	1Gb/s	550m
		10Gb/s	250m
普通多模光纤（纤芯直径62.5μm）	850nm	1Gb/s	275m
		10Gb/s	100m
新型多模光纤（纤芯直径50μm）	850nm	1Gb/s	1100m
		10Gb/s	550m

02 导向型传输媒体

同轴电缆

双绞线

光纤



02 导向型传输媒体

同轴电缆

双绞线

光纤

光纤的优点

- 通信容量非常大
- 抗雷电和电磁干扰性能好
- 传输损耗小，中继距离长
- 无串音干扰，保密性好
- 体积小，重量轻

光纤的缺点

- 切割光纤需要较贵的专用设备
- 目前光电接口还比较昂贵

03 非导向型传输媒体

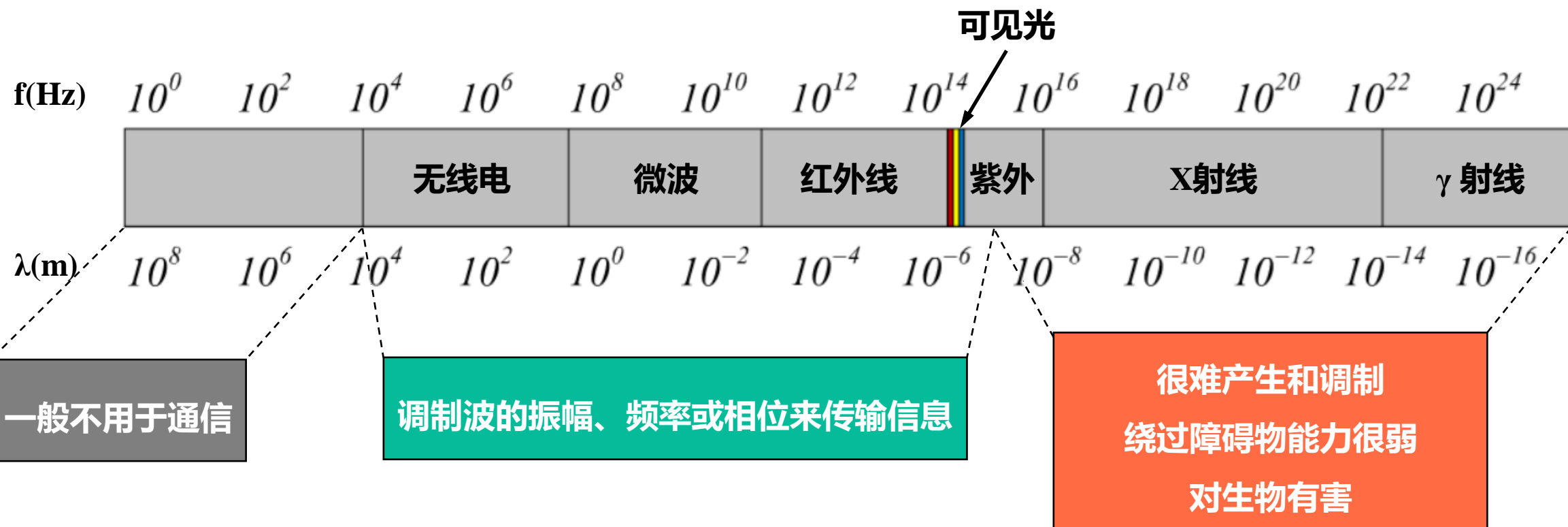
无线电波

微波

红外线

激光

可见光



03 非导向型传输媒体



国际电信联盟ITU对无线电频谱和波段的划分							
波段号	名称	缩写	频率范围	波长范围	波段名称		用途
5	低频	LF	30 ~ 300kHz	1 ~ 10km	长波	无线电波	国际广播，全向信标
6	中频	MF	300 ~ 3000kHz	100 ~ 1000m	中波		调幅广播，全向信标，海事及航空通讯
7	高频	HF	3 ~ 30MHz	10 ~ 100m	短波		短波民用电台
8	甚高频	VHF	30 ~ 300MHz	1 ~ 10m	米波		调频广播，电视广播，航空通讯
9	特高频	UHF	300 ~ 3000MHz	10 ~ 100cm	分米波	微波	电视广播，无线电话，无线网络，微波炉
10	超高频	SHF	3 ~ 30GHz	1 ~ 10cm	厘米波		无线网络，雷达，人造卫星接收
11	极高频	EHF	30 ~ 300GHz	1 ~ 10mm	毫米波		雷达，射电天文，遥感，人体扫描安检仪

03 非导向型传输媒体

无线电波

微波

红外线

激光

可见光

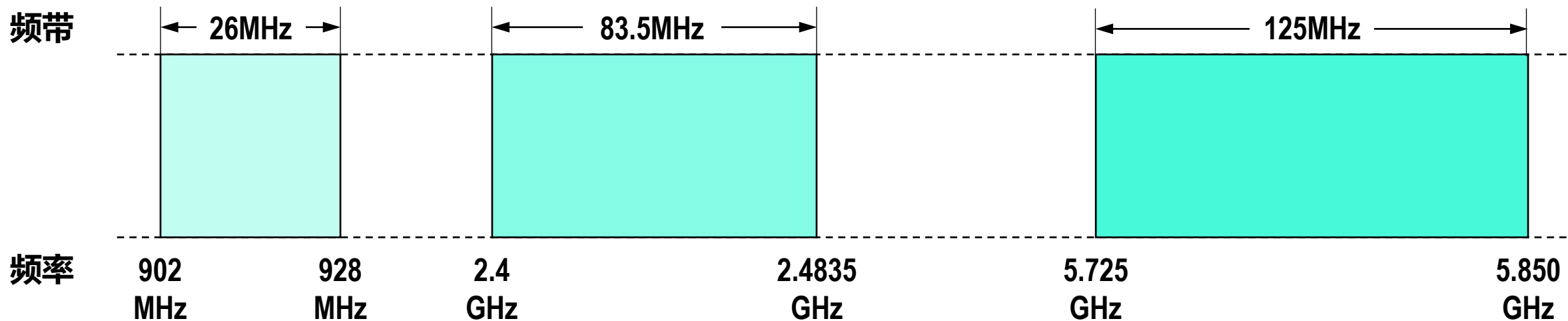
无线电频谱管理机构

中国：工业和信息化部无线电管理局（国家无线电办公室）

美国：联邦通讯委员会FCC

可自由使用的一些无线电频段

ISM (Industrial, Scientific, and Medical) 频段



03 非导向型传输媒体

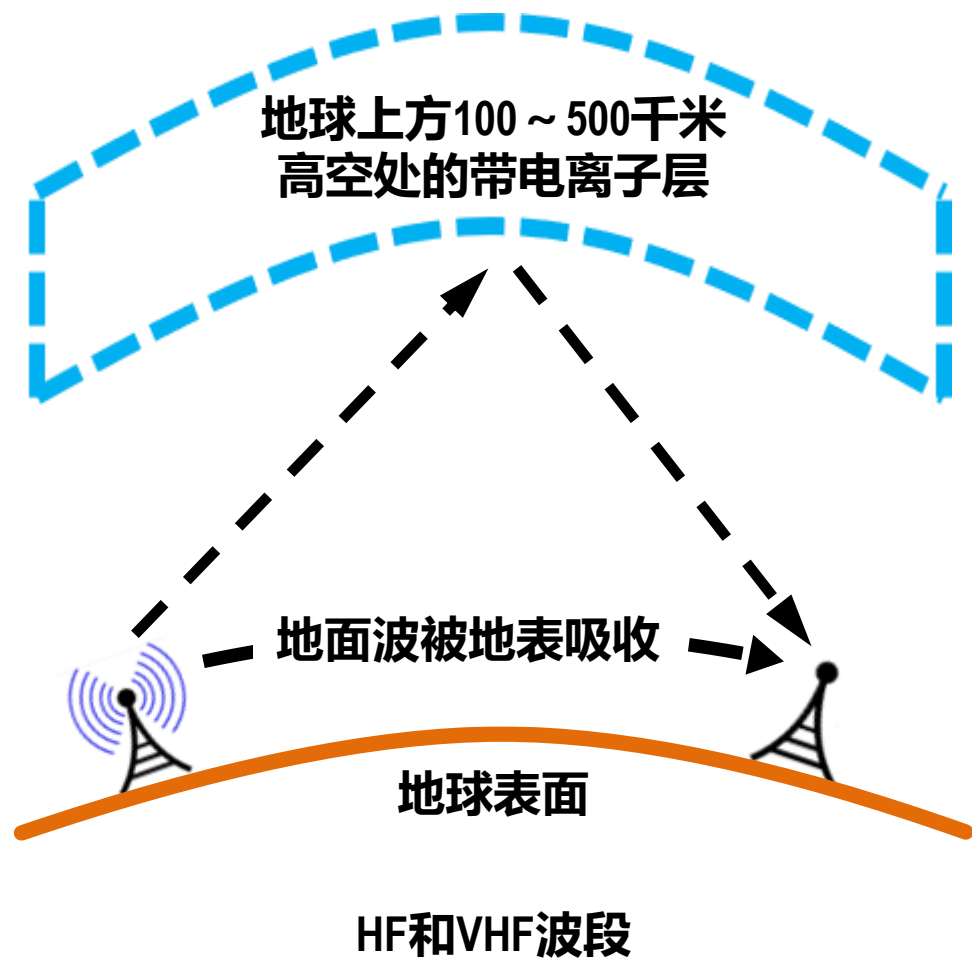
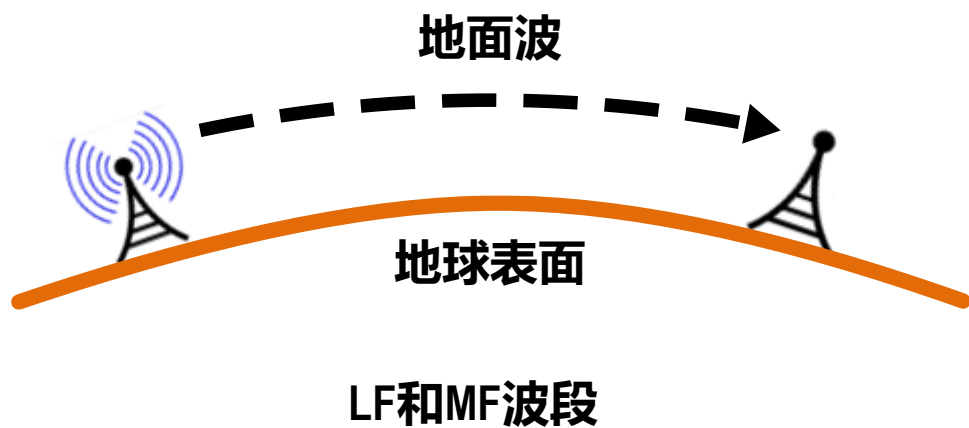
无线电波

微波

红外线

激光

可见光



03 非导向型传输媒体

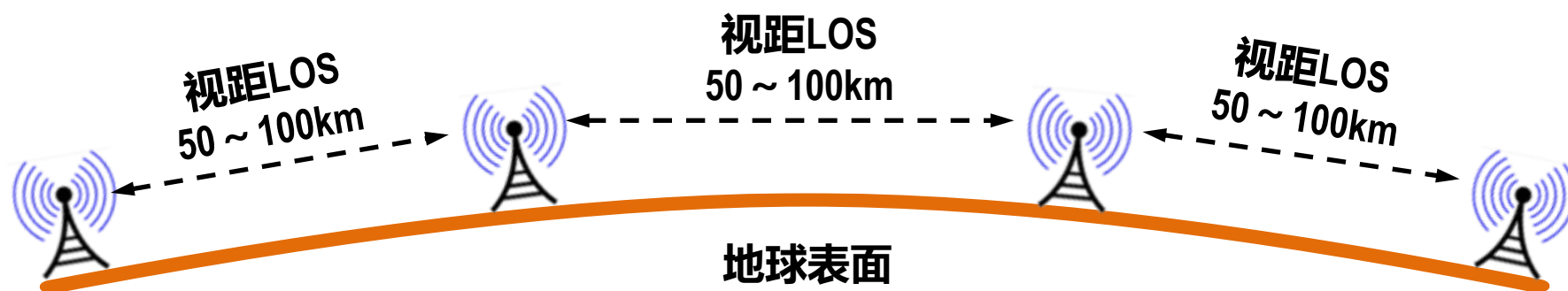
无线电波

微波

红外线

激光

可见光



地面微波接力通信示意图

03 非导向型传输媒体

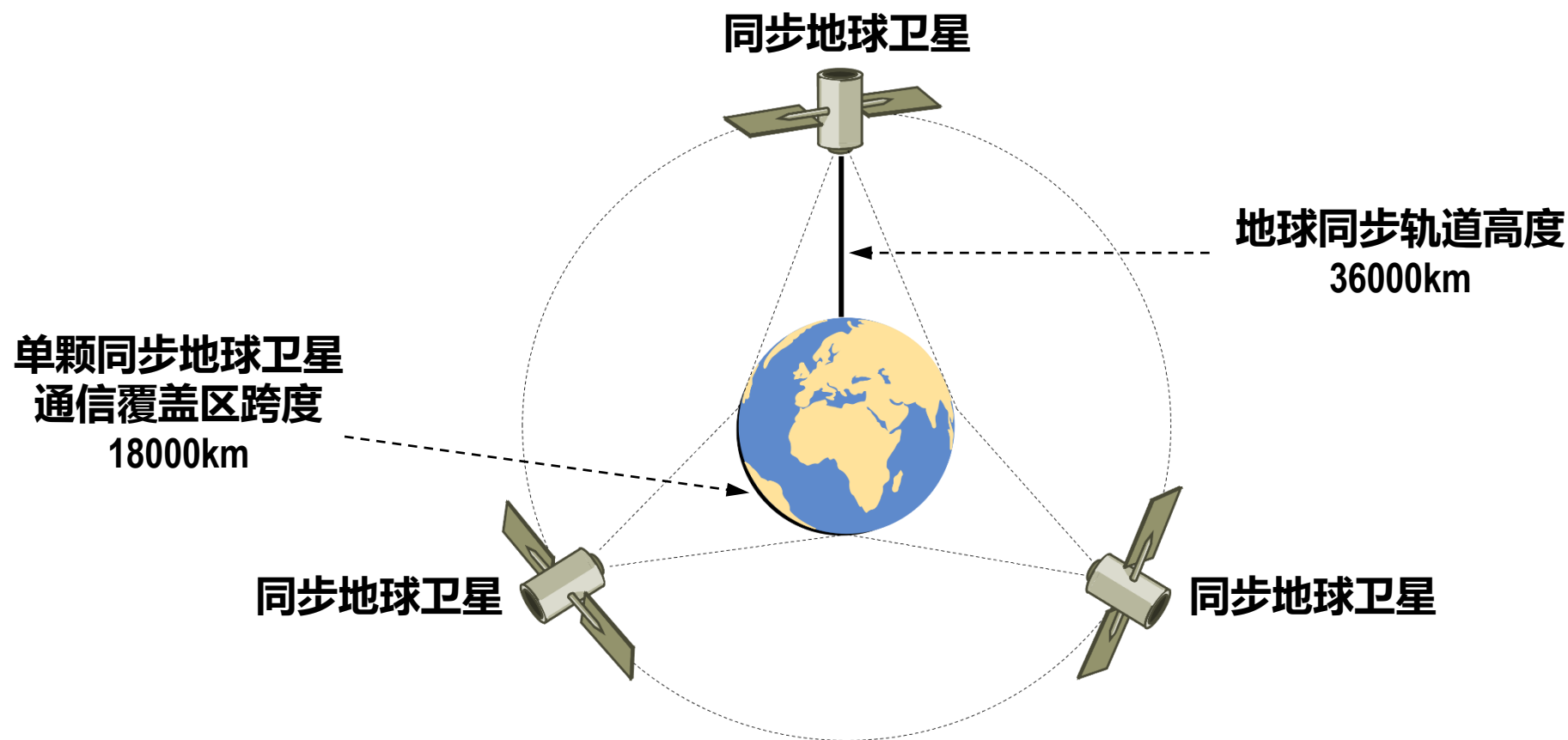
无线电波

微波

红外线

激光

可见光



03 非导向型传输媒体

无线电波

微波

红外线

激光

可见光



中、低轨道人造卫星
700 ~ 1500km

03 非导向型传输媒体

无线电波

微波

红外线

激光

可见光



电视遥控器



空调遥控器

03 非导向型传输媒体

无线电波

微波

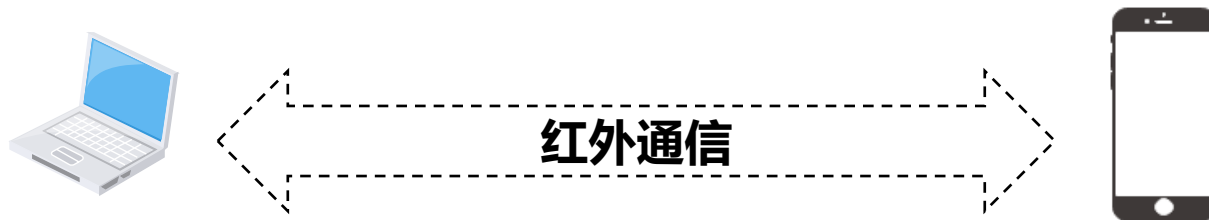
红外线

激光

可见光



- 点对点无线传输
- 直线传输，中间不能有障碍物，传输距离短
- 传输速率低 (4Mb/s ~ 16Mb/s)



