



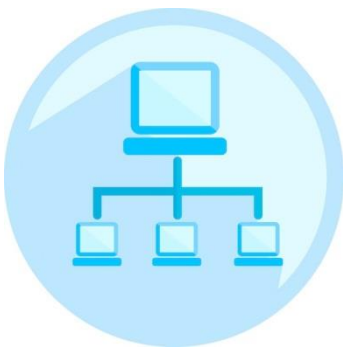
计算机网络



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)





Q1: 物理层是干什么的?

- 物理层考虑的是怎样才能在连接各种计算机的传输媒体上**传输数据比特流**，而不是**指具体的传输媒体**。
- 物理层的作用是要尽可能地**屏蔽**掉不同传输媒体和通信手段的差异。
- 用于物理层的协议也常称为物理层**规程** (procedure)。





物理层的主要任务

主要任务：确定与传输媒体的接口的一些特性。

- **机械特性**：指明接口所用接线器的形状和尺寸、引线数目和排列、固定和锁定装置等。
- **电气特性**：指明在接口电缆的各条线上出现的电压的范围。
- **功能特性**：指明某条线上出现的某一电平的电压表示何种意义。
- **过程特性**：指明对于不同功能的各种可能事件的出现顺序。





Q2: 信息-消息-数据-信号?

- 信息——各个事物运动的状态及状态变化的方式。信息是抽象的意识或知识，是摸不到，看不见的。
- 消息——包含有信息的语言、文字、声音和图像等。
- ◆ 信息是存在于消息之中的新内容，例如人们从各种媒体上获得原来未知的消息，就是获得了信息。
- 数据(data)——运送消息的实体，比如十进制表示的数字和汉字国标码，二进制表示的文字、图像、语音和视频等。
- 信号(signal)——反映消息的物理量，例如工业控制中的温度、压力、流量，自然界的声音信号等。
- 信号是消息的表现形式，消息是信号的具体内容。





信号的描述与分类

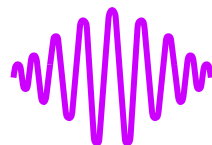
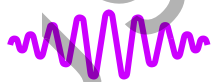
- ◆ 信号——数据的电气的或电磁的表现。
 - ▣ **电信号**：指随着时间而变化的电压或电流，因此在数学描述上可将它表示为时间的函数，并可画出其波形。
 - ▣ **电磁信号**：也称电磁波，指在空间传播的周期性变化的电磁场。
 - ✓ 无线电波和光线、X射线、 γ 射线等都是波长不同的电磁波。例如，广播和电视利用电磁波来传送声音和图像。
- ◆ 根据信号的连续性与否分类
 - ▣ 模拟信号和数字信号





模拟信号

- “模拟的” (analogous)——代表消息的参数
的取值是连续的。
- 模拟信号是指用连续变化的物理量所表达的
信息，如：温度、湿度、压力、长度、电流、
电压等。
 - ◆ 实际生产生活中的各种物理量，如：摄像机摄下
的图像、录音机录下的声音、车间控制室所记录
的压力、流量、转速、湿度等都是模拟信号。





数字信号

- “数字的” (digital)——代表消息的参数取值是离散的。
- 数字信号是人为的、抽象出来的、在幅度取值上不连续的信号，数字信号可用一序列的数表示，而每个数又可表示为二制码的形式，适合计算机处理。
- 或者说，只要能把解决问题的方法用数学公式表示，就能用计算机来处理代表物理量的数字信号。





Q3: 数据与信号怎么一起工作?

信源 —————> 信道 —————> 信宿

信息 → 数据 → 信号 → 在介质上传输 → 信号 → 数据 → 信息



人与人之间通信是为了交换信息
计算机之间通信是为了交换数据



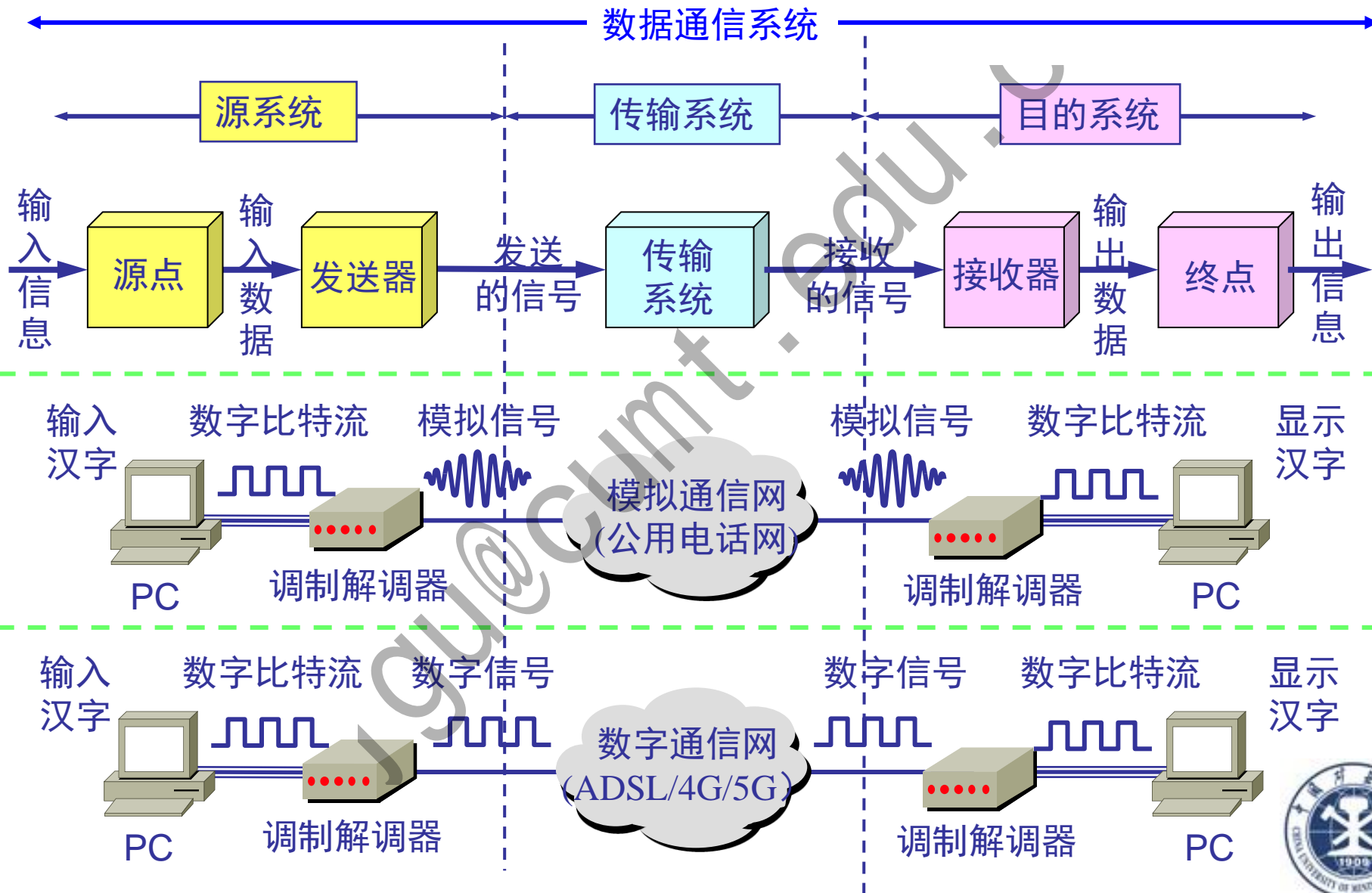
把携带信息的数据用物理信号形式通过介质传送到目的地

📖 信息和数据 (0、1比特) 不能直接在介质上传输





数据通信系统





Q4: 模拟信号的劣势在哪?

- 近百年以来, 无论是有线相连的电话, 还是无线发送的广播电视, 很长的时间内都是用模拟信号来传递信号的。
- 模拟信号传输过程中, 先把信息信号转换成几乎“一摸一样”的波动电信号(因此叫“模拟”), 再通过有线或无线的方式传输出去, 电信号被接收下来后, 通过接收设备还原成信息信号。
- 但是模拟信号的传播效果未必能达到很好:
 - 过去打电话时常常遇到听不清、杂音大的现象;
 - 广播电台播出的交响乐, 听起来同在现场听乐队演奏相比总有较大的欠缺;
 - 电视图像上也时有雪花点闪烁。





模拟信号传输为什么不那么靠谱

- 模拟信号在传输过程中要经过许多的处理和转送，这些设备难免要产生一些噪音和干扰；
- 如果是有线传输，线路附近的电气设备也要产生电磁干扰；
- 如果是无线传送，则更加“开放”，空中的各种干扰根本无法抗拒，这些干扰很容易引起信号失真，也会带来一些噪声；
- 这些失真和附加的噪声，还会随着传送的距离的增加而积累起来，严重影响通讯质量。





模拟信号的处理效果也不那么理想

- 模拟信号的处理办法：
 - ✓ 一种是采取各种措施来抗干扰，如：提高信息处理设备的质量，尽量减少它产生噪音；
 - ✓ 给传输线加上屏蔽；
 - ✓ 采用调频载波来代替调幅载波等。
- 但是，这些办法都不能从根本上解决干扰的问题。





失真的模拟信号很难恢复

- 另一种办法是设法除去信号中的噪声，把失真的信号恢复过来。
- 但是，对于模拟信号来说，由于无法从已失真的信号较准确地推知出原来不失真的信号，因此这种办法很难有效，有的甚至越弄越糟。





Q5: 数字信号的优势在哪？

- 数字通信（digital telecommunications）是用数字信号作为载体来传输消息，或用数字信号对载波进行数字调制后再传输的通信方式。
 - 数字通信可传输电报、数字数据等数字信号，也可传输经过数字化处理的语声和图像等模拟信号。
 - 数字信号在传输过程中不仅具有较高的抗干扰性，还可以通过压缩，占用较少的带宽，实现在相同的带宽内传输更多、更高音频、视频等数字信号的效果。此外，数字信号还可用半导体存储器来存储，并可直接用于计算机处理。





数字通信的优点

- 抗噪声（干扰）能力强---中继与再生
- 可以控制差错，提高了传输质量
- 便于用计算机进行处理，实现复杂的远距离大规模自动控制系统和自动数据处理系统
- 易于加密、保密性强
- 各种消息(模拟的和离散的)都可变成统一的数字信号进行传输，可以传输语音、数据、影像，通用、灵活



仅在不得已的情况下，才会采用模拟通信。

如用modem通过拨号线路传输数字信号。





数字通信的缺点

复用

■ 1. 频带利用率不高

- 系统的频带利用率是系统允许最大传输带宽（信道的带宽）与每路信号的有效带宽之比。
- 以电话为例，一路模拟电话通常只占据 4kHz 带宽，但一路接近同样话音质量的数字电话可能要占据 20 ~ 60kHz 的带宽。因此，如果系统传输带宽一定的話，模拟电话的频带利用率要高出数字电话的 5 ~ 15 倍。

同步

■ 2. 系统设备比较复杂

- 数字通信中，要准确地恢复信号，接收端需要严格的同步系统，以保持收端和发端严格的节拍一致、编组一致。因此，数字通信系统及设备一般都比较复杂，体积较大。
- 随着新的宽带传输信道（如光导纤维）的采用、窄带调制技术和超大规模集成电路的发展，数字通信的这些缺点已经弱化。





Q6: 数字信号怎么表示数据?