03 非导向型传输媒体

无线电波

微波

红外线

激光

可见光



03 非导向型传输媒体

无线电波

微波

红外线

激光

可见光



03 非导向型传输媒体

无线电波

微波

红外线

激光

可见光

优酷

互联网时代

2.3 传输方式

01

串行传输和并行传输

02

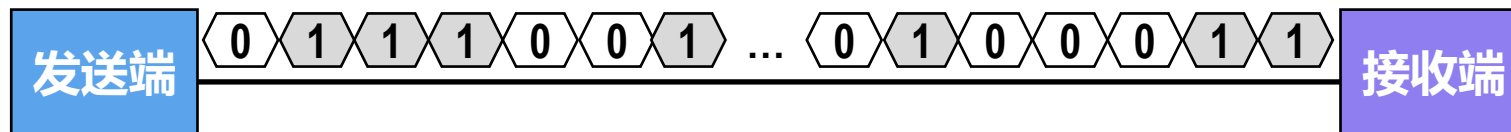
同步传输和异步传输

03

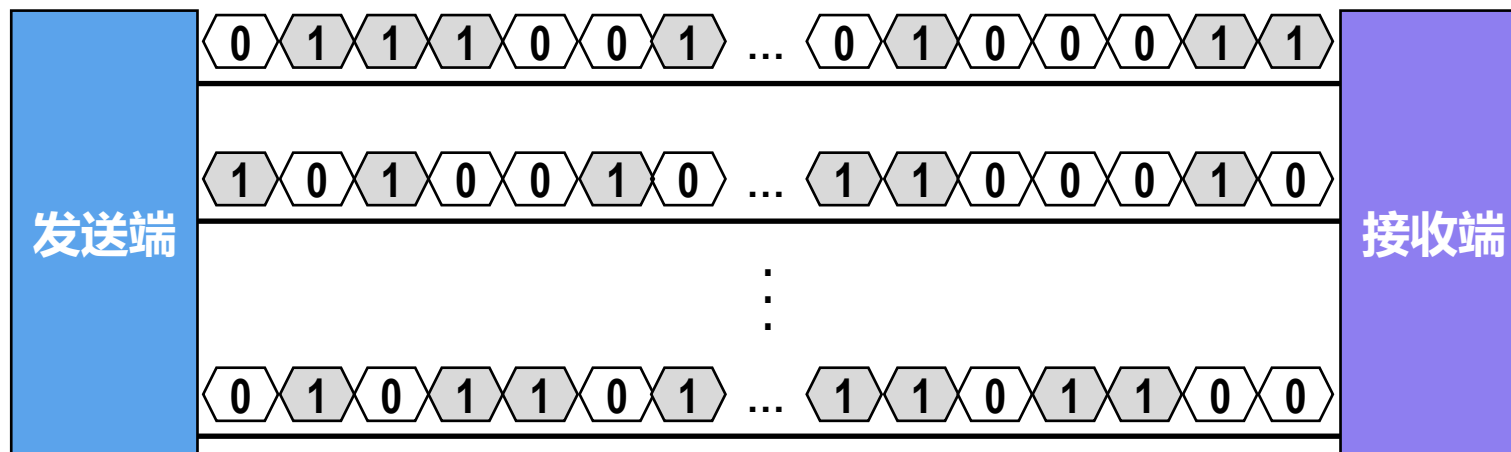
单向通信、双向交替通信和双向同时通信

01 串行传输和并行传输

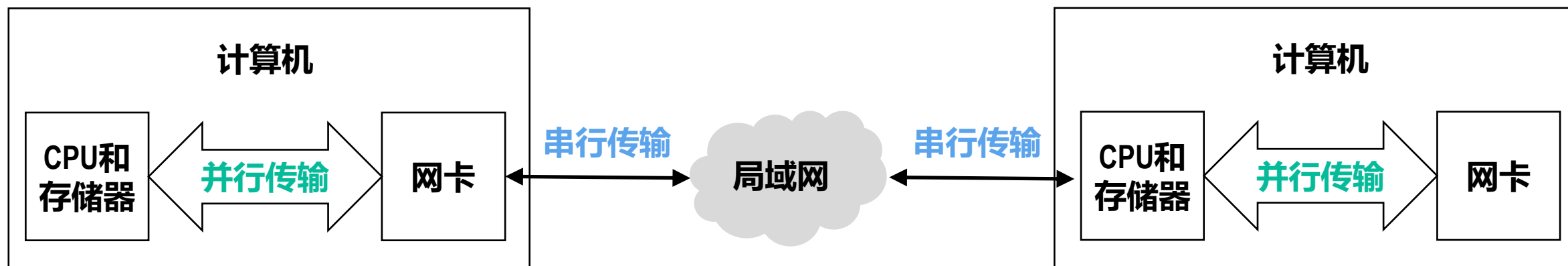
串行传输



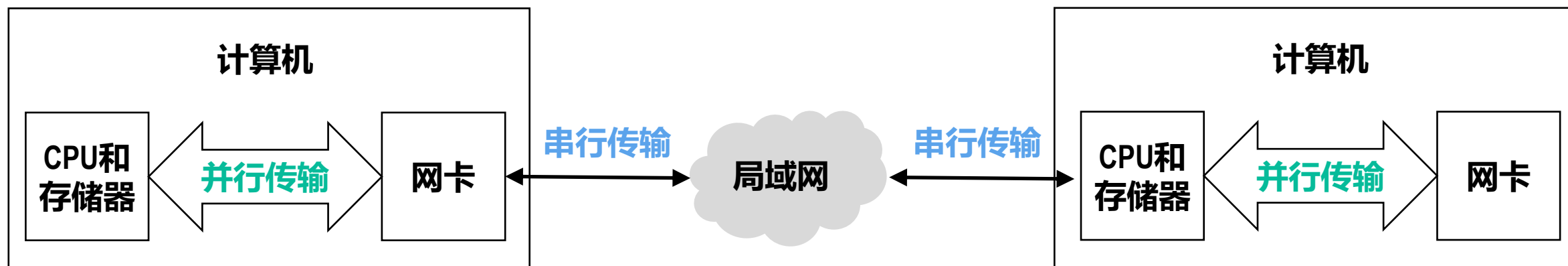
并行传输



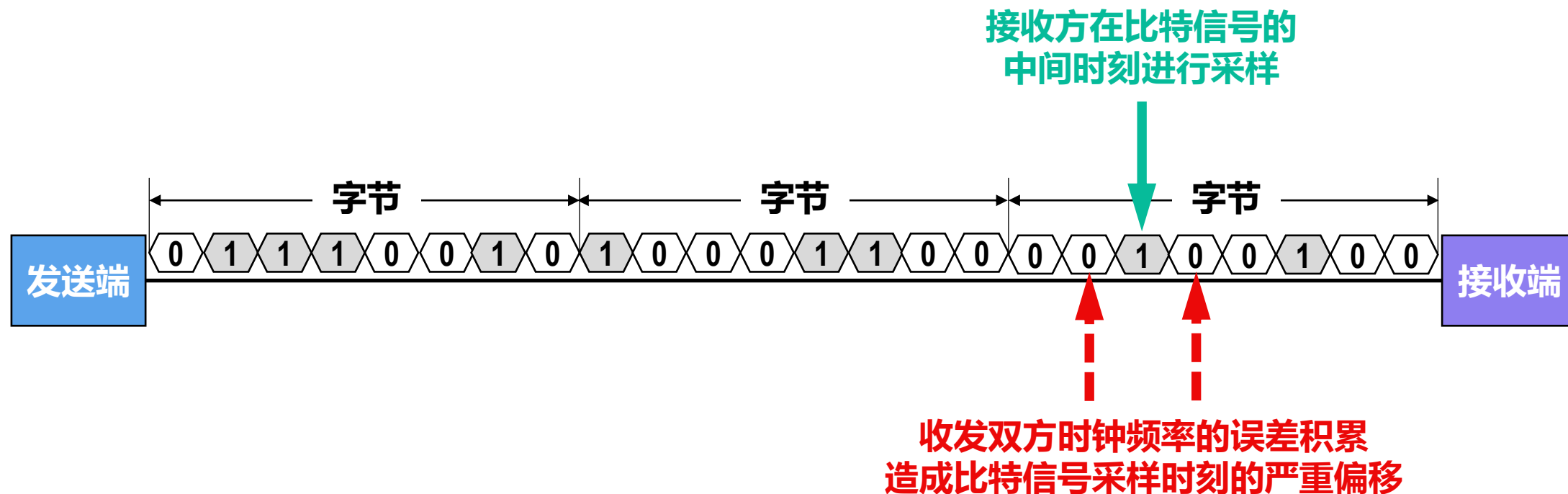
01 串行传输和并行传输



01 串行传输和并行传输



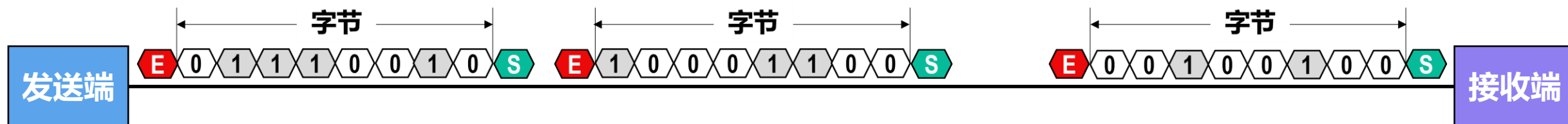
02 同步传输和异步传输



收发双方时钟同步的方法

- ☐ **外同步**：在收发双方之间增加一条时钟信号线。
- ☐ **内同步**：发送端将时钟信号编码到发送数据中一起发送（例如曼彻斯特编码）。

02 同步传输和异步传输



■ **字节之间异步**，即字节之间的时间间隔不固定。

■ **字节中的每个比特仍然要同步**，即各比特的持续时间是相同的。

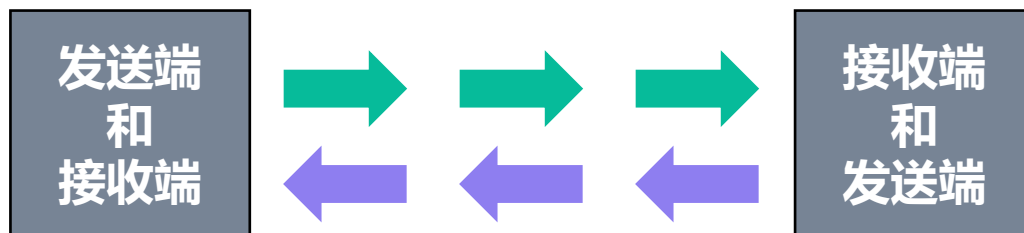
03 单向通信、双向交替通信和双向同时通信

单向通信
(单工)

无线电广播

双向交替通信
(半双工)

对讲机

双向同时通信
(全双工)

手机

2.4 编码与调制

01

编码与调制的基本概念

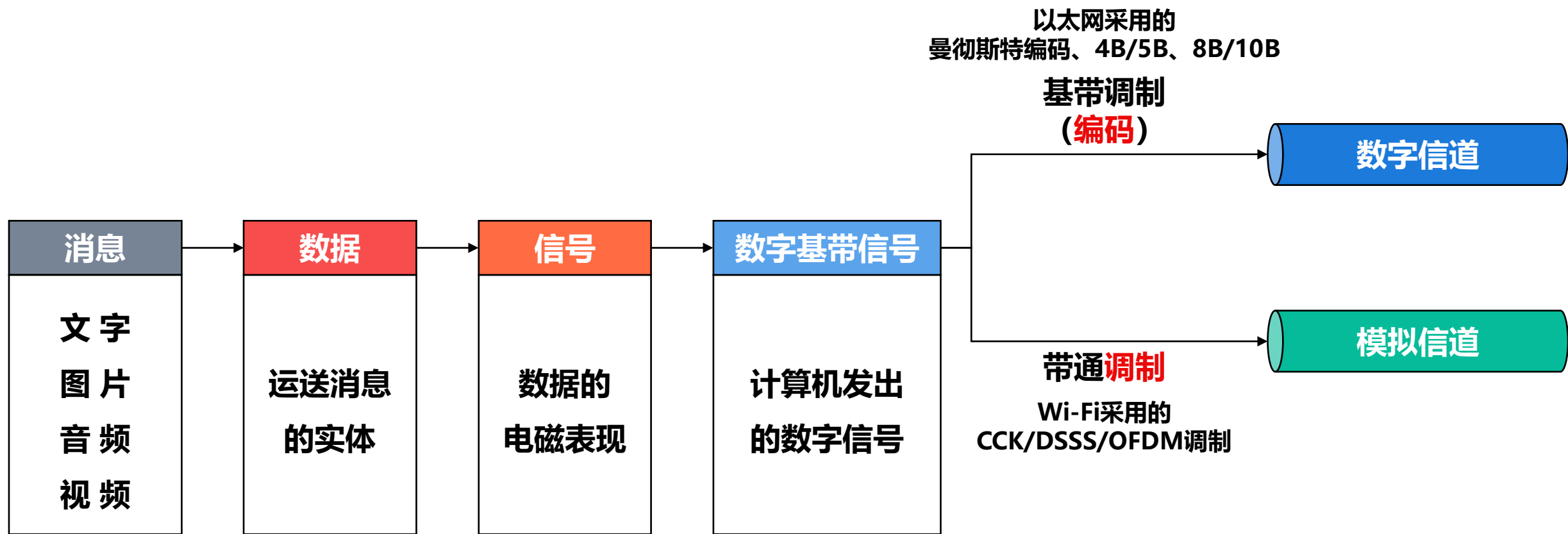
02

常用编码方式

03

基本的带通调制方法和混合调制方法

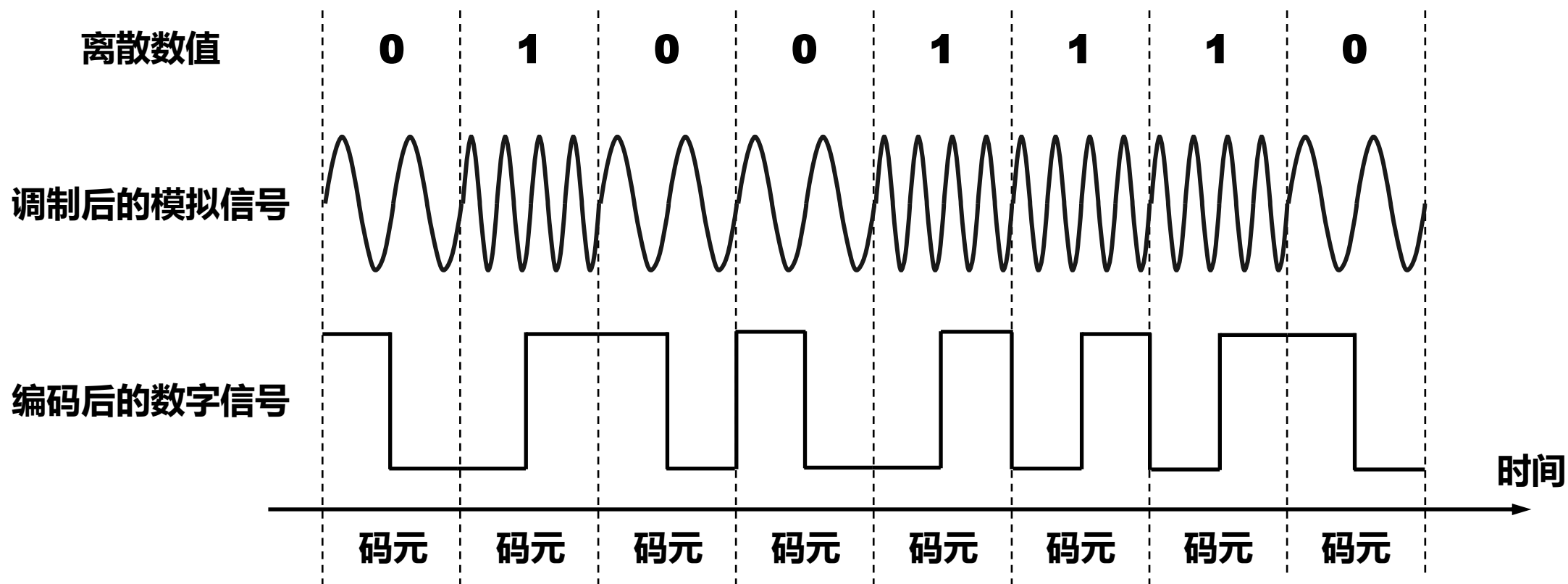
01 编码与调制的基本概念



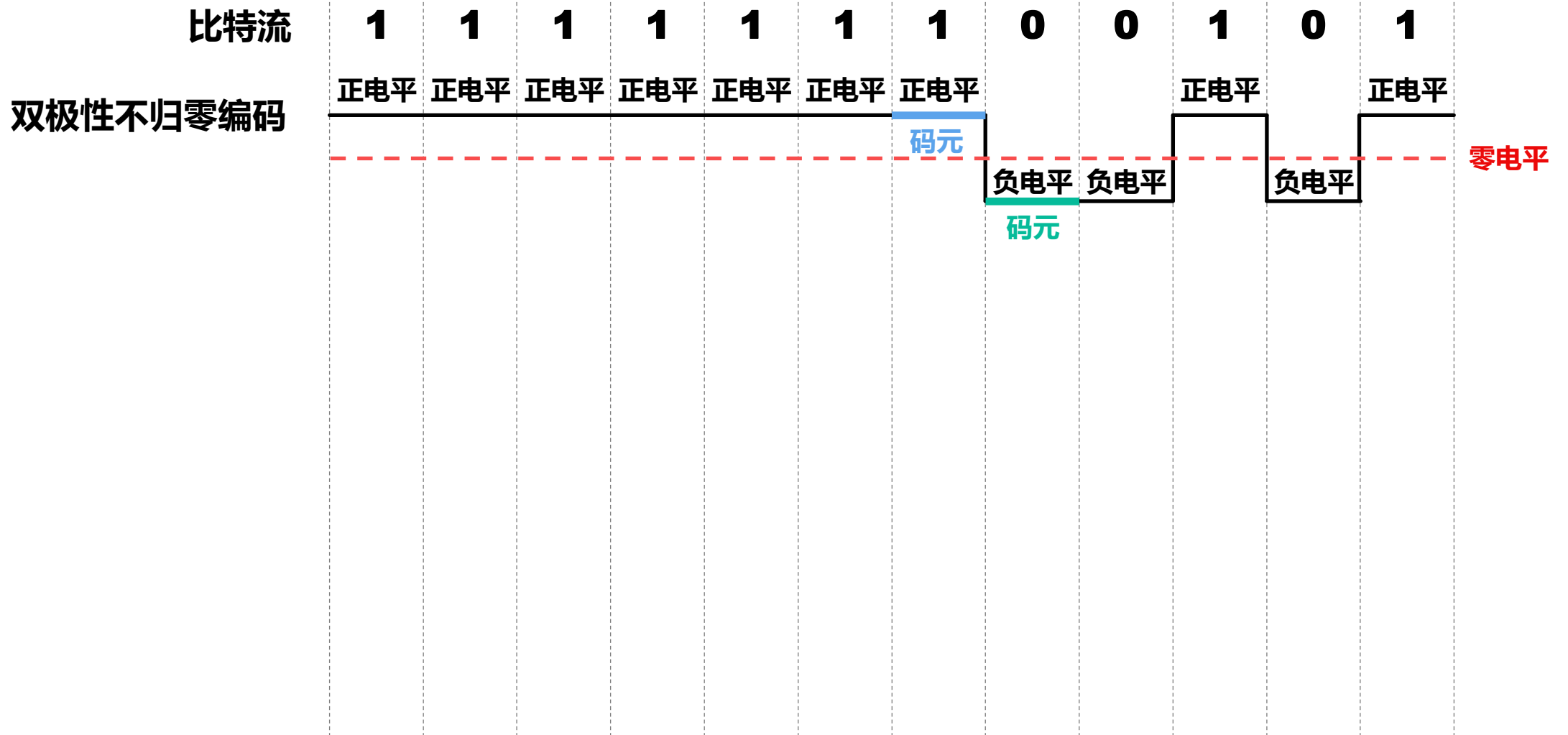
01 编码与调制的基本概念

码元

在使用时间域的波形表示信号时，代表不同离散数值的基本波形称为码元。



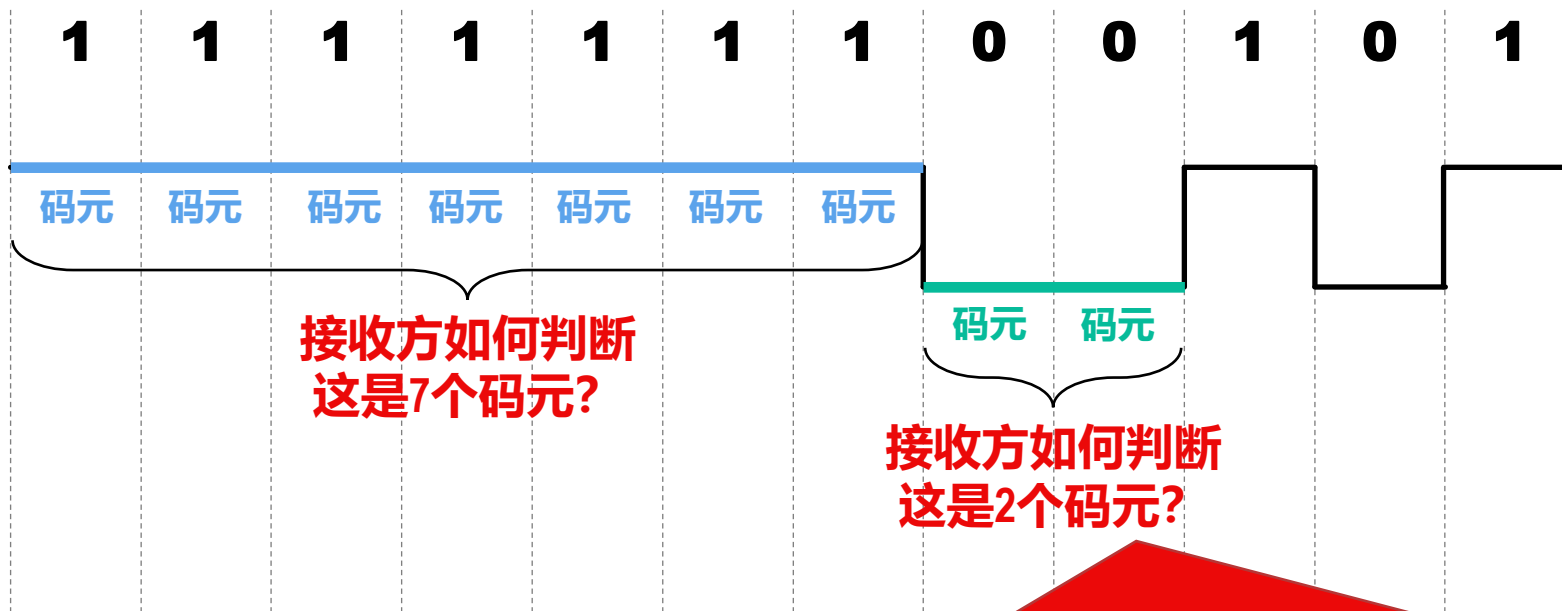
02 常用编码方式



02 常用编码方式

比特流

双极性不归零编码
(编码效率高, 但存在同步问题)



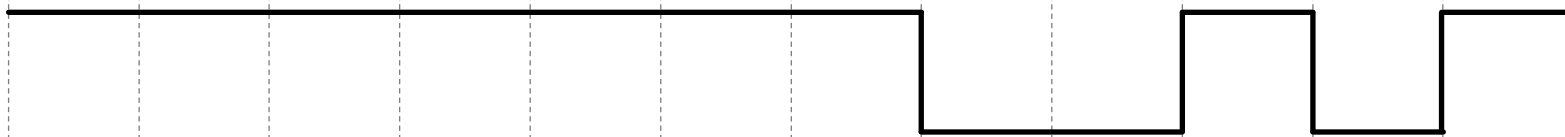
需要给收发双方再添加一条时钟信号线。
发送方通过数据信号线给接收方发送数据的同时, 还通过时钟信号线给接收方发送时钟信号。
接收方按照接收到的时钟信号的节拍, 对数据信号线上的信号进行采样。
对于计算机网络, 宁愿利用这根传输线传输数据信号, 而不是传输时钟信号。

02 常用编码方式

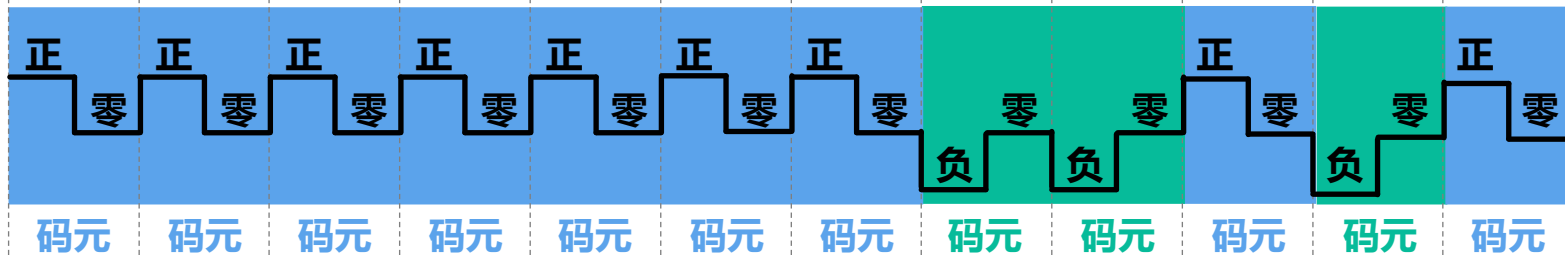
比特流

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

双极性不归零编码
(编码效率高, 但存在同步问题)



双极性归零编码
(自同步, 但编码效率低)