- 码元(code cell)——在使用时间域（或简称为时域）的波形表示数字信号时，代表不同离散数值的基本波形。

码元：时间轴上的一个信号编码单元，即一个周期信号。

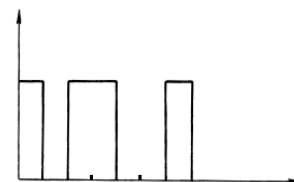
信息的二进制编码

110011000001...

电气或电磁的信号



模拟波形信号

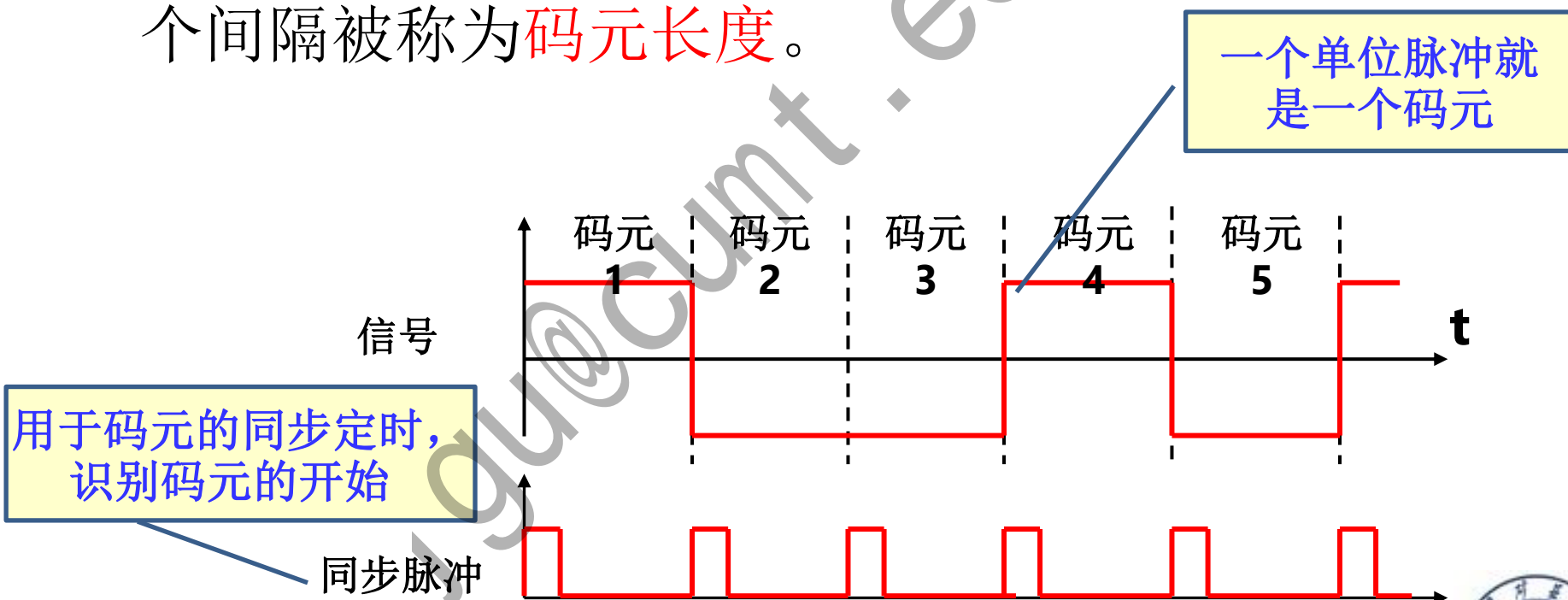


数字脉冲信号



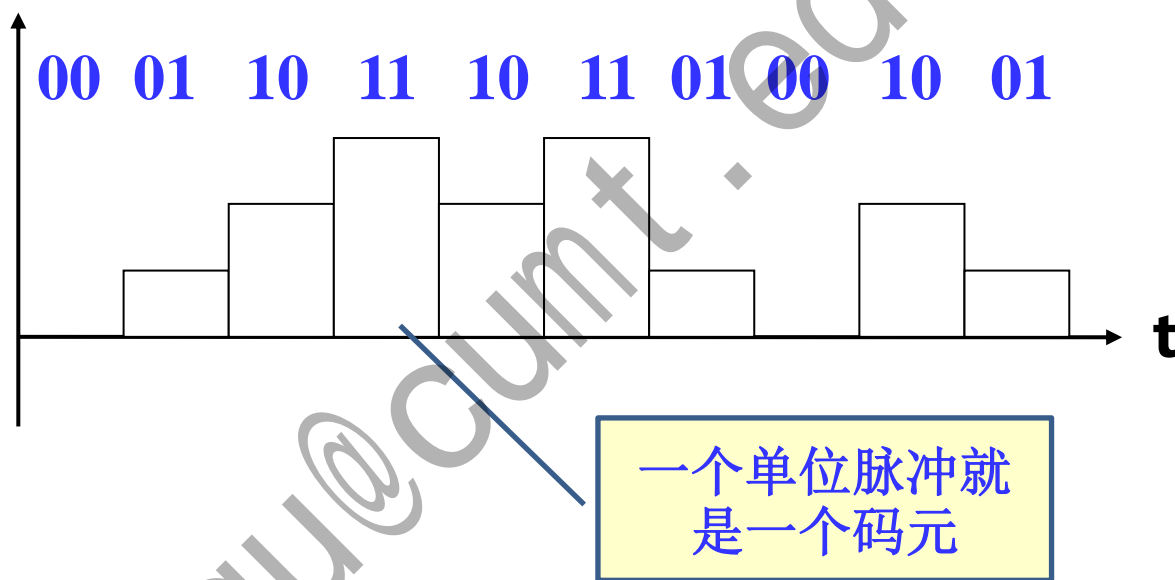


- 在数字通信中常常用时间间隔相同的信号来表示一位二进制数字。
- 这样的时间间隔内的信号称为二进制码元，而这个间隔被称为码元长度。





码元是承载信息的基本信号单位，一码元的信息量是由码元所能表示的数据有效状态值个数决定。



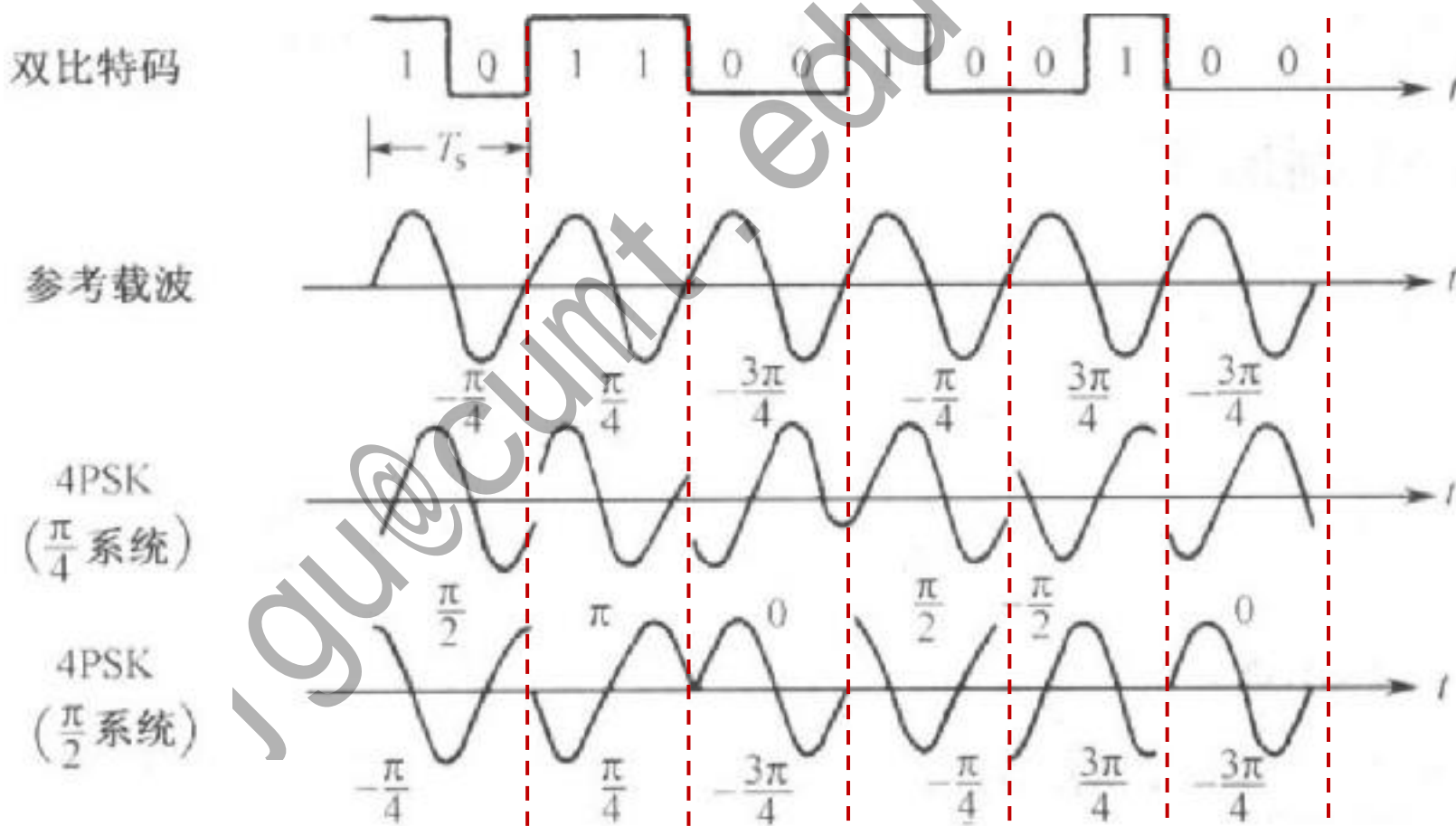
因为一码元有00、01、10、11四个有效状态值，所以一码元能携带2bit的信息





四相移相键控（QPSK）：载波的相位具有四种离散状态，那么在载波的周期内就具有四种不同的波形。

每个载波相位的波形可以携带两个二进制位





如果1码元可以携带 n bit的信息量, 那么信息量 n (比特)与码元取的离散值个数 N 有如下关系:

$$n = \log_2 N$$





Q7: 怎么表示数字通信的传输速率?

- ◆ **数据传输速率**: 也称为**比特速率S**, 是指单位时间内传输的二进制位数, 单位是位/秒, 记为bit/s、b/s或bps。
- ◆ **信号传输速率**: 也称为**码元速率或波特率**, 是指单位时间内通过信道传输的码元个数, 单位是波特, 记为Baud, 以**B**表示。

$$\text{数据传输速率} S = \text{信号传输速率} B \times \log_2 N \quad (\text{bps})$$





波特率B和比特率S的比较

数据传输速率 $S = \text{信号传输速率} B \times \log_2 N$ (bps)

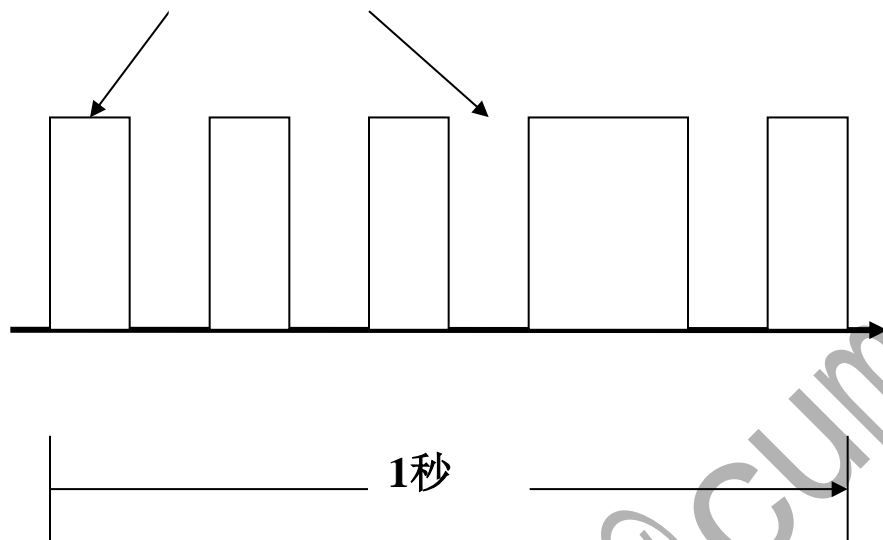
- ◆ N 为一个码元携带的离散化电平个数;
- ◆ 如果一个码元携带一个比特的信息, 即2个离散化电平个数, 则信息传输率 (bit/s) 和码元传输率在数值上是相等的。
- ◆ 如果一个码元携带 n 个比特的信息, 即 2^n 个离散化电平个数, 则信息传输率是码元率的 n 倍。





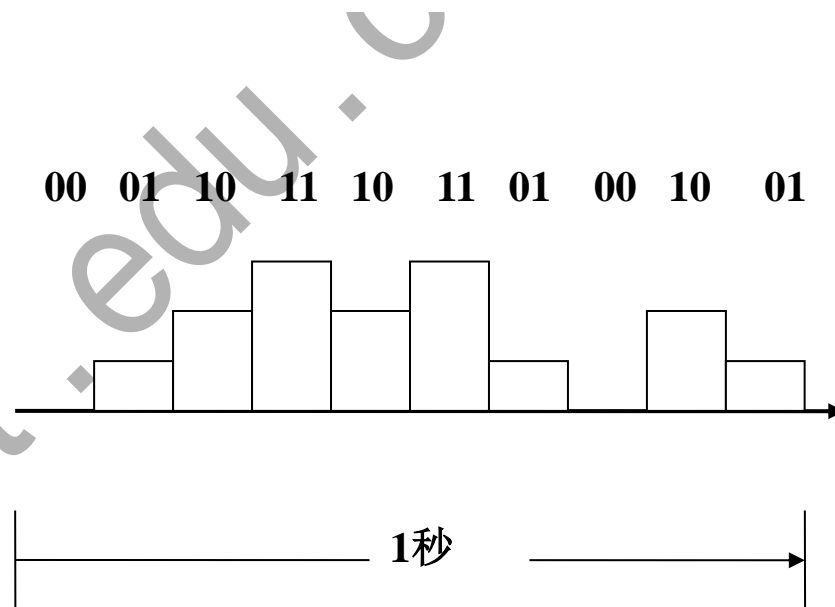
波特率B和比特率S的比较

1 个码元



$B=10\text{Baud}$ $S=10\text{b/s}$

$N=2$ 时 $S=B$



$B=10\text{Baud}$ $S=20\text{b/s}$

$N=4$ 时 $S=2B$

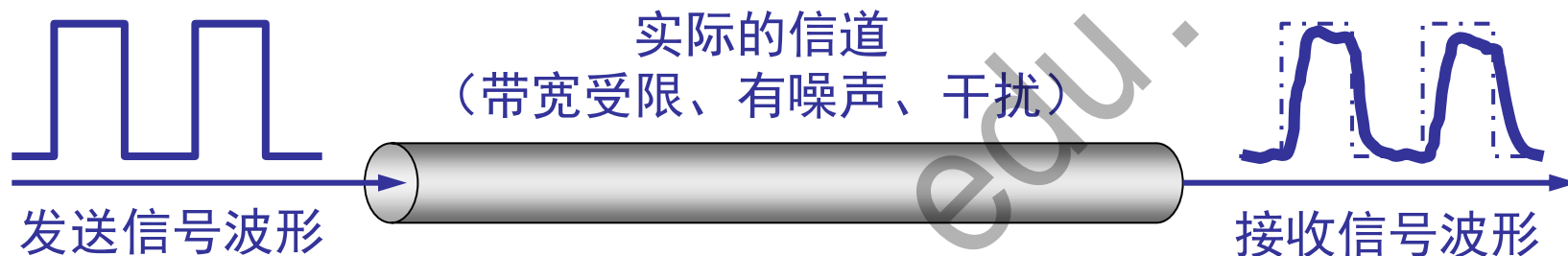
$$S = B \cdot \log_2 N$$



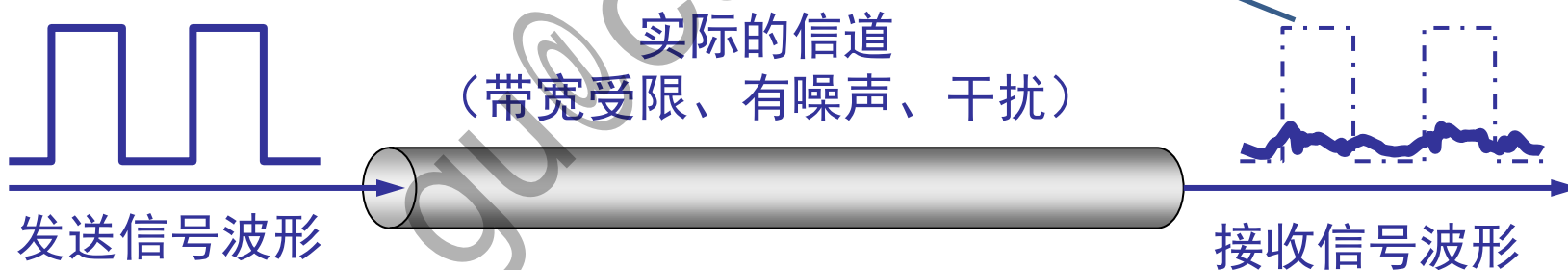


Q8: 怎么衡量信道容量?