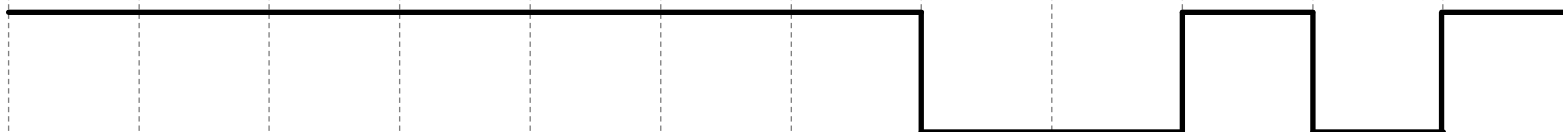
在每个码元的中间时刻信号都会回归到零电平。
接收方只要在信号归零后采样即可。
归零编码相当于将时钟信号用“归零”方式编码在了数据之内, 这称为“自同步”信号。
然而, 归零编码中大部分的数据带宽, 都用来传输“归零”而浪费掉了。

02 常用编码方式

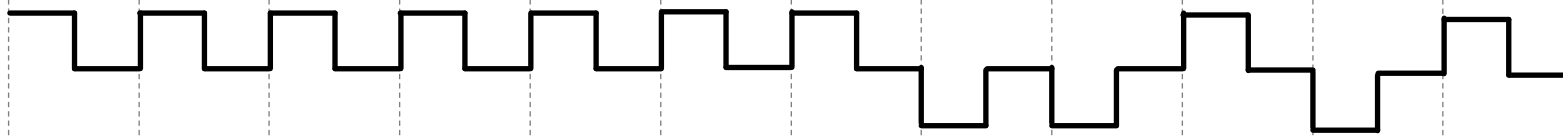
比特流

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

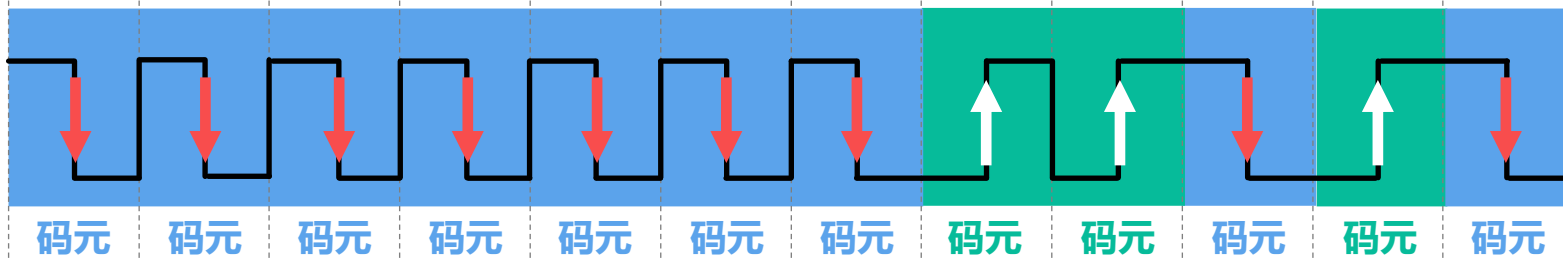
双极性不归零编码
(编码效率高, 但存在同步问题)



双极性归零编码
(自同步, 但编码效率低)



曼彻斯特编码
(自同步, 10Mb/s传统以太网)



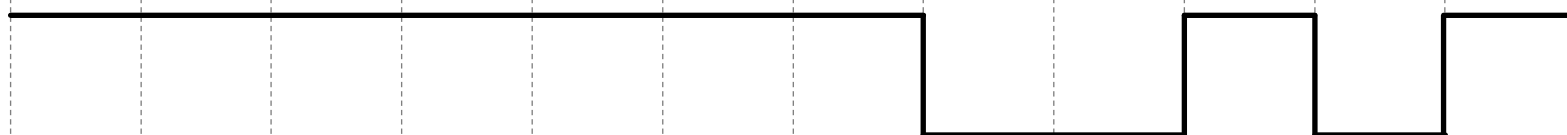
码元中间时刻的电平跳变既表示时钟信号, 也表示数据。
正跳变表示1还是0, 负跳变表示0还是1, 可以自行定义。

02 常用编码方式

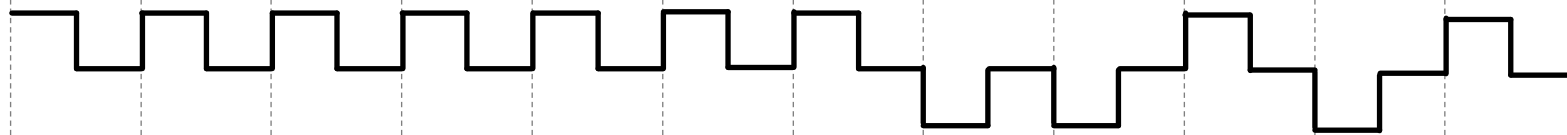
比特流

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

双极性不归零编码
(编码效率高, 但存在同步问题)

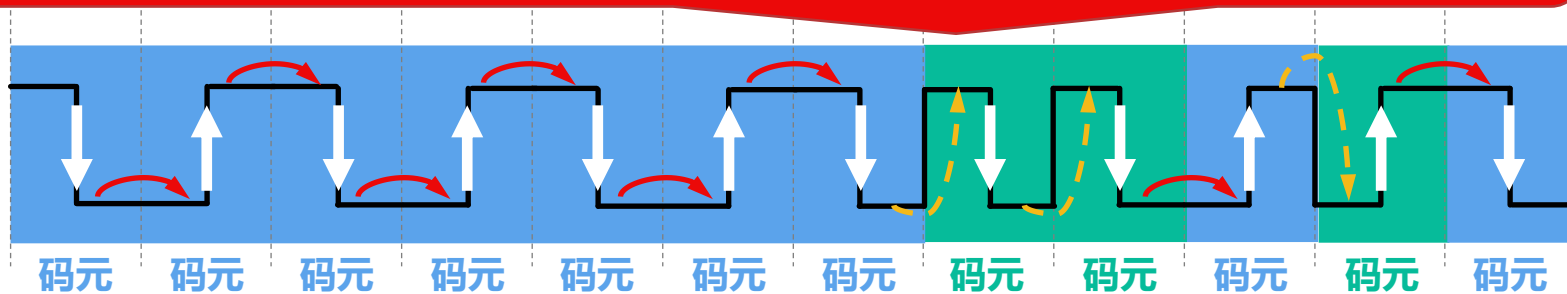


双极性归零编码
(自同步, 但编码效率低)

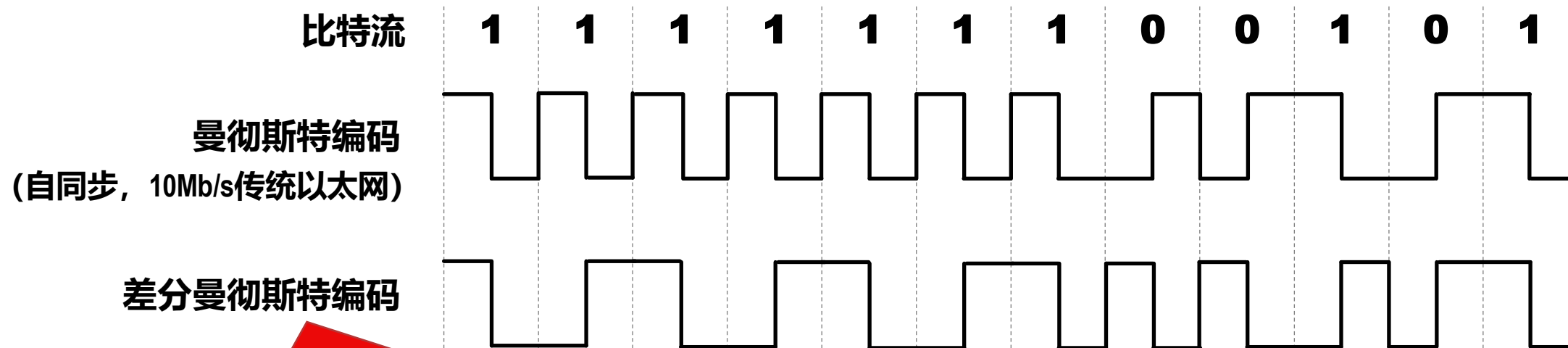


码元中间时刻的电平跳变仅表示时钟信号, 而不表示数据。
数据的表示在于每一个码元开始处是否有电平跳变: 无跳变表示1, 有跳变表示0。

差分曼彻斯特编码



02 常用编码方式

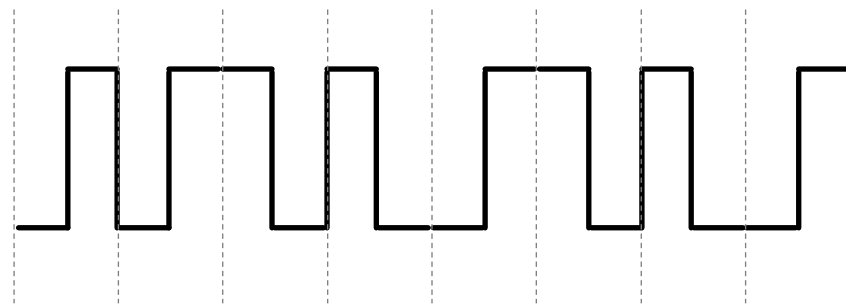


在传输大量连续1或连续0的情况下，差分曼彻斯特编码信号比曼彻斯特编码信号的变化少。在噪声干扰环境下，检测有无跳变比检测跳变方向更不容易出错，因此差分曼彻斯特编码信号比曼彻斯特编码信号更易于检测。

在传输介质接线错误导致高低电平翻转的情况下，差分曼彻斯特编码仍然有效。

02 常用编码方式

【2013年 题34】若下图为10BaseT网卡接收到的信号波形，则该网卡收到的比特串是（**A**）。



A. 0011 0110

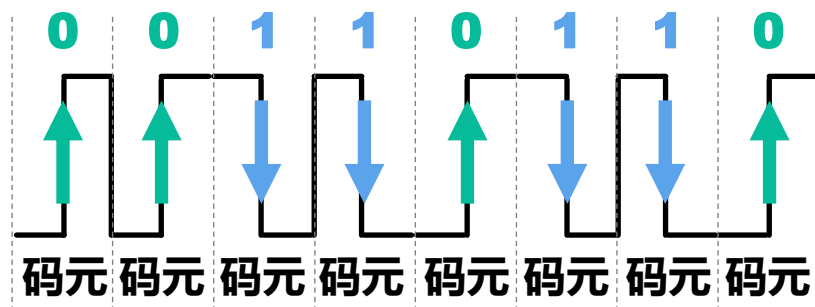
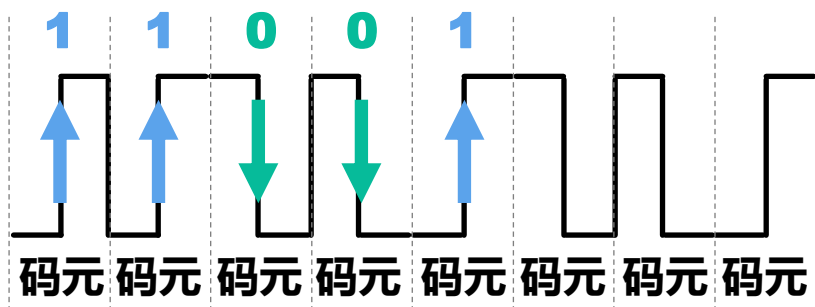
B. 1010 1101