- 有失真, 但可识别



- 失真大, 无法识别



数字信号通过实际的信道的情形





影响信道中码元信号有效传输的因素

- ◆ 任何实际的信道都**不是理想的**，其传输过程会受到多种因素的影响。
- ◆ 以下情形都会导致信号波形失真越严重
 - ✓ 码元传输的**速率越高**
 - ✓ 信号传输的**距离越远**
 - ✓ 噪声、**干扰越大**
 - ✓ 传输**媒介质量越差**

降速？违背初心

增强信号强度，增加中转结点，减少信号衰减

抗干扰，降噪

超五类双绞线
光纤/光缆
更高的无线电波频率资源





信道容量的定义

- ◆ 信道容量是信道能无错误传送信号的最大信息率。
 - 对于只有一个信源和一个信宿的单用户信道，它是一个数，单位是比特每秒(bit/s)，或符号每秒(symbol/s)，比如波特率(Baud/s)。
 - 它代表每秒或每个信道符号能传送的最大信息量，或者说小于这个数的信息率必能在此信道中无错误地传送。





信道容量的影响因素

◆ 从概念上讲，限制码元在信道上的传输速率的因素有以下两个：

— 信道能够提供的信号频率范围——带宽

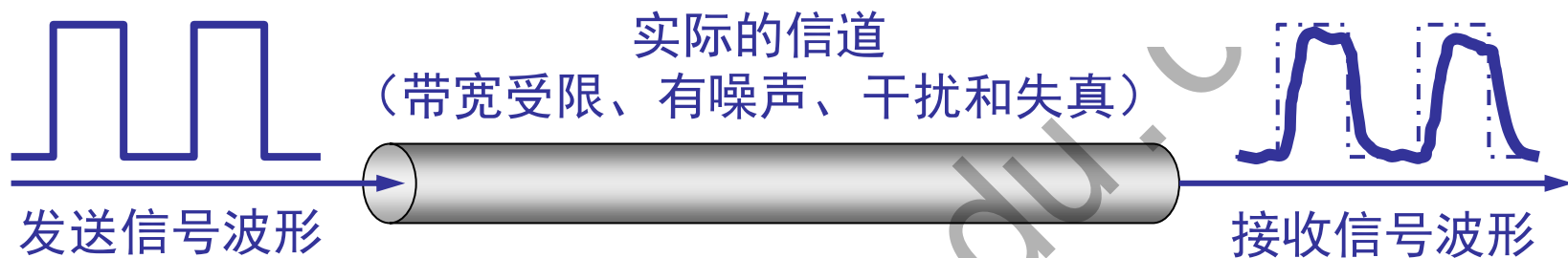
- 频率是信号每秒钟变化的次数
- 信号频率越高，信号周期越短，信号宽度越小，单位时间传输的码元个数越多
- 信道带宽越高，可以支持的码元传输速率越高，对信道的频带资源要求也越高

— 信噪比 S/N





(1) 信道能够提供的信号频率范围



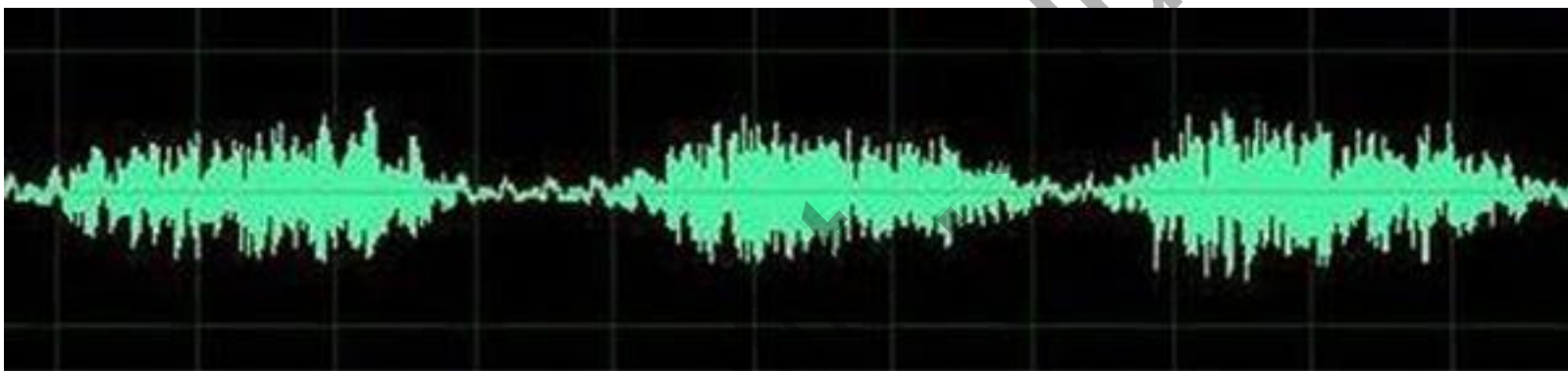
- ◆ **时域(time domain)**是以**时间轴**为坐标表示动态信号的关系，描述数学函数或物理信号对时间的关系，表示较为形象与直观；
- ◆ **频域(frequency domain)**是把信号变为以**频率轴**为坐标表示出来，描述信号是由哪些单一频率的信号合成的，分析过程则更为简练，剖析问题更为深刻和方便。





时域分析与频域分析对比

- 世界都是以时间贯穿，如股票的走势、人的身高、汽车的轨迹、音乐的播放等，都会随着时间发生改变，这种以时间作为参照来观察**动态世界**的方法称为**时域分析**。



音乐波形

- 换个角度，会发现世界是永恒不变的，这个**静止世界**就叫做**频域**。

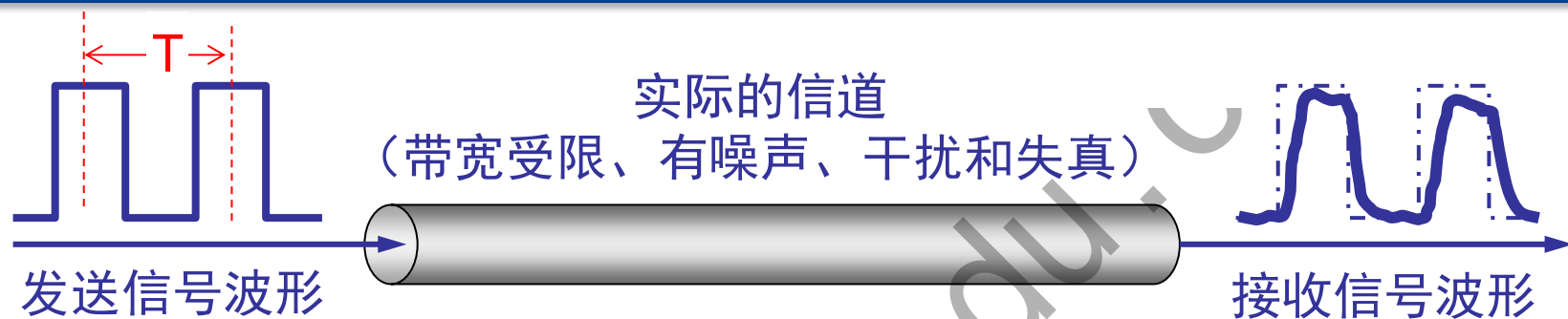


曲谱音符





贯穿时域与频域的方法——傅立叶分析

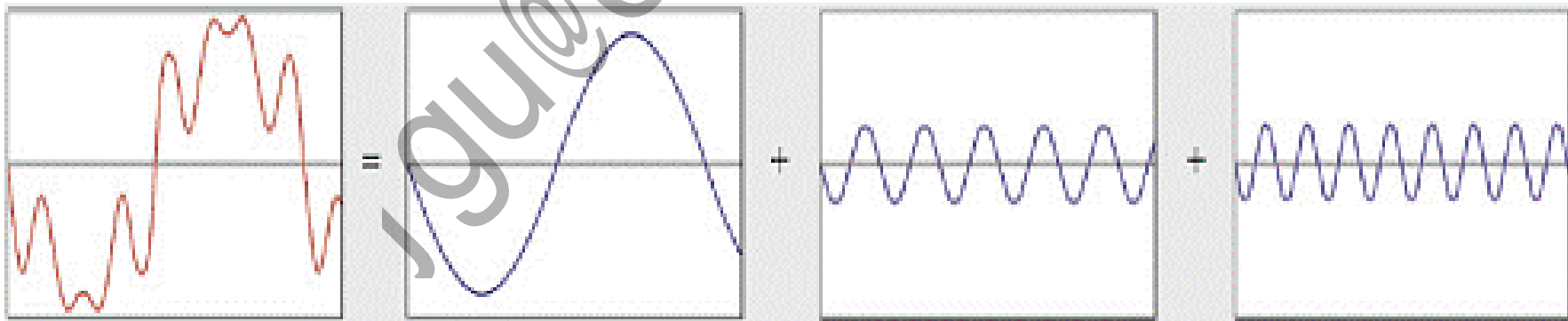
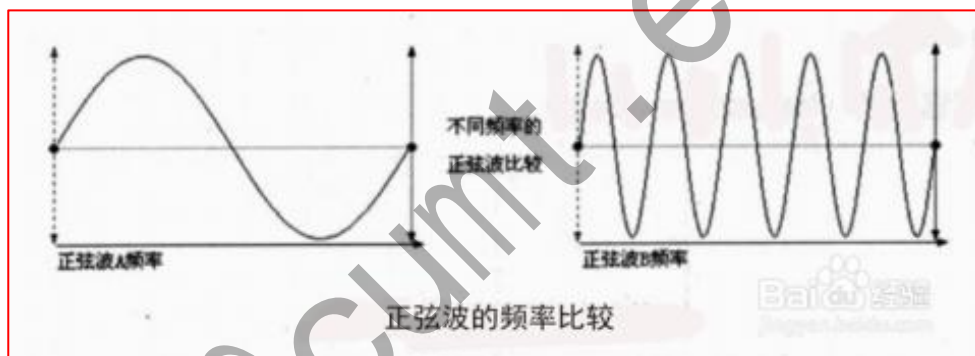
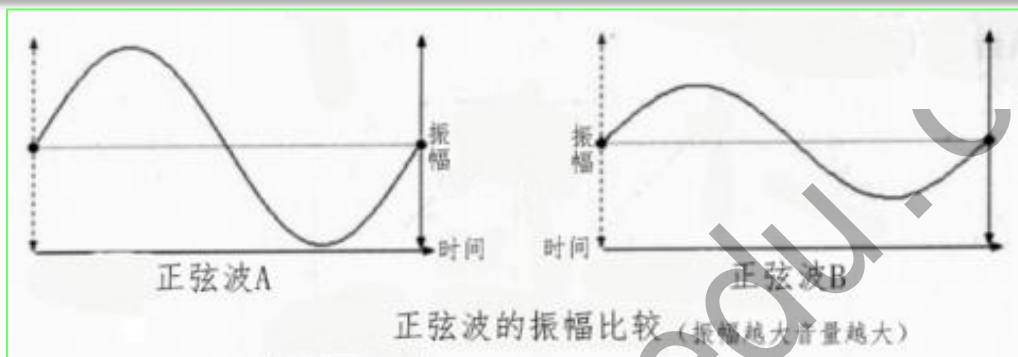