C. 0101 0010

D. 1100 0101

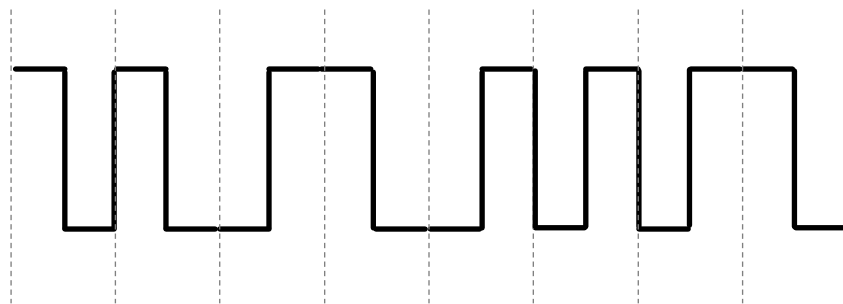
解析

1. 10BaseT以太网使用的是**曼彻斯特编码**。
2. 每个码元的中间时刻电平发生跳变：正跳变表示1还是0，负跳变表示0还是1，可以自行定义。



02 常用编码方式

【2021年 题34】若下图为一段差分曼彻斯特编码信号波形，则其编码的二进制位串是（**A**）。



A. 1011 1001

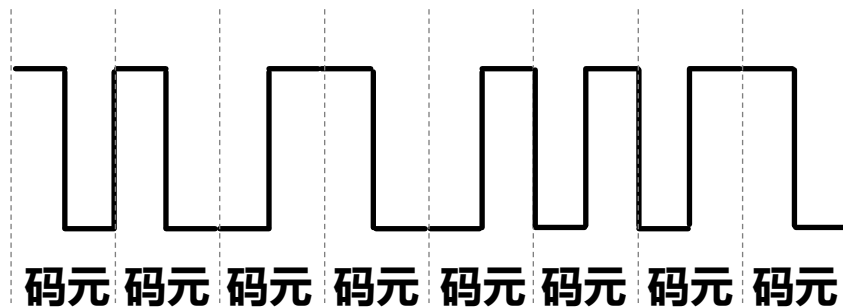
B. 1101 0001

C. 0010 1110

D. 1011 0110

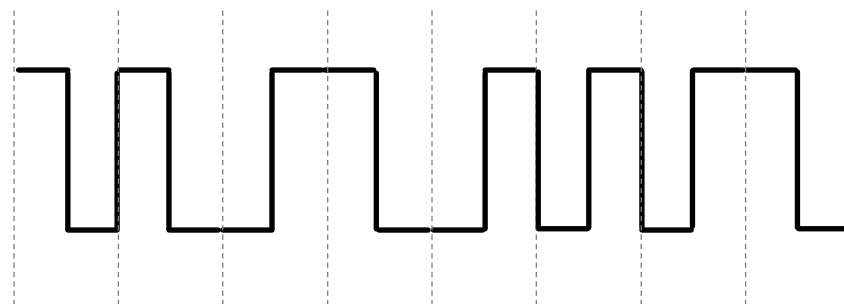
解析

1. 码元中间时刻的电平跳变仅表示时钟信号，而不表示数据。
2. 数据的表示在于每一个码元开始处是否有电平跳变：无跳变表示1，有跳变表示0。



02 常用编码方式

【2021年 题34】若下图为一段差分曼彻斯特编码信号波形，则其编码的进制位串是 (A)。



A. 1011 1001

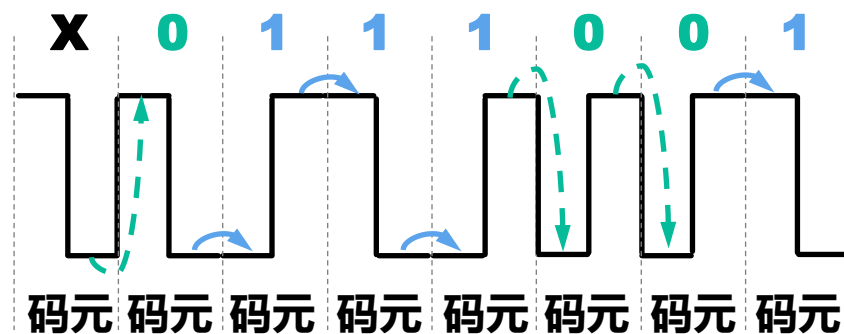
B. 1101 0001

C. 0010 1110

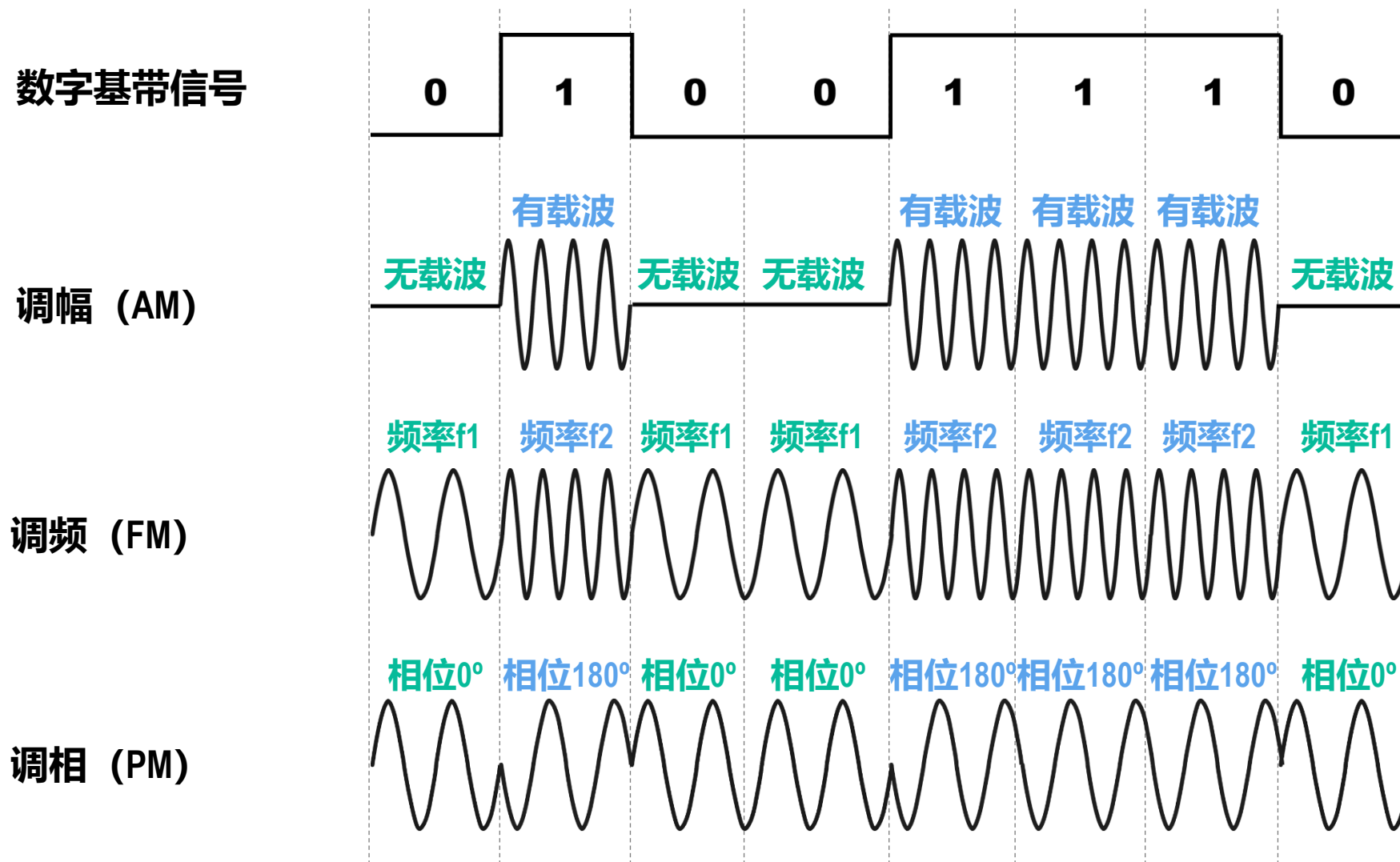
D. 1011 0110

解析

1. 码元中间时刻的电平跳变仅表示时钟信号，而不表示数据。
2. 数据的表示在于每一个码元开始处是否有电平跳变：无跳变表示1，有跳变表示0。



03 基本的带通调制方法和混合调制方法



使用基本调制方法，1个码元只能包含1个比特信息。
如何才能使1个码元包含更多的比特呢？

03 基本的带通调制方法和混合调制方法

频率

相位

振幅

因为载波的**频率和相位是相关的**，即频率是相位随时间的变化率，所以载波的**频率和相位不能进行混合调制**。

03 基本的带通调制方法和混合调制方法

频率

相位

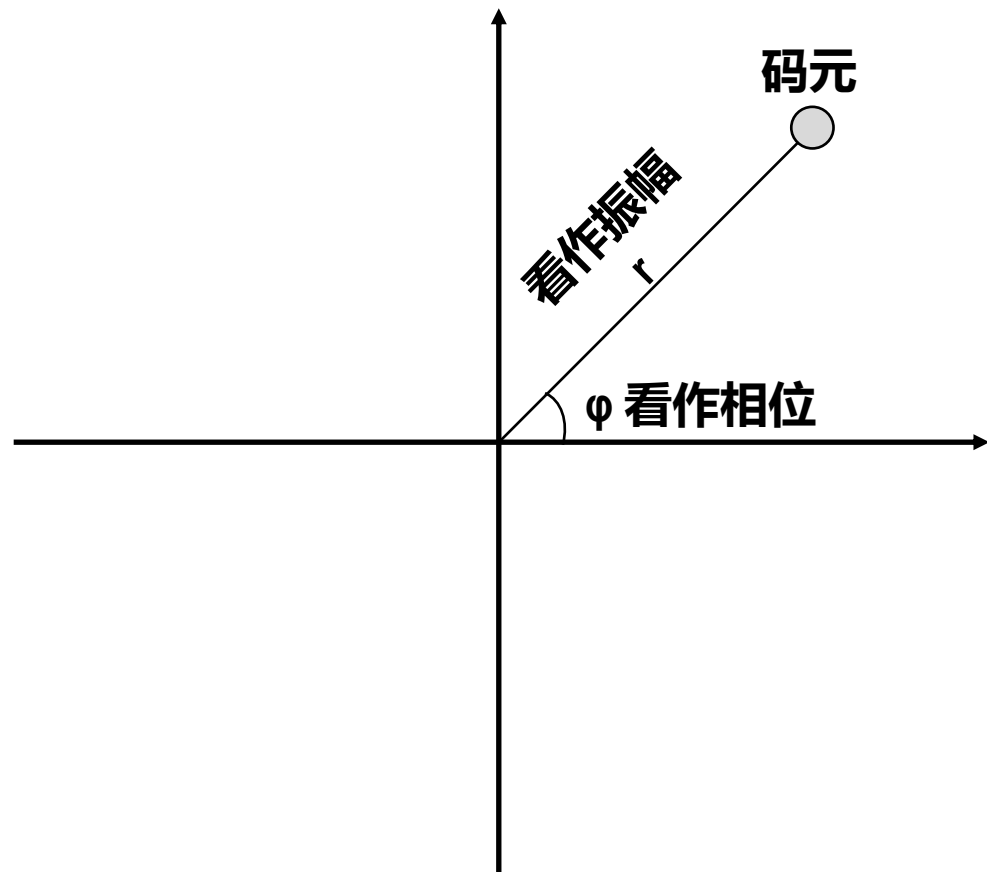
振幅

通常情况下，载波的相位和振幅可以结合起来一起调制，例如**正交振幅调制QAM**。

03 基本的带通调制方法和混合调制方法

混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选



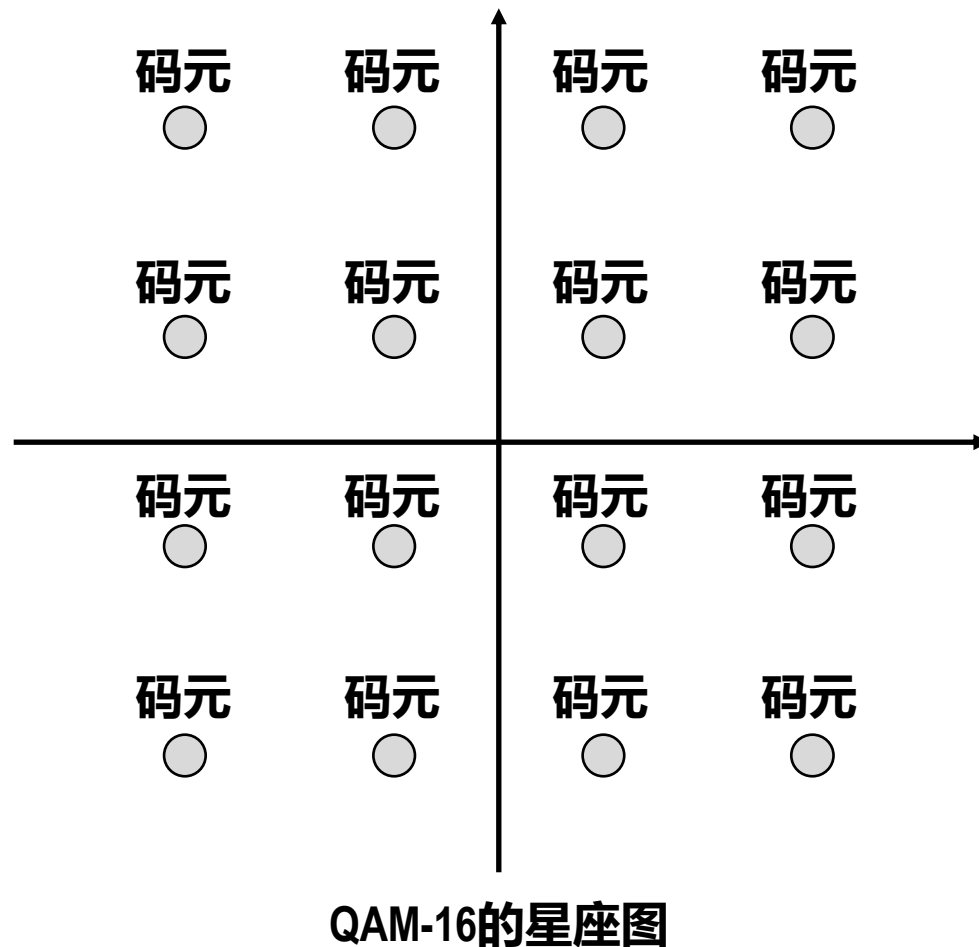
QAM-16的星座图

03 基本的带通调制方法和混合调制方法

混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选
- 可以调制出16种码元（波形），每种码元可以对应表示4个比特（ $\log_2 16=4$ ）

每个码元可以包含几个比特呢？



03 基本的带通调制方法和混合调制方法

混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选
- 可以调制出16种码元（波形），每种码元可以对应表示4个比特（ $\log_2 16=4$ ）

类比举例：

两种手势（码元）

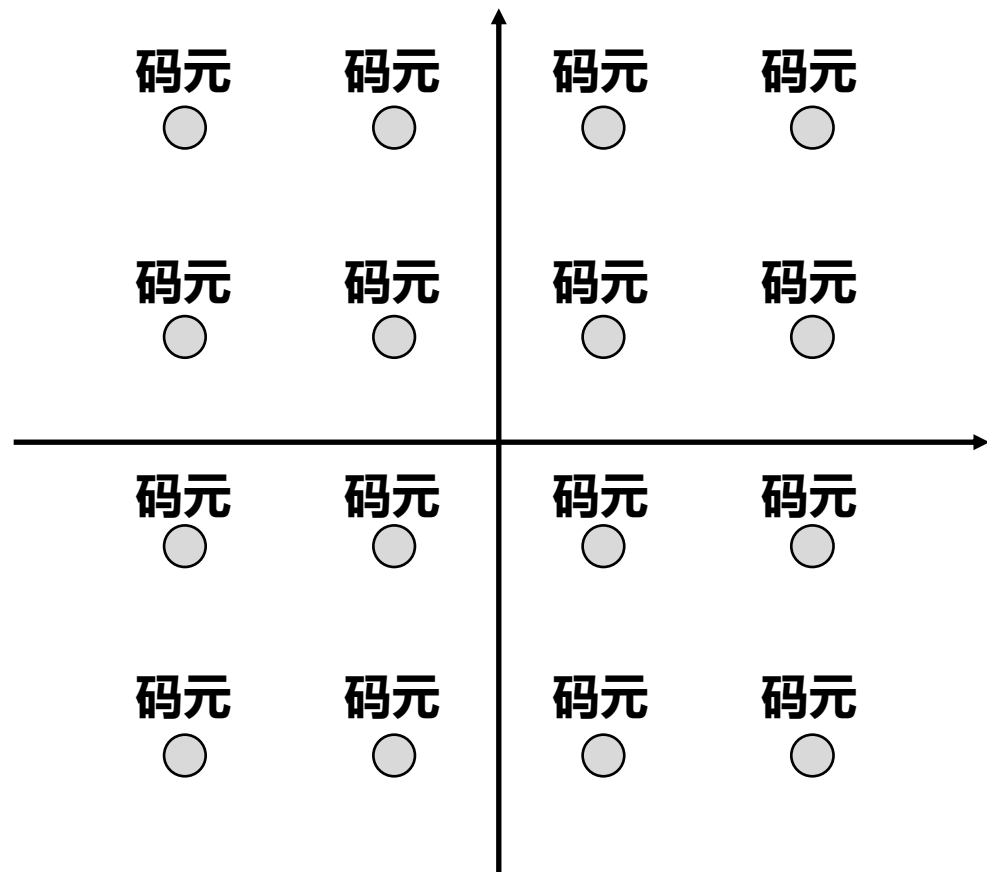


0



1

手势（码元）数量为2，则每种手势（码元）可表示的比特数量为 $\log_2 2=1$ 。



QAM-16的星座图

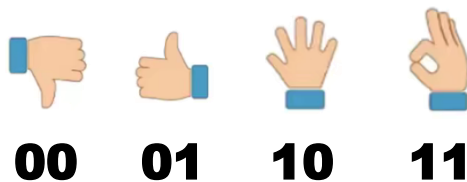
03 基本的带通调制方法和混合调制方法

混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

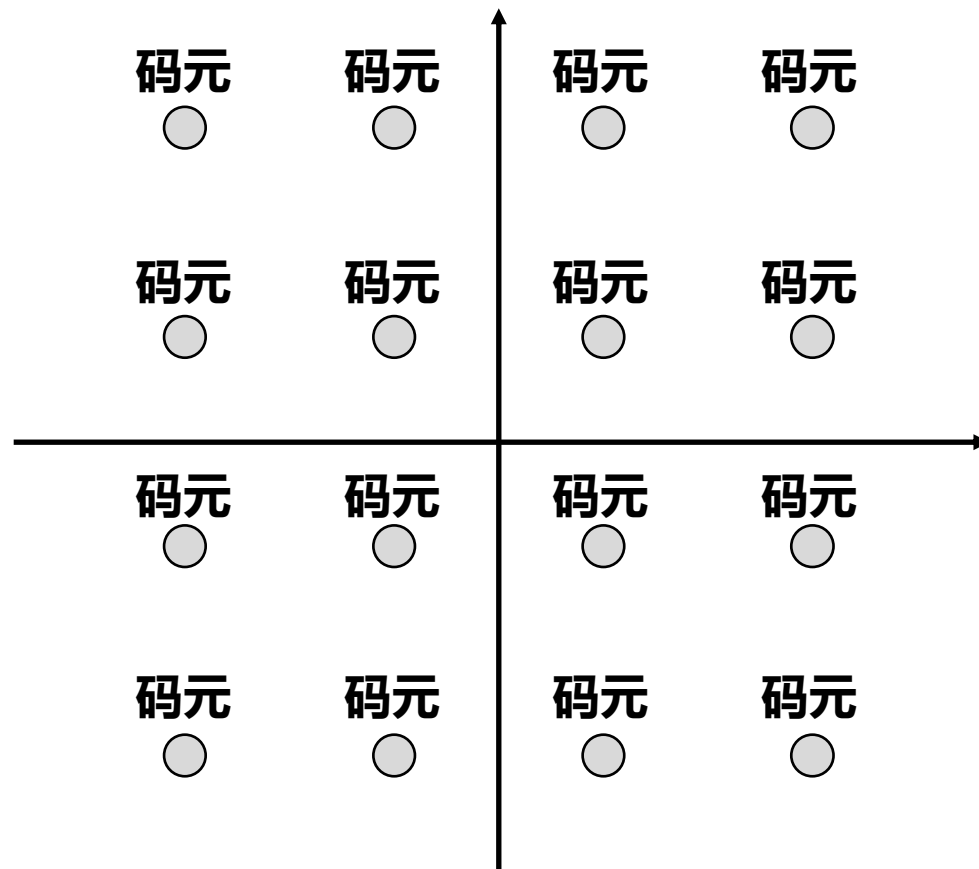
- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选
- 可以调制出16种码元（波形），每种码元可以对应表示4个比特（ $\log_2 16=4$ ）

类比举例：

四种手势（码元）



手势（码元）数量为4，则每种手势（码元）可表示的比特数量为 $\log_2 4=2$ 。

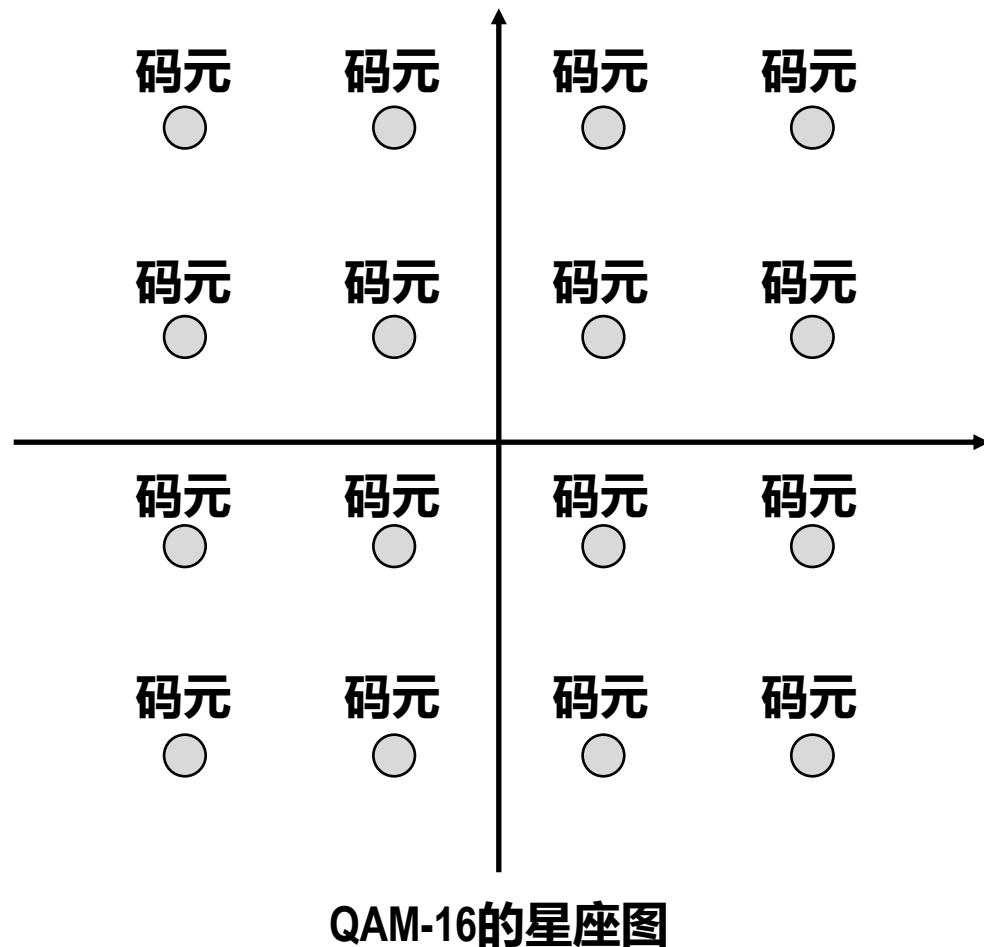


QAM-16的星座图

03 基本的带通调制方法和混合调制方法

混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

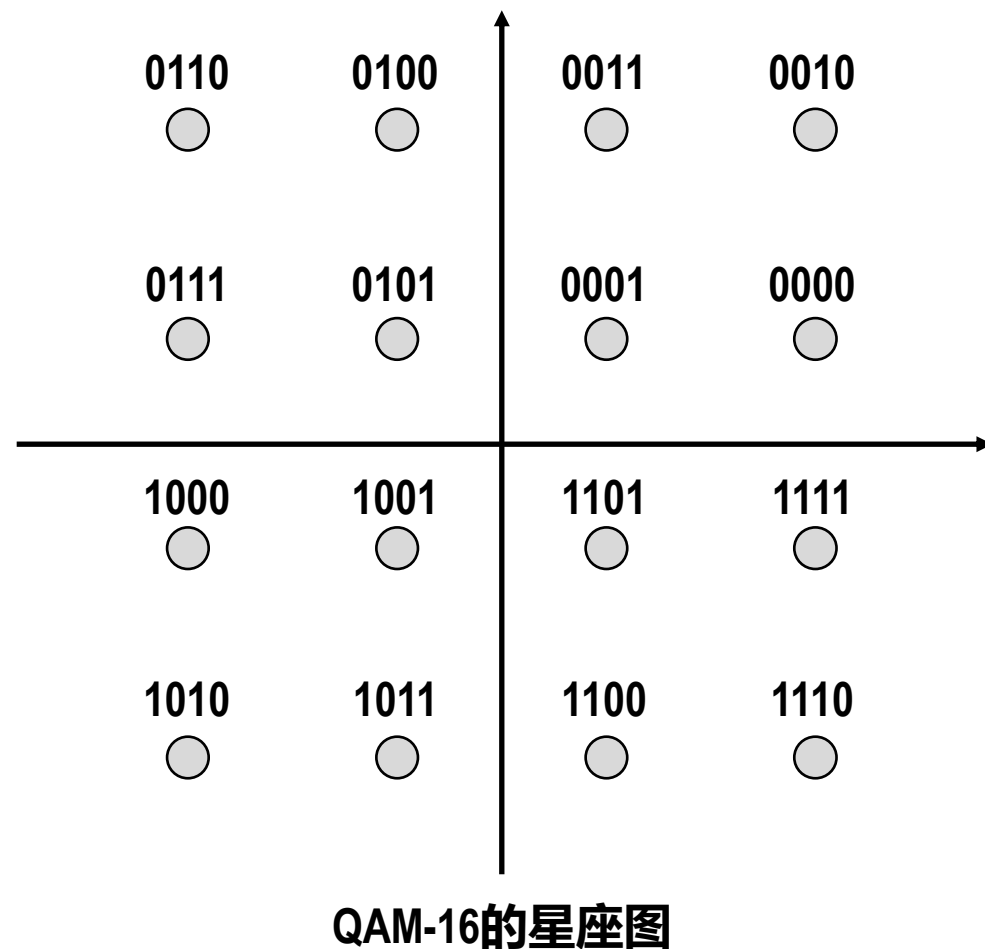
- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选
- 可以调制出16种码元（波形），每种码元可以对应表示4个比特（ $\log_2 16=4$ ）



03 基本的带通调制方法和混合调制方法

混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

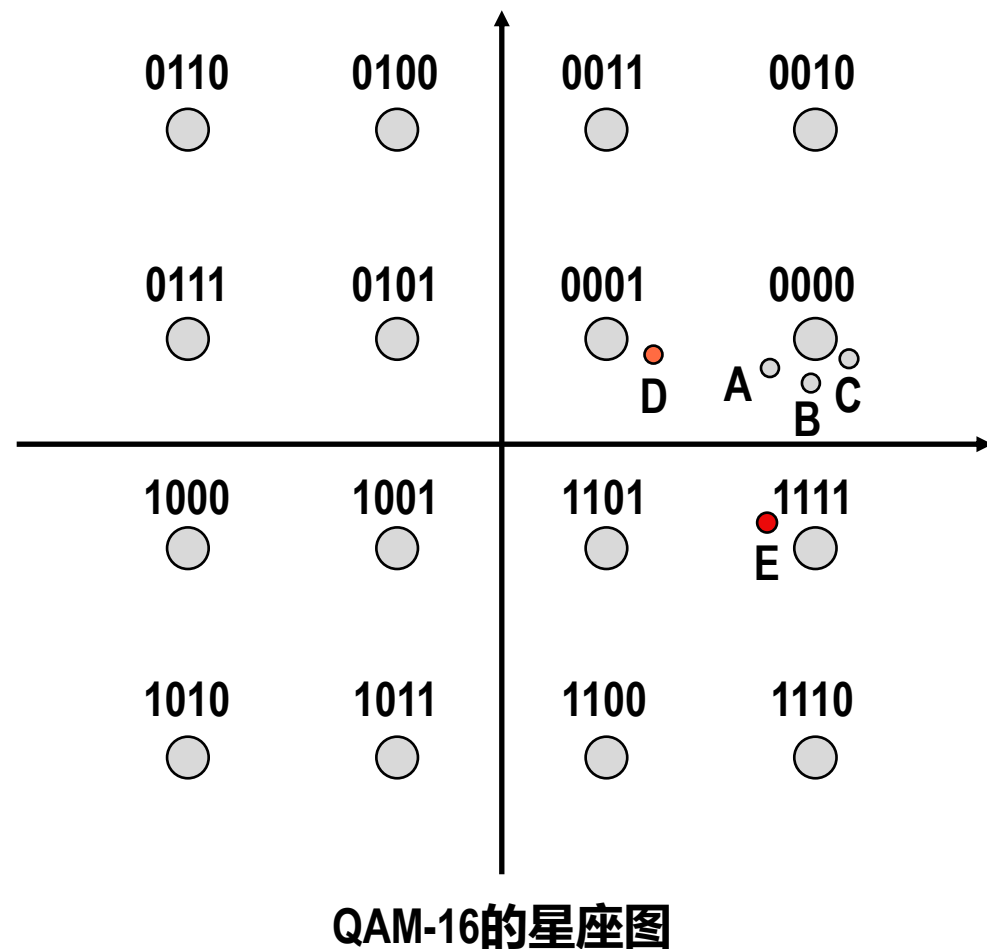
- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选
- 可以调制出16种码元（波形），每种码元可以对应表示4个比特（ $\log_2 16=4$ ）



03 基本的带通调制方法和混合调制方法

混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选
- 可以调制出16种码元（波形），每种码元可以对应表示4个比特 ($\log_2 16=4$)

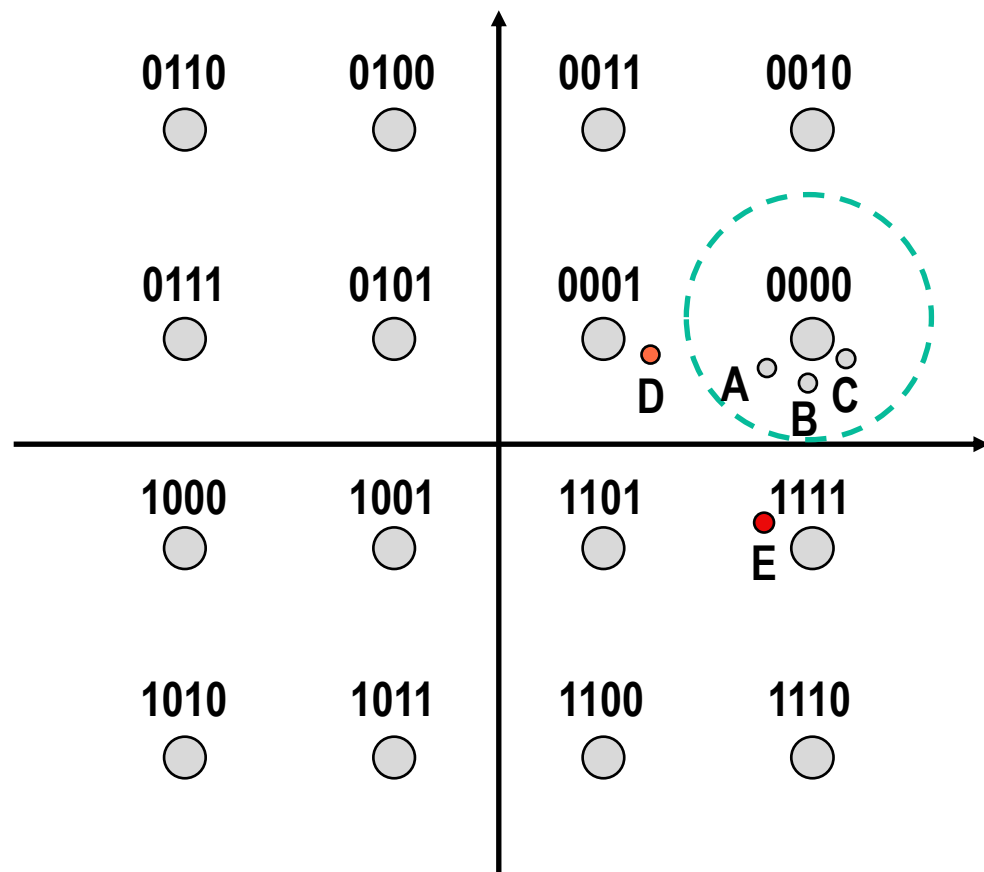


03 基本的带通调制方法和混合调制方法

混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选
- 可以调制出16种码元（波形），每种码元可以对应表示4个比特（ $\log_2 16=4$ ）

码元A、B、C都可以被解调为0000（正确）。



QAM-16的星座图

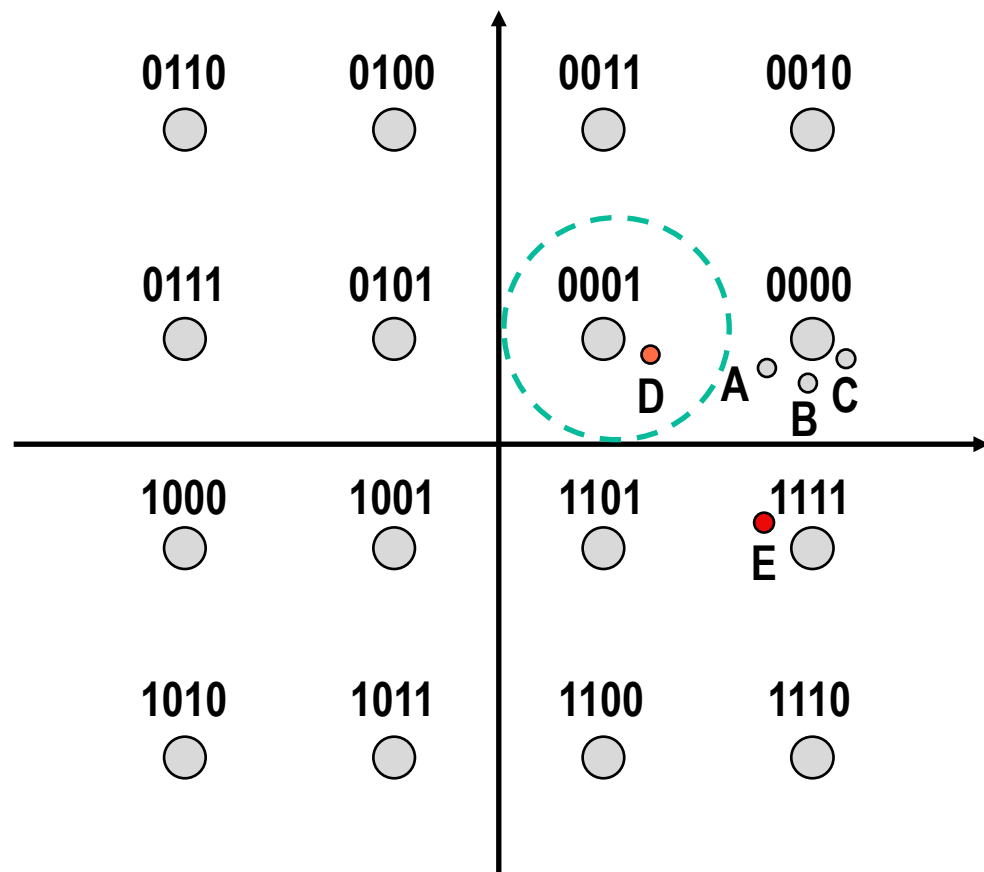
03 基本的带通调制方法和混合调制方法

混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选
- 可以调制出16种码元（波形），每种码元可以对应表示4个比特（ $\log_2 16=4$ ）

码元A、B、C都可以被解调为0000（正确）。

码元D被解调为0001（1位错误）。



QAM-16的星座图

03 基本的带通调制方法和混合调制方法

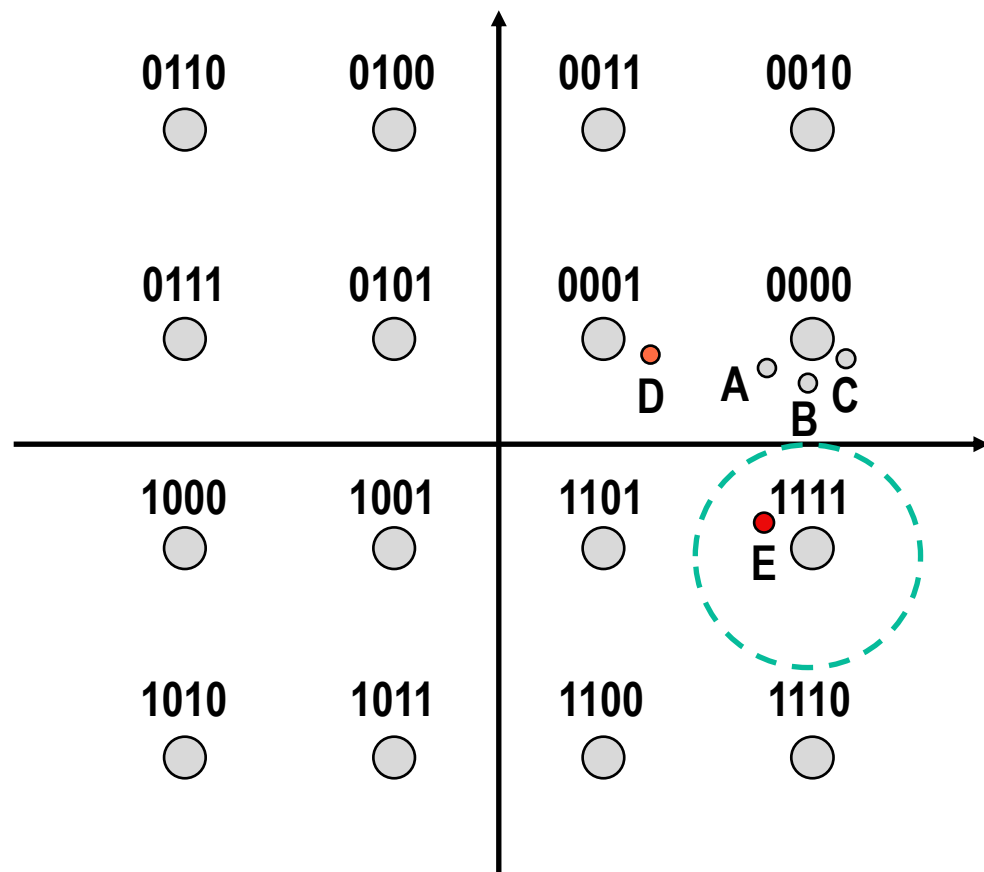
混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选
- 可以调制出16种码元（波形），每种码元可以对应表示4个比特（ $\log_2 16=4$ ）

码元A、B、C都可以被解调为0000（正确）。

码元D被解调为0001（1位错误）。

码元E被解调为1111（4位全错）。

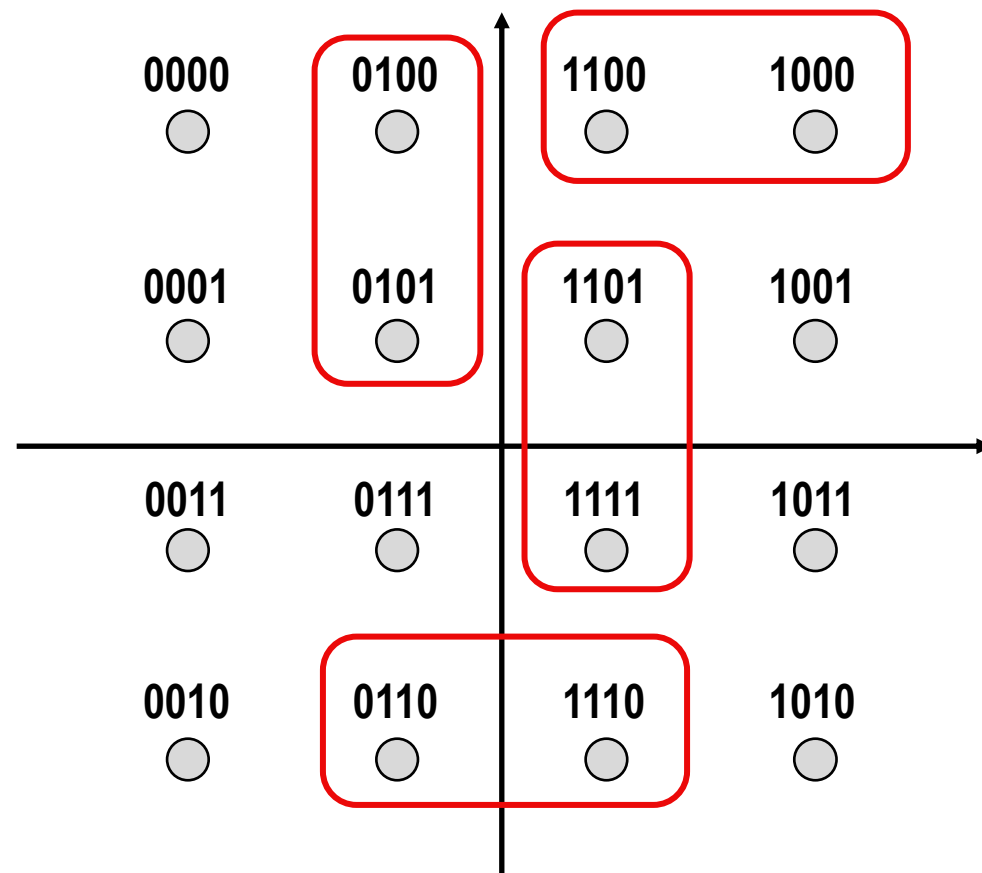


QAM-16的星座图

03 基本的带通调制方法和混合调制方法

混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选
- 可以调制出16种码元（波形），每种码元可以对应表示4个比特（ $\log_2 16=4$ ）
- 每个码元与4个比特的对应关系采用**格雷码**，即任意两个相邻码元只有1个比特不同



QAM-16的星座图

2.5 信道的极限容量

01

造成信号失真的主要因素

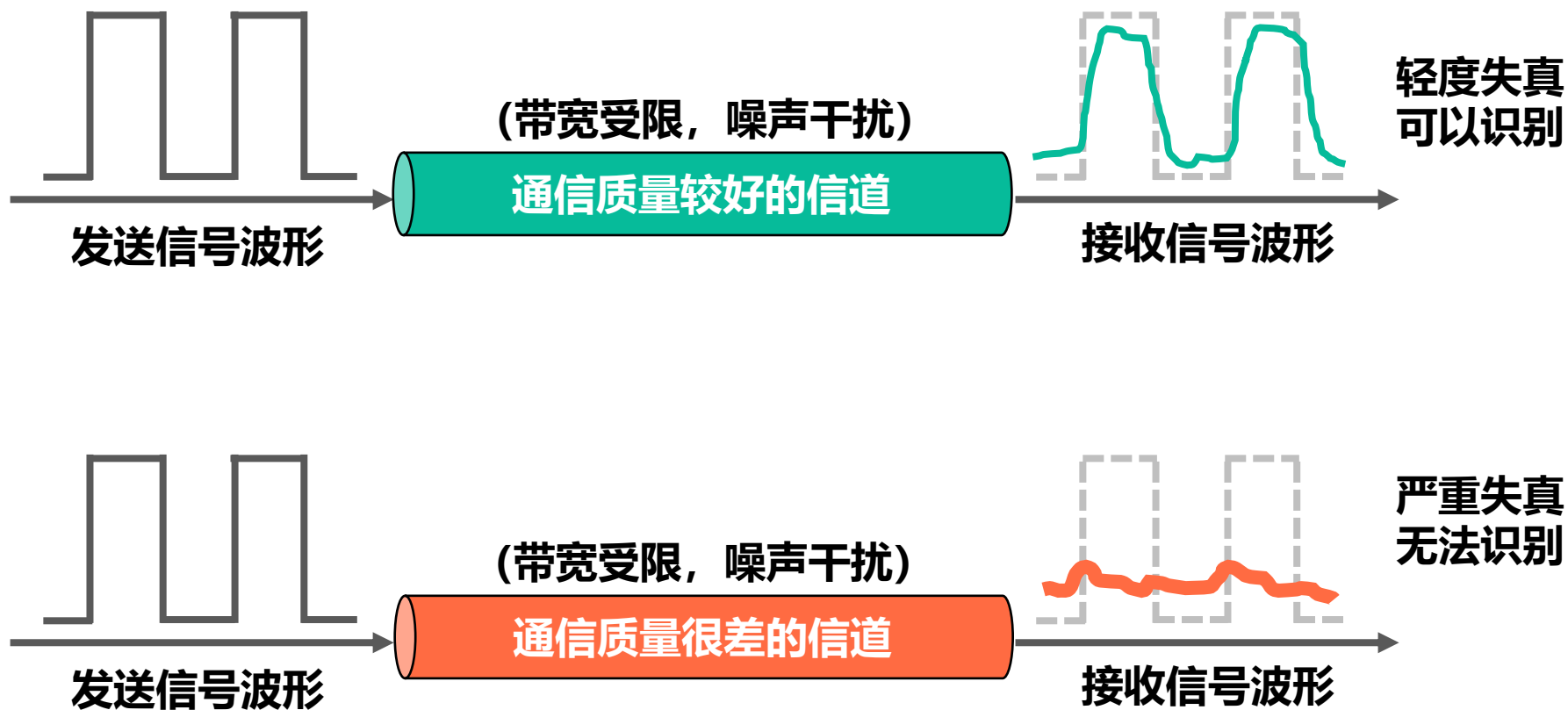
02

奈氏准则

03

香农公式

01 造成信号失真的主要因素



01 造成信号失真的主要因素

传输速率越高，信号经过传输后的失真就越严重。

码元的传输速率

传输距离越远，信号经过传输后的失真就越严重。

信号的传输距离

噪声干扰越大，信号经过传输后的失真就越严重。

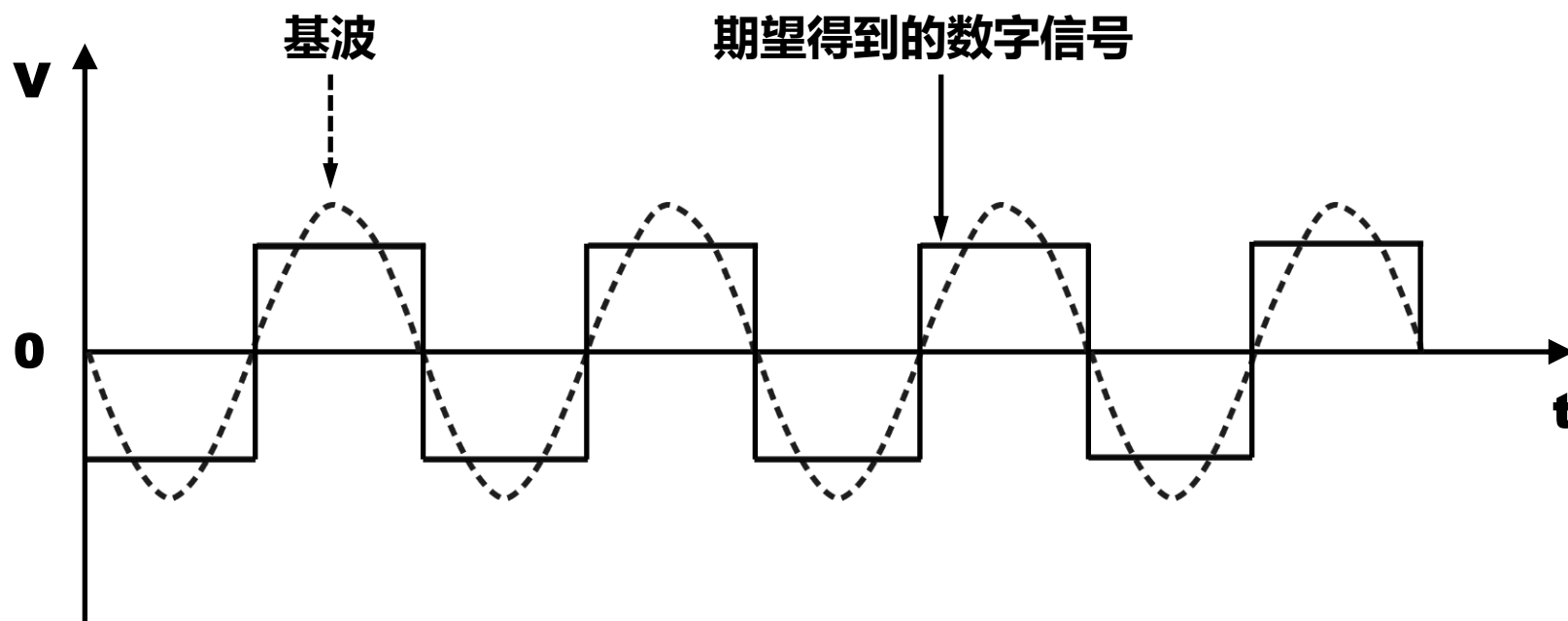
噪声干扰

传输媒体质量越差，信号经过传输后的失真就越严重。

传输媒体的质量

01 造成信号失真的主要因素

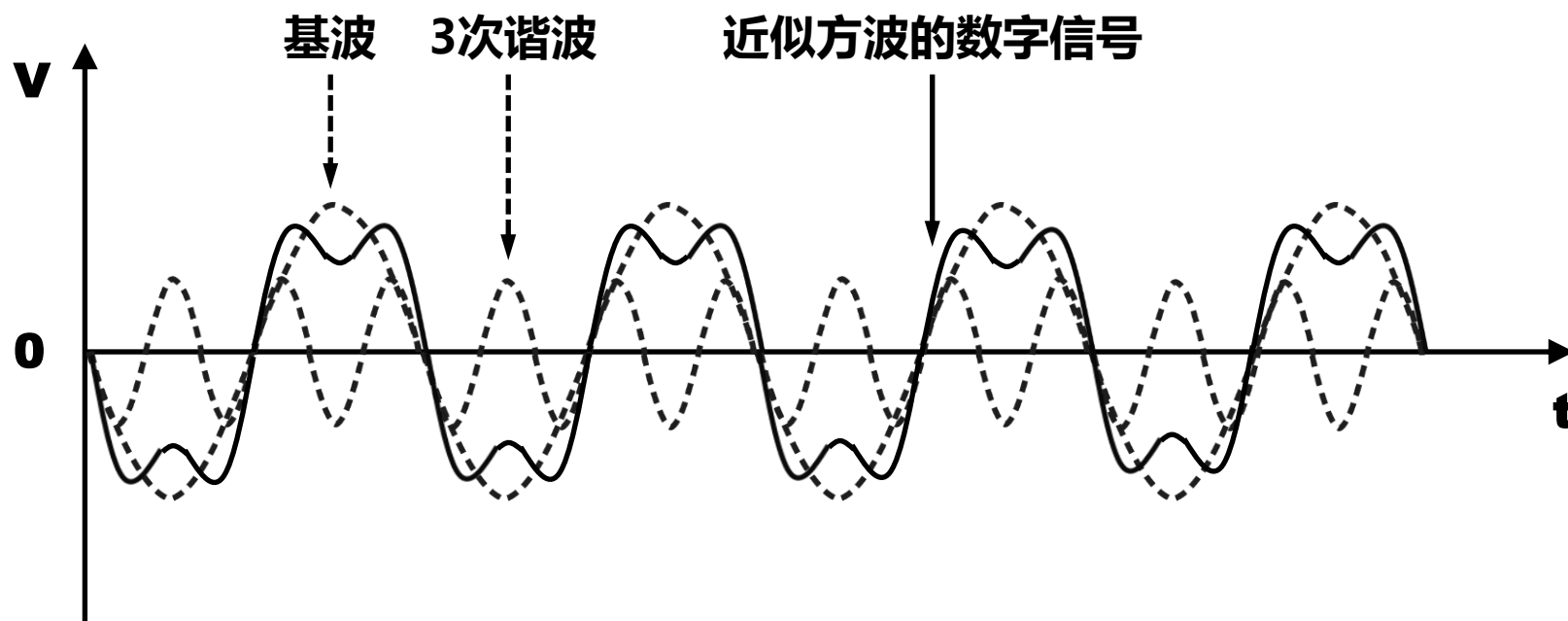
■ 信道上传输的**数字信号**，可以看做是**多个频率的模拟信号进行多次叠加后形成的方波**。



选择一个与数字信号频率相同的模拟信号作为基波

01 造成信号失真的主要因素

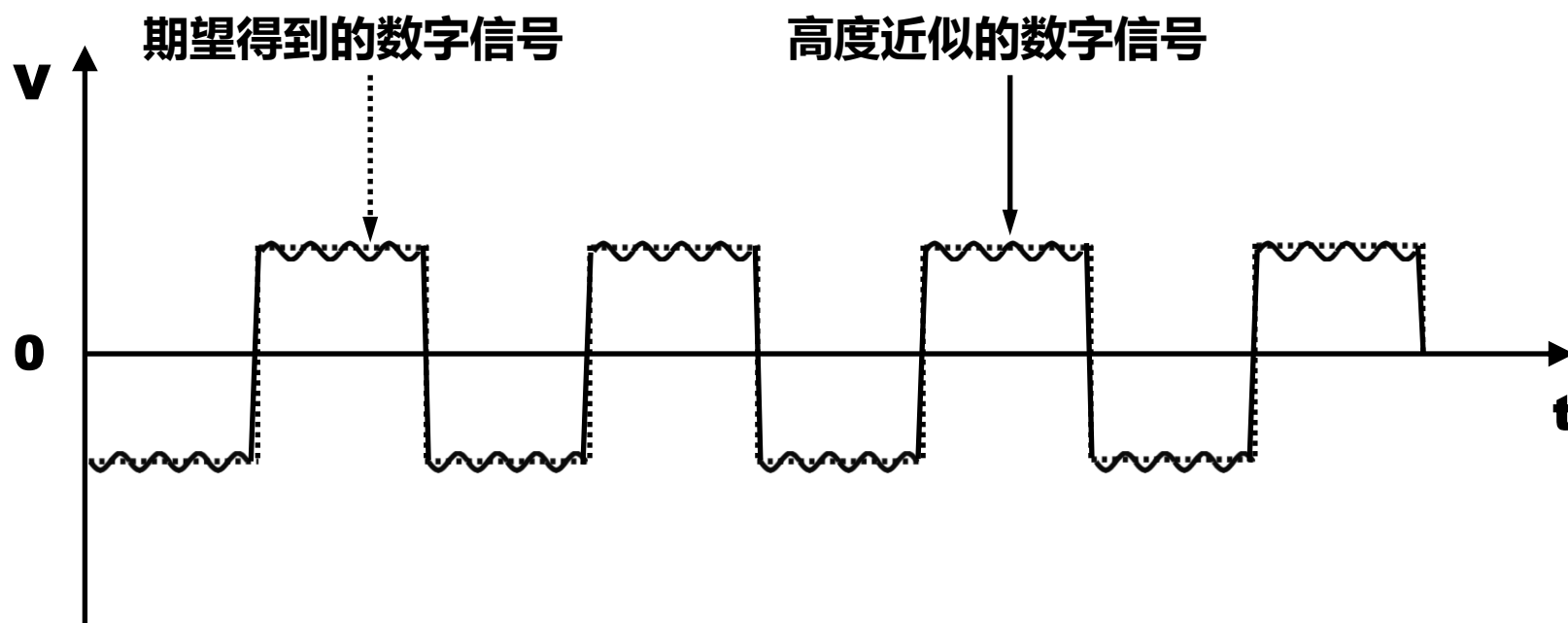
信道上传输的**数字信号**，可以看做是**多个频率的模拟信号进行多次叠加后形成的方波**。



基波与3次谐波叠加形成近似方波的数字信号

01 造成信号失真的主要因素

■ 信道上传输的**数字信号**，可以看做是**多个频率的模拟信号进行多次叠加后形成的方波**。



基波经过多次更高频率谐波的叠加形成高度接近数字信号的波形

01 造成信号失真的主要因素

- 信道上传输的**数字信号**，可以看做是**多个频率的模拟信号进行多次叠加后形成的方波**。
- 如果数字信号中的高频分量在传输时受到衰减甚至不能通过信道，则接收端接收到的波形前沿和后沿就变得不那么陡峭，每一个码元所占的时间界限也不再明确。这样，在接收端接收到的信号波形就失去了码元之间的清晰界限，这种现象称为**码间串扰**。
- 如果**信道的频带越宽**，则能够**通过的信号的高频分量就越多**，那么**码元的传输速率就可以更高**，而**不会导致码间串扰**。
- 然而，**信道的频率带宽是有上限的**，不可能无限大。因此，**码元的传输速率也有上限**。

02 奈氏准则

理想低通信道的最高码元传输速率 = $2W$ Baud = $2W$ 码元/秒

W: 信道的频率带宽 (单位为Hz)

Baud: 波特, 即码元/秒



奈奎斯特 (1889-1976)

■ 使用奈氏准则给出的公式, 就可以根据信道的频率带宽, 计算出信道的最高码元传输速率。

■ 只要码元传输速率不超过根据奈氏准则计算出的上限, 就可以避免码间串扰。

■ 奈氏准则给出的是理想低通信道的最高码元传输速率, 它和实际信道有较大的差别。因此, 一个实际的信道所能传输的最高码元传输速率, 要明显低于奈氏准则给出的上限值。

02 奈氏准则

■ 码元传输速率又称为波特率、调制速率、波形速率或符号速率。

■ 波特率与比特率有一定的关系：

□ 当1个码元只携带1比特的信息量时，波特率（码元/秒）与比特率（比特/秒）在数值上是相等的。

□ 当1个码元携带n比特的信息量时，波特率（码元/秒）转换成比特率（比特/秒）时，数值要乘以n。

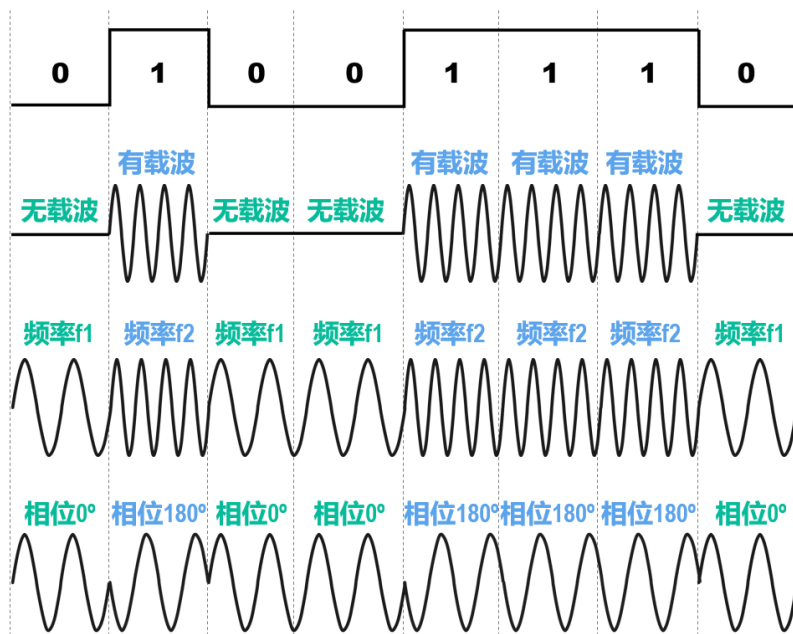
基本调制方法

数字基带信号

调幅 (AM)

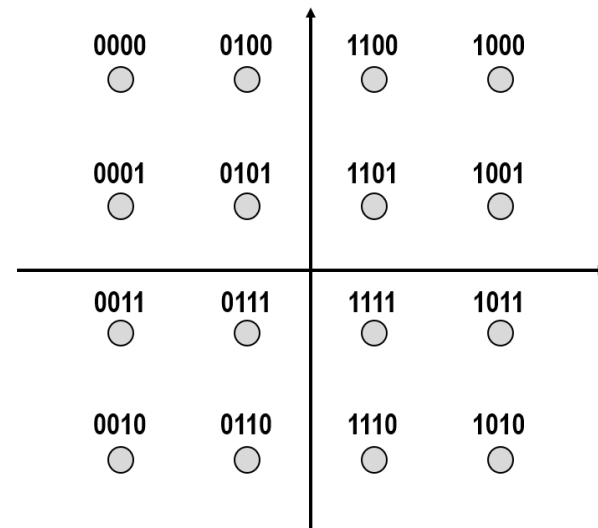
调频 (FM)

调相 (PM)



混合调制方法举例——正交振幅调制QAM-16

- 12种相位
- 每种相位有1或2种振幅可选
- 可以调制出16种码元（波形），每种码元可以对应表示4个比特 ($\log_2 16=4$)
- 每个码元与4个比特的对应关系采用**格雷码**，即任意两个相邻码元只有1个比特不同



QAM-16的星座图

02 奈氏准则



尽管奈氏准则限制了最高码元传输速率，但是只要采用技术更为复杂的信号调制方法，让码元可以携带更多的比特，岂不是可以无限制地提高信息的传输速率吗？

回答是否定的。因为在实际的信道中会有噪声，噪声是随机产生的，其瞬时值有时会很大，这会影
响接收端对码元的识别，并且噪声功率相对于信号功率越大，影响就越大。



03 香农公式

带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的极限信息传输速率

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

C: 信道的极限信息传输速率（单位为**b/s**）

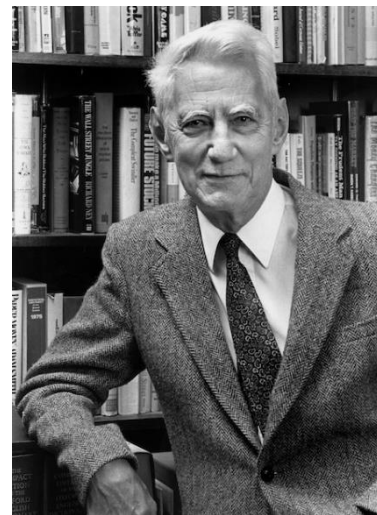
W: 信道的频率带宽（单位为**Hz**）

S: 信道内所传信号的平均功率

N: 信道内的高斯噪声功率

S/N: 信噪比，使用分贝（**dB**）作为度量单位

$$\text{信噪比 (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) \text{ (dB)}$$

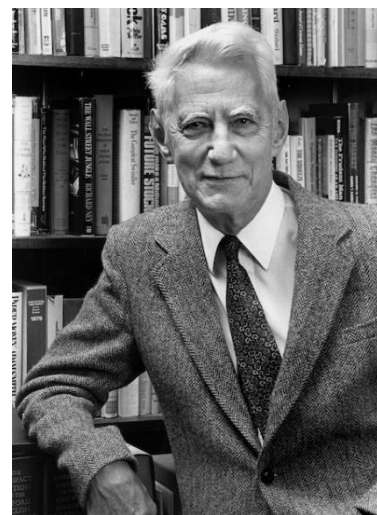


香农（1916-2001）

03 香农公式

带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的极限信息传输速率

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$



香农 (1916-2001)

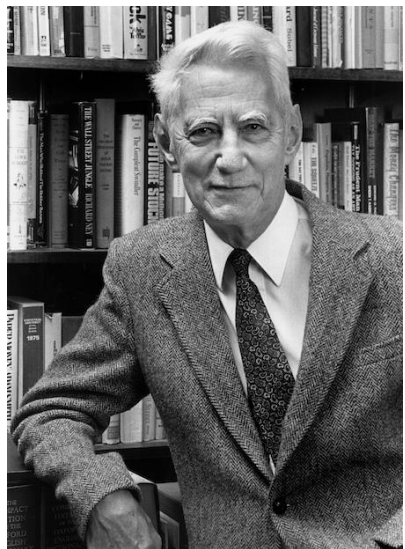
- 信道的频率带宽W或信道中的信噪比S/N越大，信道的极限信息传输速率C就越高。
- 实际信道不可能无限制地提高频率带宽W或信道中的信噪比S/N。
- 实际信道中能够达到的信息传输速率，要比香农公式给出的极限传输速率低不少。这是因为在实际信道中，信号还要受到其他一些损伤，例如各种脉冲干扰和信号衰减等，这些因素在香农公式中并未考虑。



奈奎斯特 (1889-1976)

理想低通信道的最高码元传输速率

$$= 2W \text{ Baud} = 2W \text{ 码元/秒}$$



香农 (1916-2001)

**带宽受限且有高斯白噪声干扰的
信道的极限信息传输速率**

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) (b/s)$$

在信道的频率带宽W一定的情况下，根据奈氏准则和香农公式，要想**提高信息的传输速率**，就必须采用**多元制**（更复杂的调制技术），并努力**提高信道中的信噪比**。

自从香农公式发表后，各种**新的信号处理和调制方法**就不断出现，其目的都是为了使码元可以携带更多个比特，进而可以尽可能地**接近香农公式给出的传输速率极限**。

奈氏准则

理想低通信道的最高码元传输速率为
 $2W$ 码元/秒

香农公式

带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的
极限信息传输速率 $C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) (b/s)$

【2009年 题34】在无噪声情况下，若某通信链路的带宽为3kHz，采用4个相位，每个相位具有4种振幅的QAM调制技术，则该通信链路的最大数据传输速率是（**B**）。

A. 12kbps

B. 24kbps

C. 48kbps

D. 96kbps

解析

1. 根据奈氏准则，该通信链路的最高码元传输速率 = $2 \times 3k = 6k$ （码元/秒）
2. 采用4个相位，每个相位4种振幅的QAM调制技术，可以调制出 $4 \times 4 = 16$ 个不同的基本波形（码元）
采用二进制对这16个不同的码元进行编码，需要使用4个比特（ $\log_2 16 = 4$ ）。
即每个码元可以携带的信息量为4个比特。

综合1和2可知，该通信链路的最大数据传输速率 = $6k$ （码元/秒） $\times 4$ （比特/码元）= $24k$ （比特/秒）= 24kbps

奈氏准则

理想低通信道的最高码元传输速率为
 $2W$ 码元/秒

香农公式

带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的
极限信息传输速率 $C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) (b/s)$

【2011年 题34】若某通信链路的数据传输速率为2400bps，采用4相位调制，则该链路的波特率是（**B**）。

A. 600波特

B. 1200波特

C. 4800波特

D. 9600波特

解析

1. 采用4相位调制，可以调制出4个相位不同的基本波形（码元）。
采用二进制对这4个不同的码元进行编码，需要使用2个比特（ $\log_2 4 = 2$ ）。
即每个码元可以携带的信息量为2个比特。
2. 数据的传输速率 = 波特率（码元传输速率）× 每个码元所携带的信息量
 $2400 \text{ (比特/秒)} = \text{波特率} \times 2 \text{ (比特/码元)}$
 $\text{波特率} = 1200 \text{ (码元/秒)} = 1200 \text{ 波特}$

奈氏准则

理想低通信道的最高码元传输速率为
 $2W$ 码元/秒

香农公式

带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的
极限信息传输速率 $C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) (b/s)$

【2014年 题35】下列因素中，不会影响信道数据传输速率的是（**D**）。

解析

A. 信噪比

B. 频率带宽

从香农公式可知
信噪比和频率带宽都会影响
信道数据传输速率

C. 调制速度

从奈氏准则可知
调制速度（码元传输速度）
会影响信道数据传输速率

D. 信号传播速度

不影响
信道数据传输速率

自由空间: $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$
铜 线: $2.3 \times 10^8 \text{ m/s}$
光 纤: $2.0 \times 10^8 \text{ m/s}$

奈氏准则

理想低通信道的**最高码元传输速率**为
 $2W$ 码元/秒

香农公式

带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的
极限信息传输速率 $C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) (b/s)$

【2016年 题34】若某链路的频率带宽为8kHz，信噪比为30dB，该链路实际数据传输速率约为理论最大数据传输速率的50%，则该链路的实际数据传输速率约是（**C**）。

A. 8kbps

B. 20kbps

C. 40kbps

D. 80kbps

解析

根据香农公式可计算出理论最大数据传输速率 $C = 8k \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$

$$30(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) (dB) \quad \text{解得 } \frac{S}{N} = 1000 \quad \text{代入上式}$$

$$C = 8k \cdot \log_2(1 + 1000) \approx 8k \cdot \log_2(2^{10}) = 80kbps$$

该链路的实际数据传输速率约为 $C \times 50\% = 80kbps \times 50\% = 40kbps$

奈氏准则

理想低通信道的最高码元传输速率为
 $2W$ 码元/秒

香农公式

带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的
极限信息传输速率 $C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) (b/s)$

【2017年 题34】若信道在无噪声情况下的极限数据传输速率不小于信噪比为30dB条件下的极限数据传输速率，则信号的状态数至少是（**D**）。

A. 4

B. 8

C. 16

D. 32

解析

设信号状态数（可调制出的不同基本波形或码元数量）为 X

则每个码元可携带的比特数量为 $\log_2 X$

信道在无噪声情况下的极限数据传输速率（用奈氏准则计算）= $2W$ （码元/秒）= $2W \log_2 X$ （比特/秒）

30dB信噪比条件下的极限数据传输速率（用香农公式计算）= $W \log_2 (1+1000)$ （比特/秒）

根据题意列出不等式 $2W \log_2 X \geq W \log_2 (1+1000)$ 解得 $X \geq 32$

2.6 信道复用技术

01

信道复用技术的基本原理

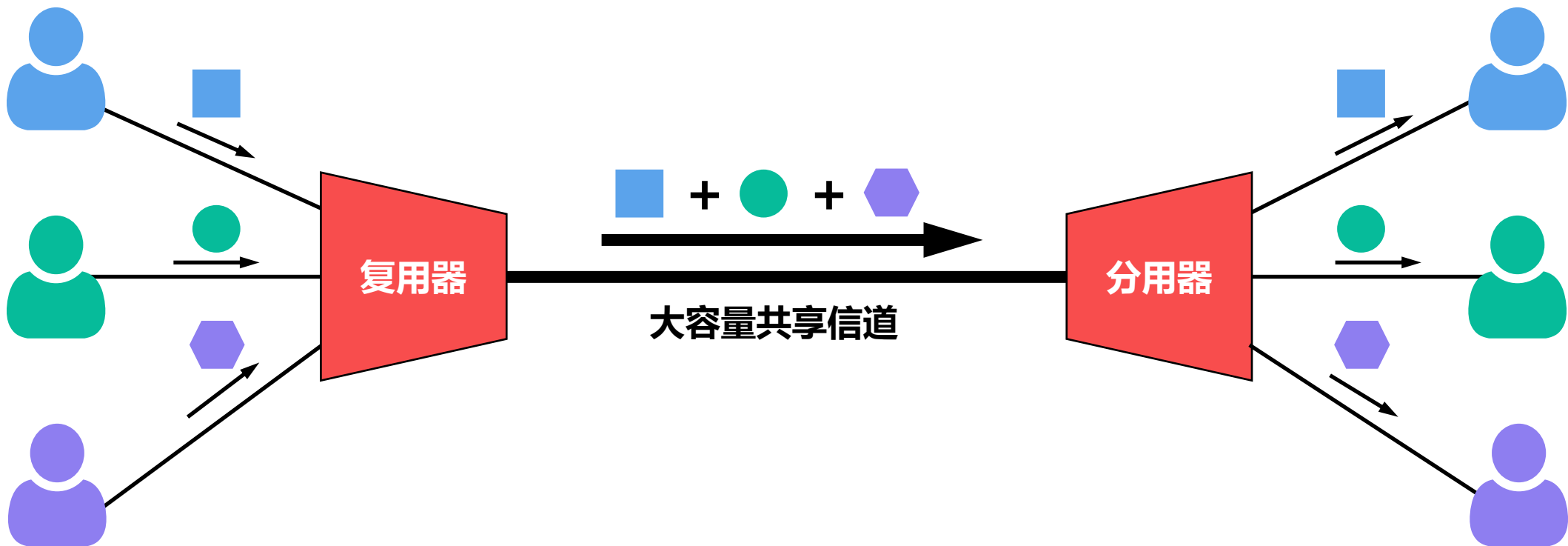
02

常见的信道复用技术

01 信道复用技术的基本原理

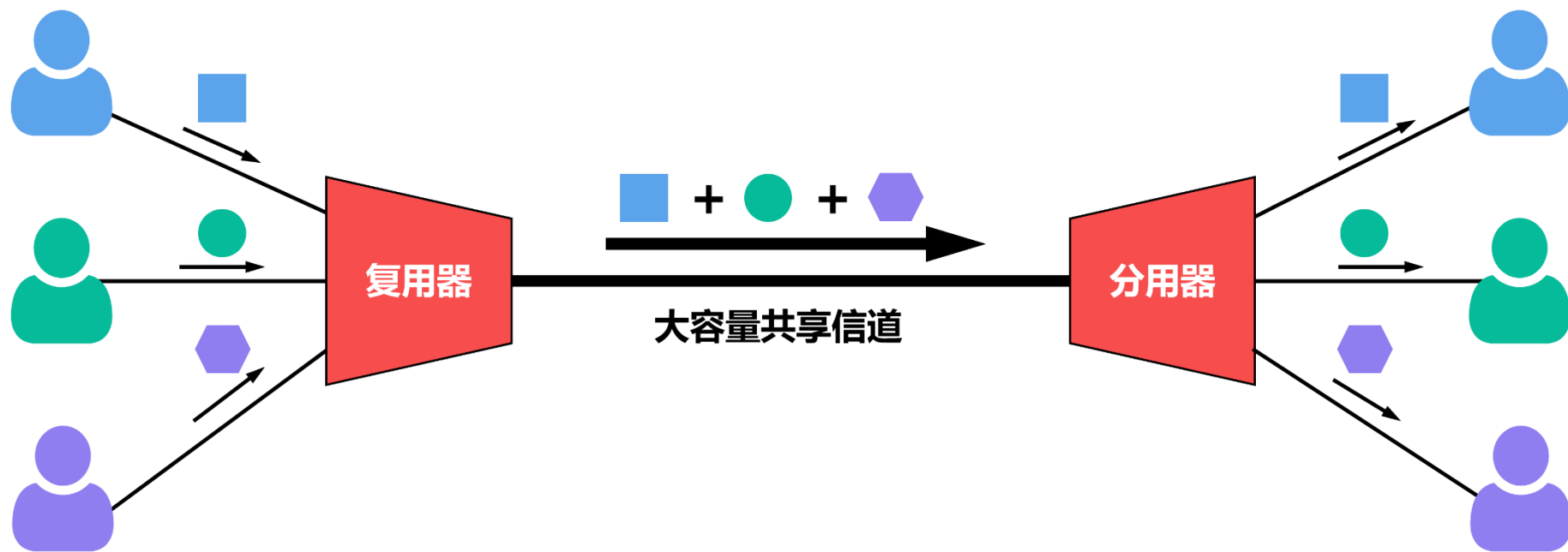
■ 复用（Multiplexing）就是在**一条传输媒体上同时传输多路用户的信号**。

■ 当一条传输媒体的传输容量大于多条信道传输的总容量时，就可以通过复用技术，在这条传输媒体上建立多条通信信道，以便**充分利用传输媒体的带宽**。

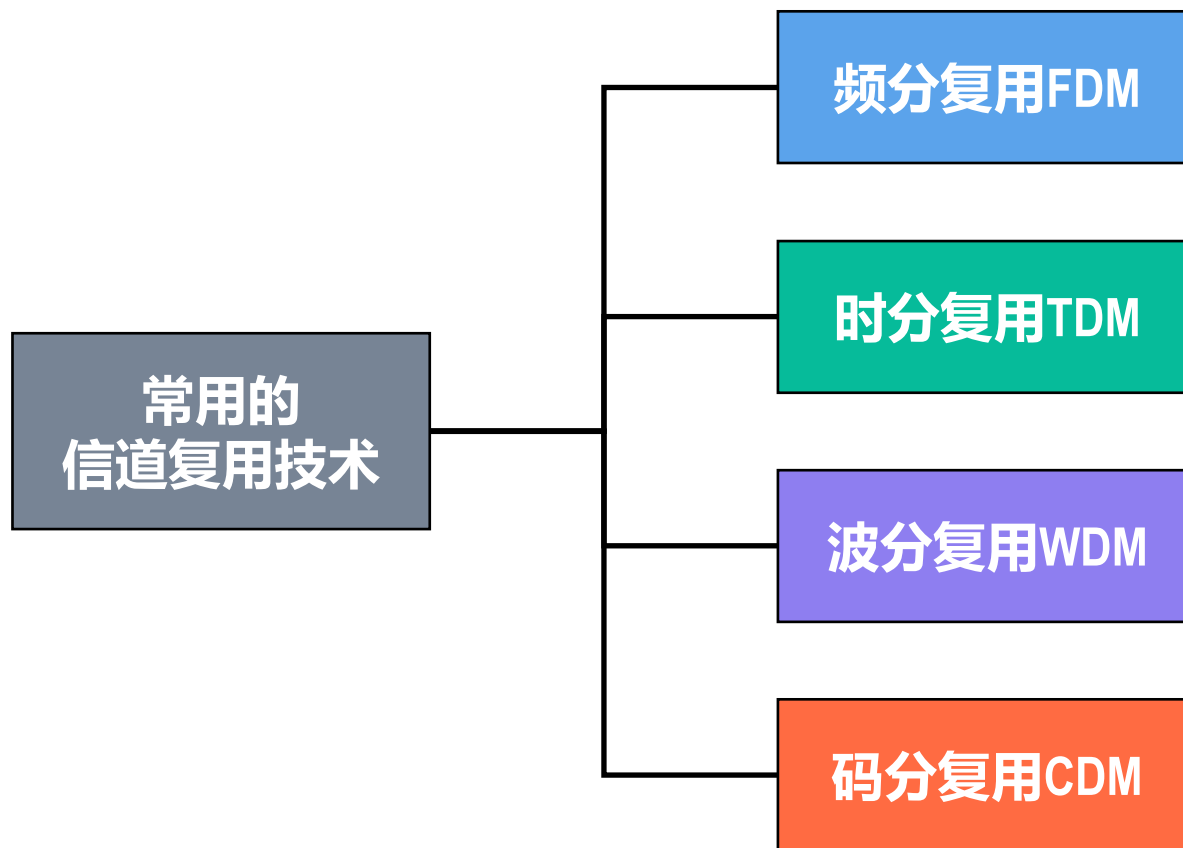


01 信道复用技术的基本原理

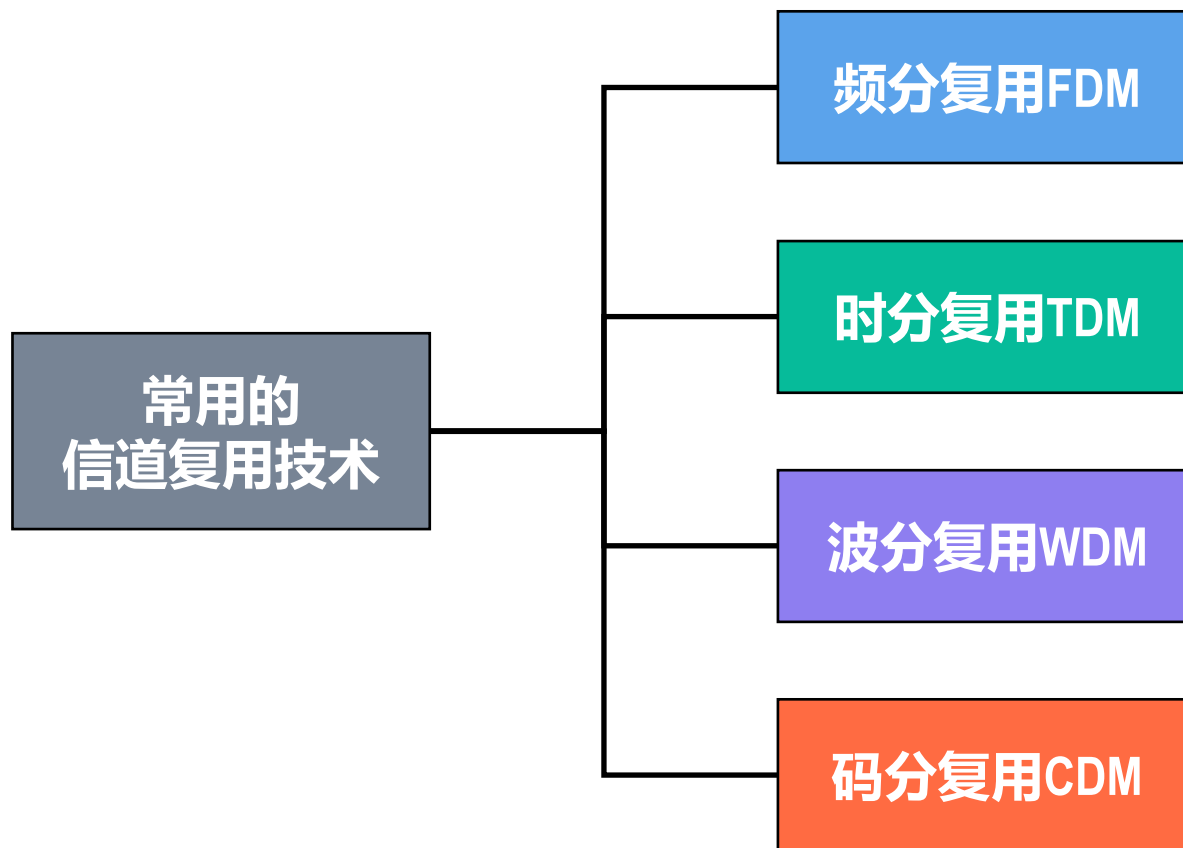
- 复用（Multiplexing）就是在**一条传输媒体上同时传输多路用户的信号**。
- 当一条传输媒体的传输容量大于多条信道传输的总容量时，就可以通过复用技术，在这条传输媒体上建立多条通信信道，以便**充分利用传输媒体的带宽**。
- 尽管实现信道复用会增加通信成本（需要复用器、分用器以及费用较高的大容量共享信道），但如果**复用的信道数量较大，还是比较划算的**。



02 常见的信道复用技术



02 常见的信道复用技术



02 常见的信道复用技术

频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM



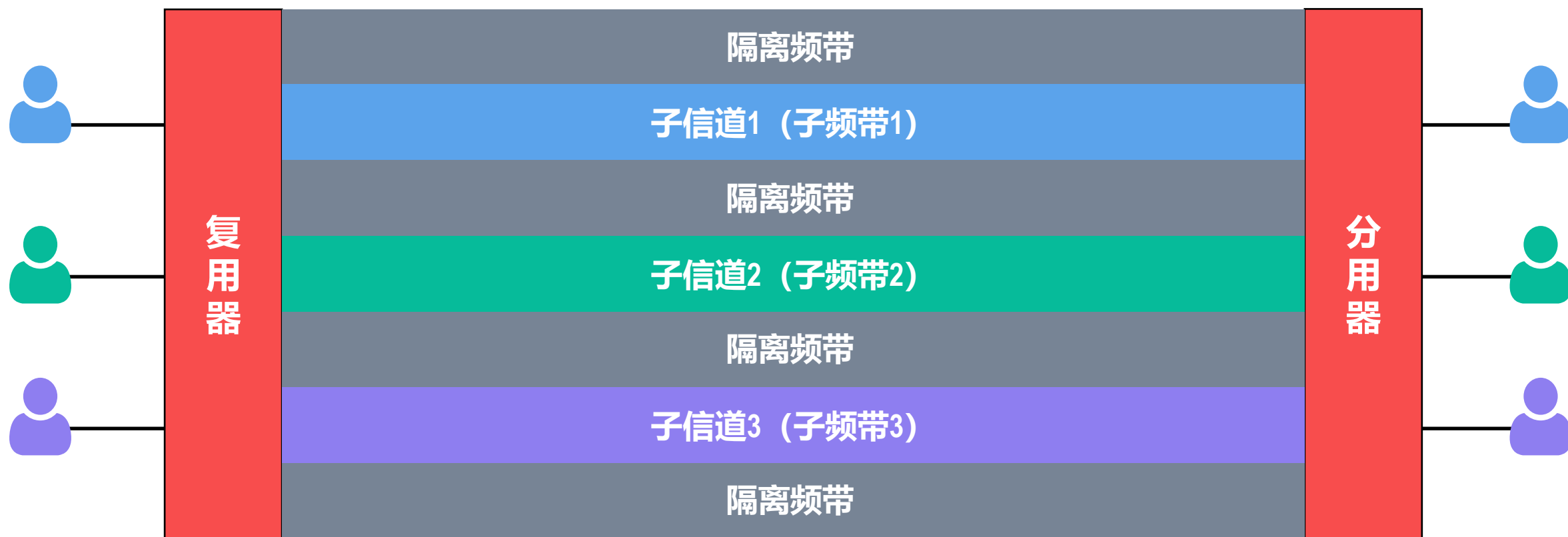
02 常见的信道复用技术

频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM



02 常见的信道复用技术

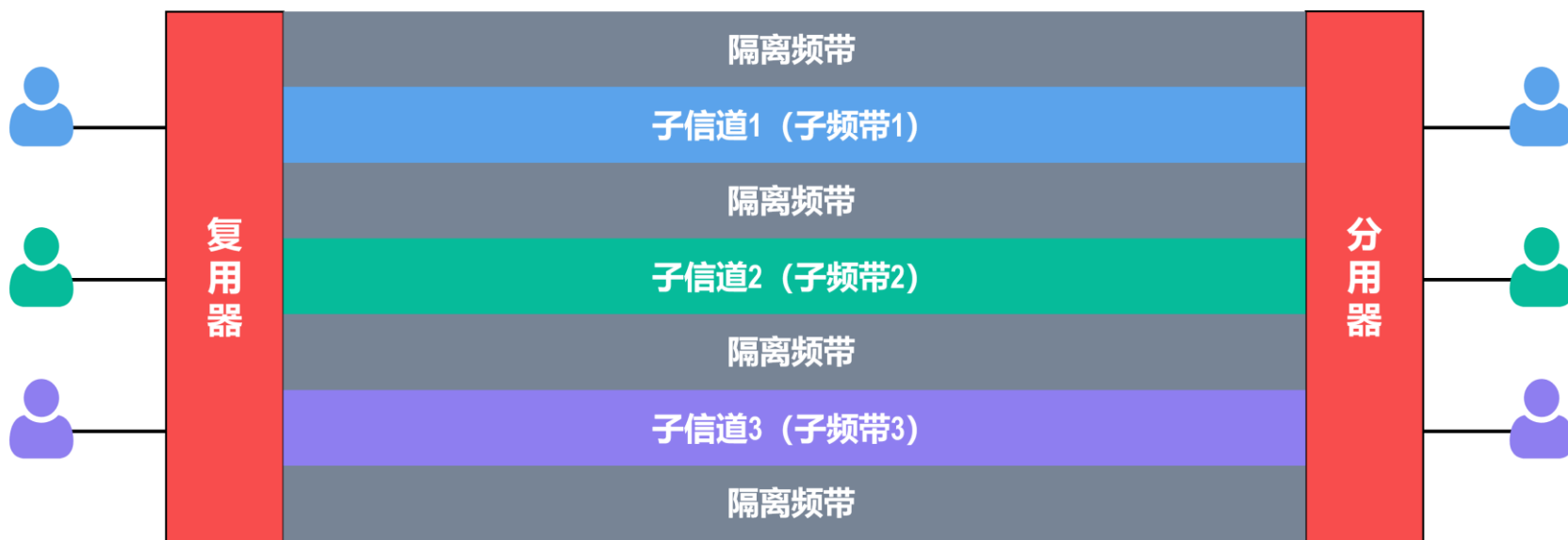
频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

频分复用的所有用户**同时**占用不同的频带资源并行通信



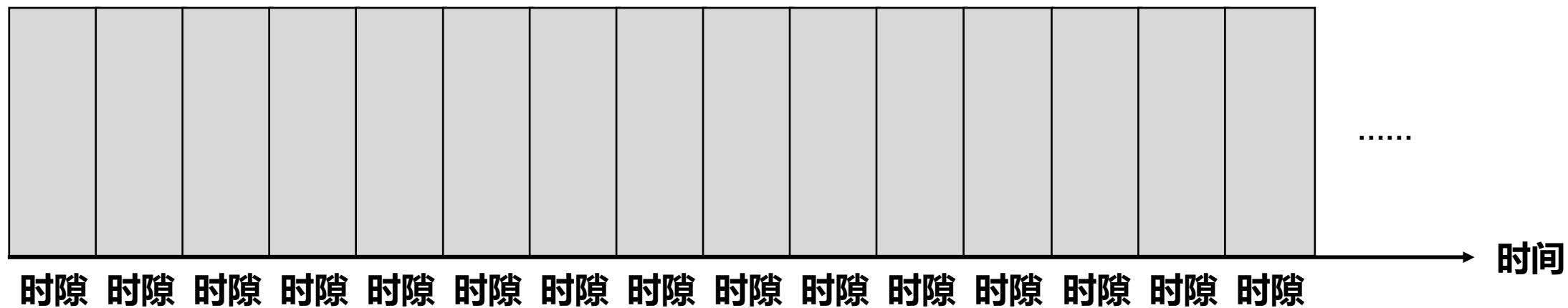
02 常见的信道复用技术

频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM



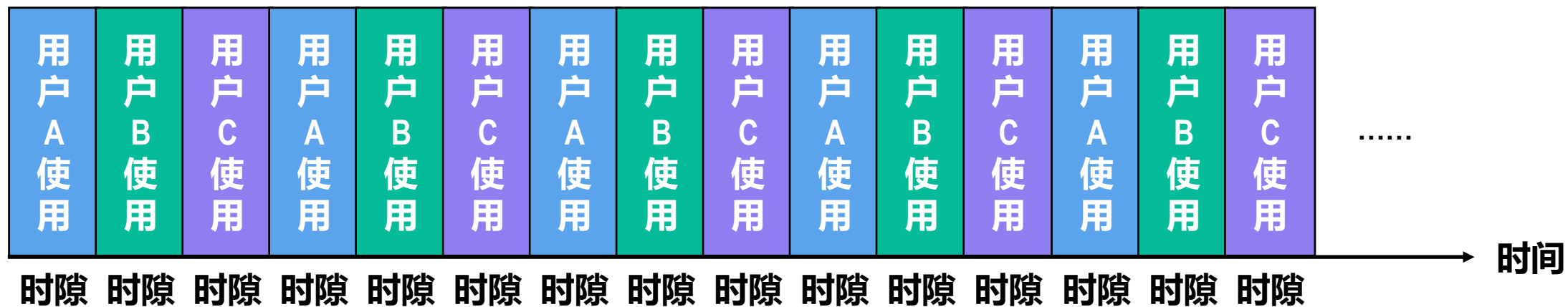
02 常见的信道复用技术

频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM



02 常见的信道复用技术

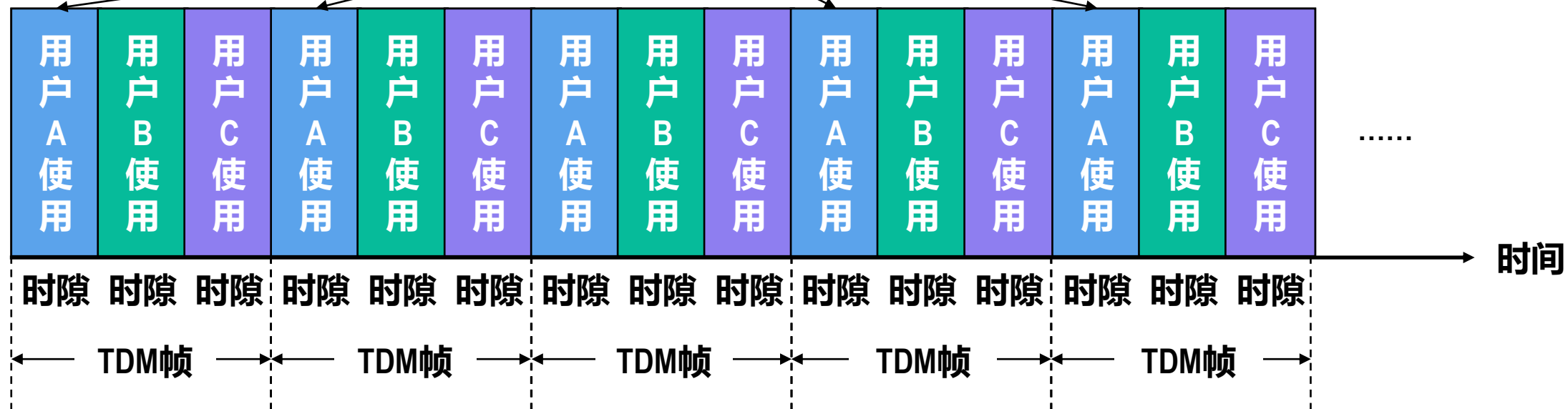
频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

各用户时隙周期性出现
周期为TDM帧的长度



02 常见的信道复用技术

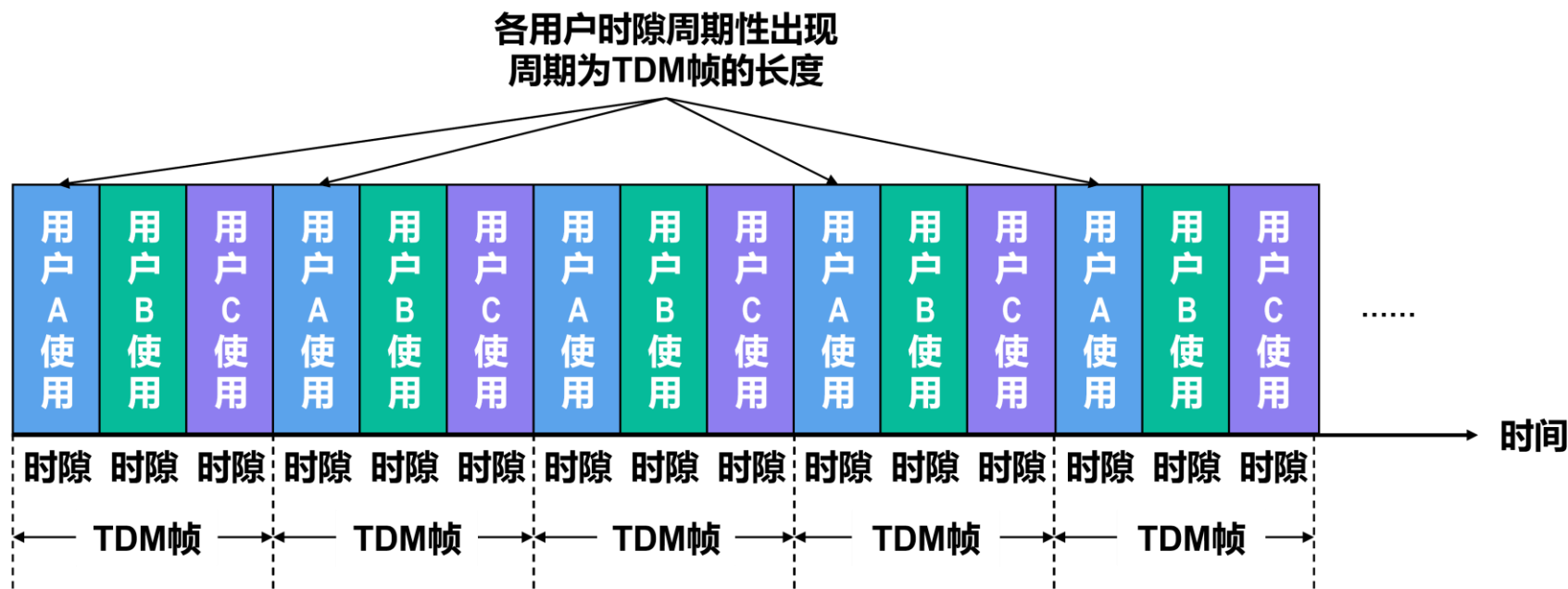
频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

时分复用的所有用户**在不同的时间占用同样的频带**



02 常见的信道复用技术



■ 根据频分复用的设计思想，可在一根光纤上**同时传输多个频率（波长）相近的光载波信号**，实现基于光纤的频分复用技术。

■ 目前可以在一根光纤上复用80路或更多路的光载波信号。因此，这种复用技术也称为**密集波分复用DWDM**。

02 常见的信道复用技术

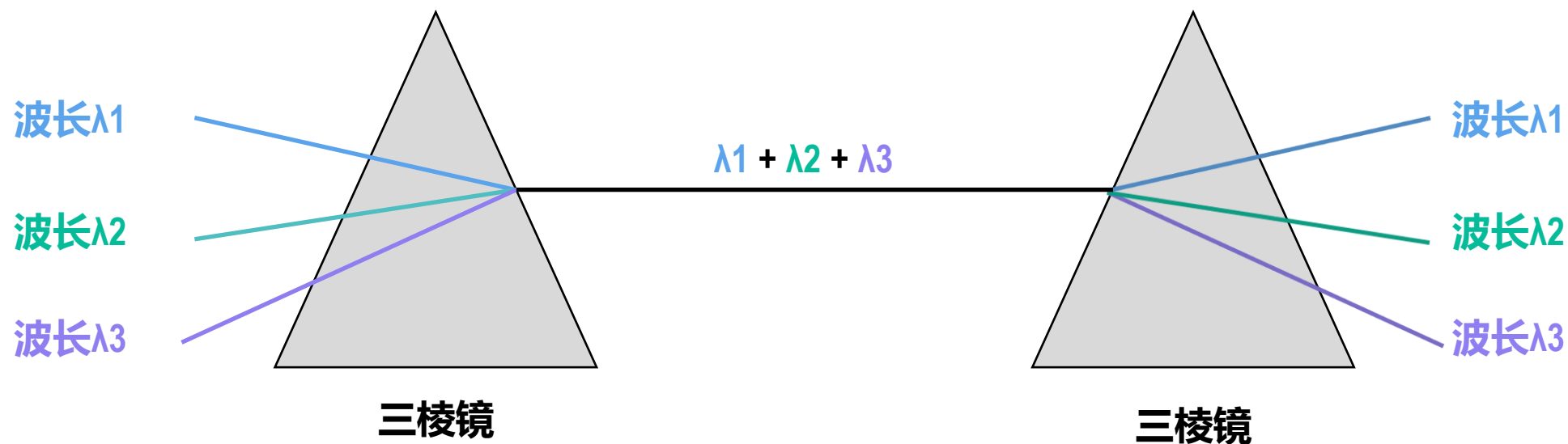
频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

光的频分复用FDM



02 常见的信道复用技术

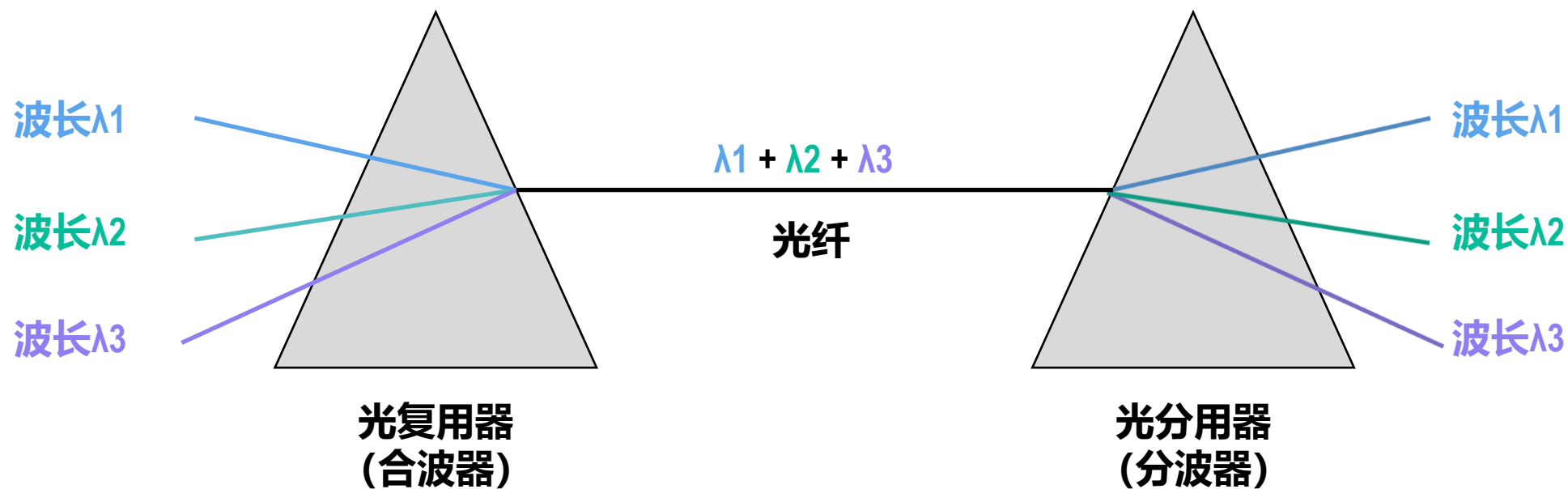
频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

光的频分复用FDM



02 常见的信道复用技术



■ 根据频分复用的设计思想，可在一根光纤上**同时传输多个频率（波长）相近的光载波信号**，实现基于光纤的频分复用技术。

■ 目前可以在一根光纤上复用80路或更多路的光载波信号。因此，这种复用技术也称为**密集波分复用DWDM**。

■ 铺设光缆的工程耗资巨大，应尽量在一根光缆中放入尽可能多的光纤，然后对每一根光纤使用密集波分复用技术。

例如，在一根光缆中放入100根速率为2.5Gb/s的光纤，对每根光纤采用40倍的密集波分复用，则这根光缆的总数据速率为 $(2.5\text{Gb/s} \times 40) \times 100 = 10000\text{Gb/s} = 10\text{Tb/s}$ 。

02 常见的信道复用技术

频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

- 码分复用（Code Division Multiplexing, CDM）常称为码分多址（Code Division Multiple Access, CDMA），它是在扩频通信技术的基础上发展起来的一种无线通信技术。
- 与FDM和TDM不同，CDMA的每个用户可以在相同的时间使用相同的频带进行通信。
- CDMA最初用于军事通信，这种系统发送的信号有很强的抗干扰能力，其频谱类似于白噪声，不易被敌人发现。
- 随着技术的进步，CDMA设备的价格和体积都大幅度下降，因而现在已广泛用于民用的移动通信中。

02 常见的信道复用技术

频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

- CDMA将每个比特时间划分为m个更短的时间片，称为**码片**（Chip）。m的取值通常为64或128。为了简单起见，在后续的举例中，我们假设m的取值为8。
- CDMA中的每个站点都被指派一个唯一的**m比特码片序列**（Chip Sequence）。
 - ☐ 某个站要发送**比特1**，则发送它自己的**m比特码片序列**；
 - ☐ 某个站要发送**比特0**，则发送它自己的**m比特码片序列的反码**。

【举例】

假设给某个站指派的8比特码片序列为01011001

该站发送比特1：发送自己的8比特码片序列01011001

该站发送比特0：发送自己的8比特码片序列01011001的反码10100110

将码片序列中的比特0记为-1，而比特1记为+1，可写出码片序列相应的**码片向量**。

在本例中，该站的码片向量为 $(-1 +1 -1 +1 +1 -1 -1 +1)$ 。

02 常见的信道复用技术

频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

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。

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

02 常见的信道复用技术

频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

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

【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：

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

02 常见的信道复用技术

频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

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

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

$$A \cdot A = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m A_i A_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m A_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\pm 1)^2 = 1$$

$$A \cdot \overline{A} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m A_i \overline{A}_i = -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m A_i A_i = -1$$

02 常见的信道复用技术

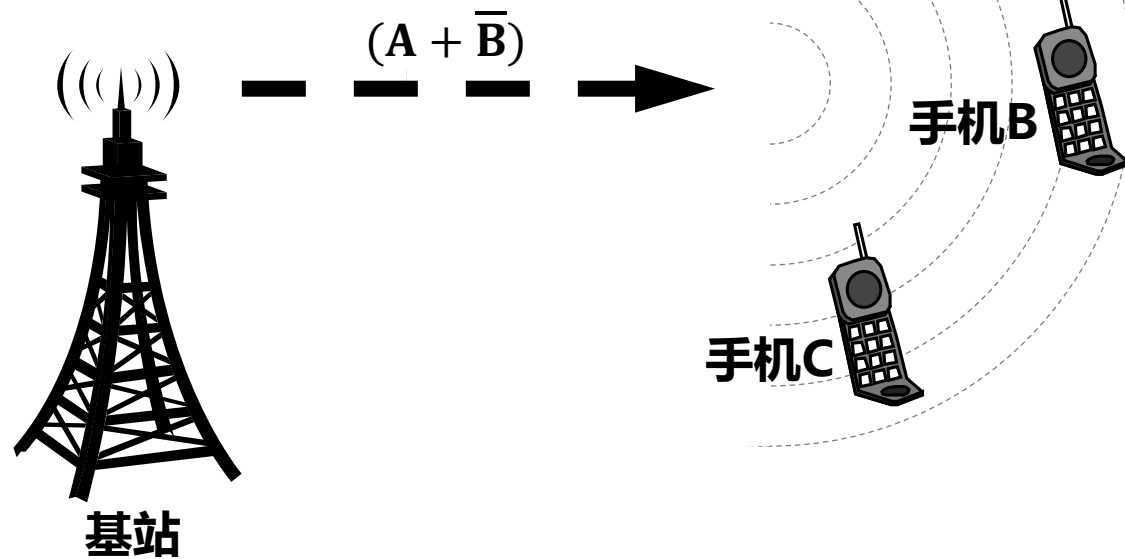
频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

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



02 常见的信道复用技术

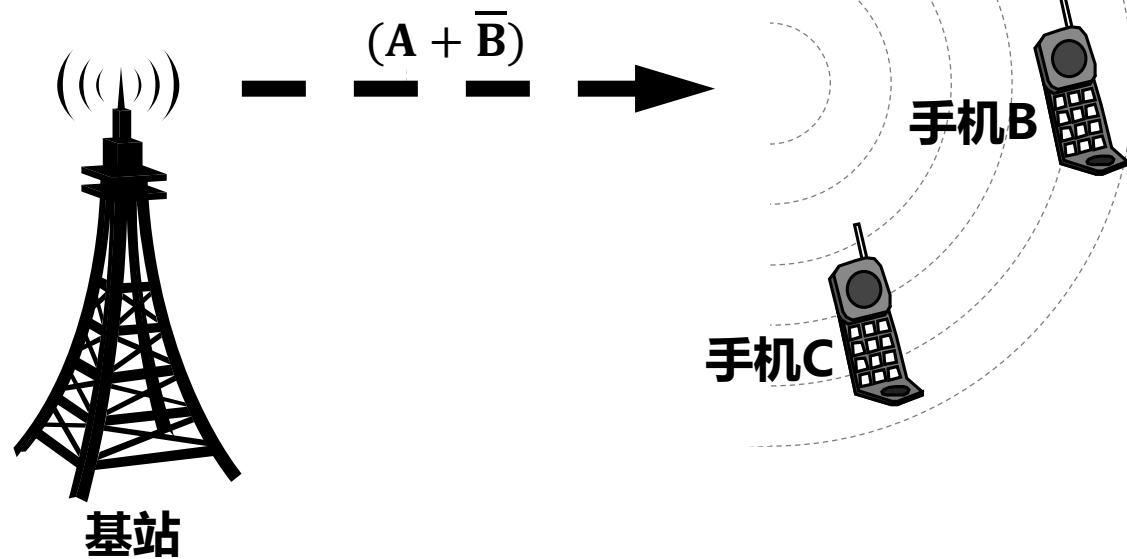
频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

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**

02 常见的信道复用技术

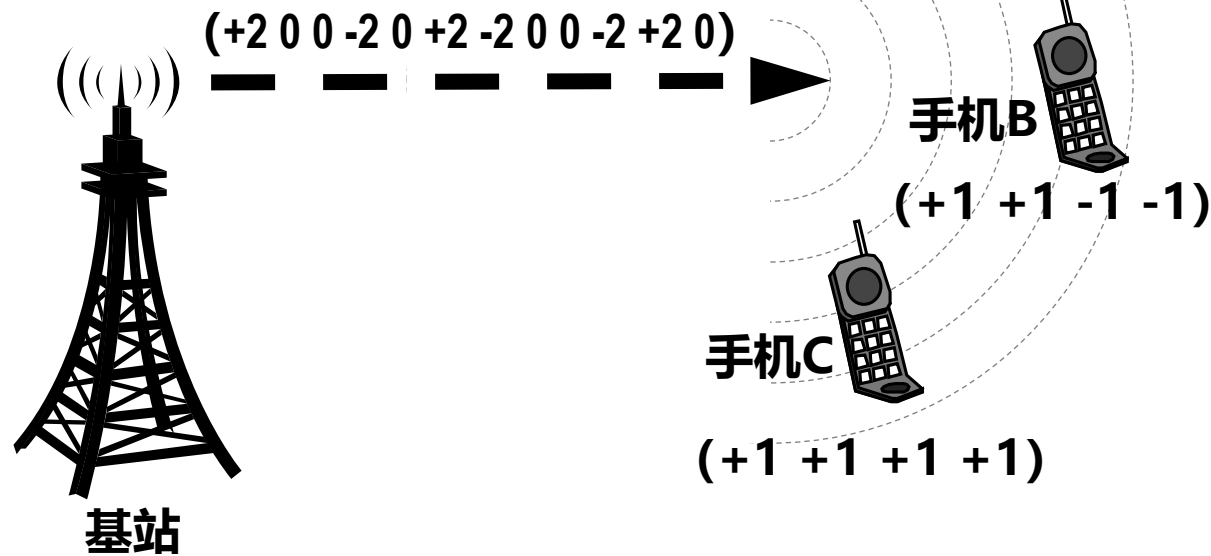
频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

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



A发送数据

相应的码片向量

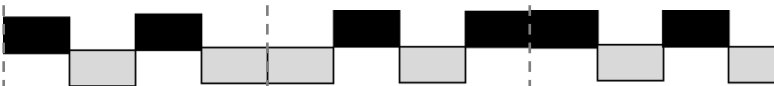
相应的信号

1

0

1

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



B发送数据

相应的码片向量

相应的信号

1

1

0

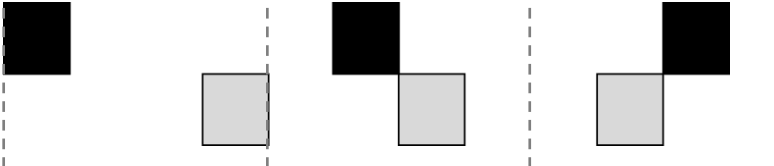
+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----



基站发送叠加向量

相应的信号

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



02 常见的信道复用技术

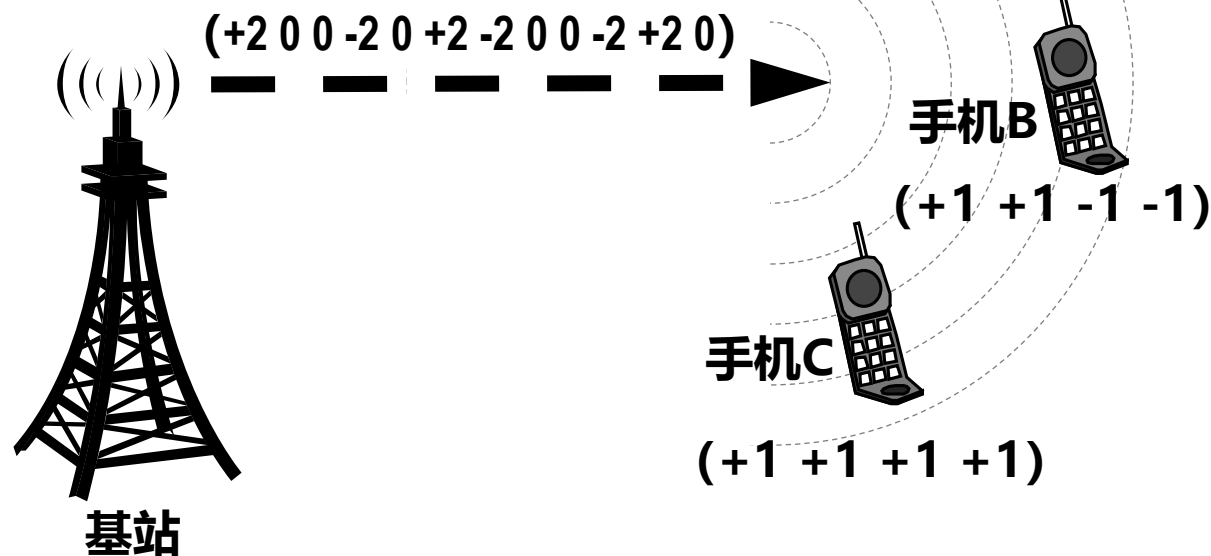
频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

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



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。

02 常见的信道复用技术

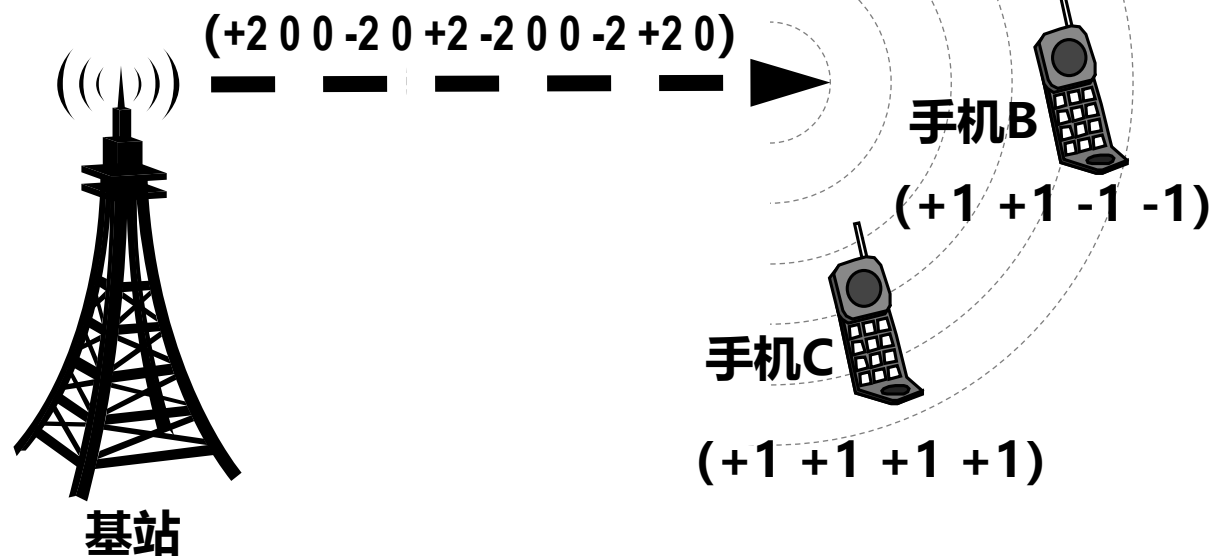
频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

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



手机B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B收到基站发来的数据是比特串110。

02 常见的信道复用技术

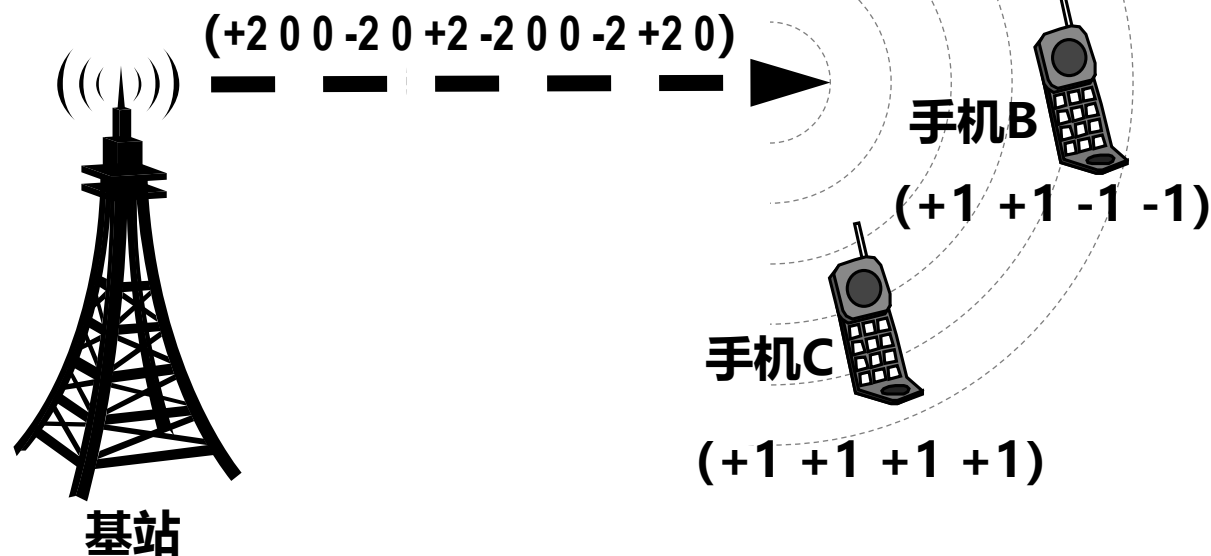
频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

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



手机C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：

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

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

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

根据运算结果可知，基站没有给手机C发送数据。

02 常见的信道复用技术

频分复用FDM

时分复用TDM

波分复用WDM

码分复用CDM

【2014年 题37】站点A、B、C通过CDMA共享链路，A、B、C的码片序列分别是(1,1,1,1)、(1,-1,1,-1)和(1,1,-1,-1)。若C从链路上收到的序列是(2,0,2,0,0,-2,0,-2,0,2,0,2)，则C收到A发送的数据是（**B**）。

A. 000

B. 101

C. 110

D. 111

解析

由于题目所给各站的码片序列为4比特，因此将站点C收到的序列分成三部分，每部分也由4比特组成：

(2, 0, 2, 0, 0, -2, 0, -2, 0, 2, 0, 2) \longrightarrow (2, 0, 2, 0) (0, -2, 0, -2) (0, 2, 0, 2)

将站点A的码片序列 (1, 1, 1, 1) 分别与上述三个部分进行规格化内积运算，根据结果可判断A发送的数据

$(1, 1, 1, 1) \cdot (2, 0, 2, 0) = (1 \times 2 + 1 \times 0 + 1 \times 2 + 1 \times 0) \div 4 = 1$ 发送的是比特1

$(1, 1, 1, 1) \cdot (0, -2, 0, -2) = (1 \times 0 + 1 \times (-2) + 1 \times 0 + 1 \times (-2)) \div 4 = -1$ 发送的是比特0

$(1, 1, 1, 1) \cdot (0, 2, 0, 2) = (1 \times 0 + 1 \times 2 + 1 \times 0 + 1 \times 2) \div 4 = 1$ 发送的是比特1