- ◆ 傅立叶于1807年提出“任何周期信号都可用正弦函数级数表示”——**频谱分析**
 - ▣ 一个周期函数 $f(t)$ 展开为傅立叶级数，在物理上意味着将一个较复杂的周期波形看作是不同的振幅、不同相位**正弦波**的叠加。
 - ▣ 这些正弦波的频率称为 $f(t)$ 的频率成分。



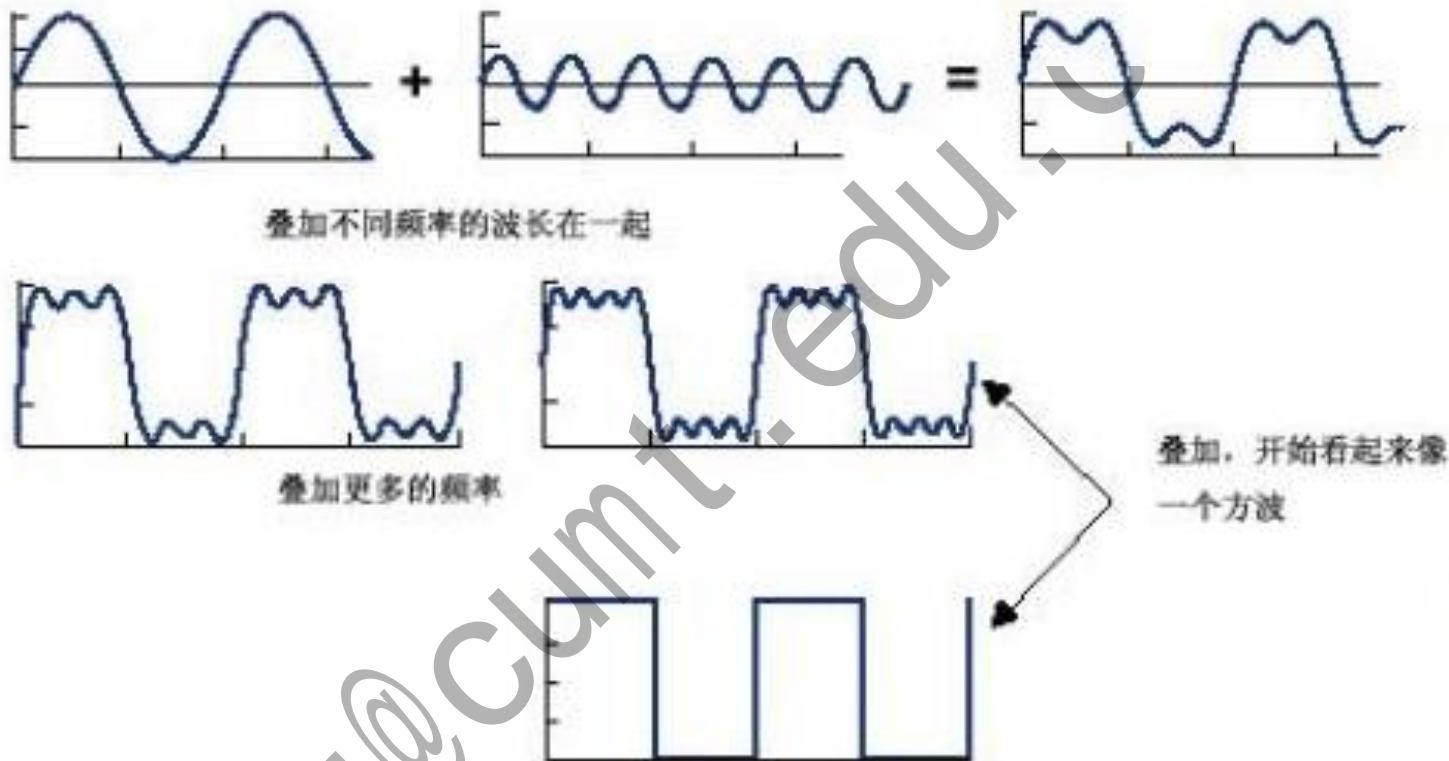


正弦波的叠加





方波脉冲的叠加

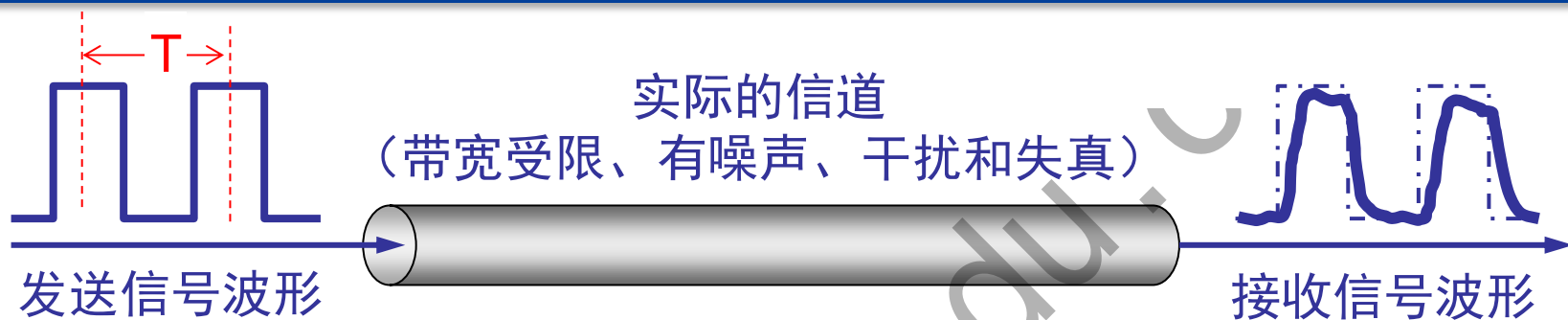


正弦波是频域中唯一存在的波形，这是频域中最重要的规则，即正弦波是对频域的描述，因为频域中的任何波形都可用正弦波合成。



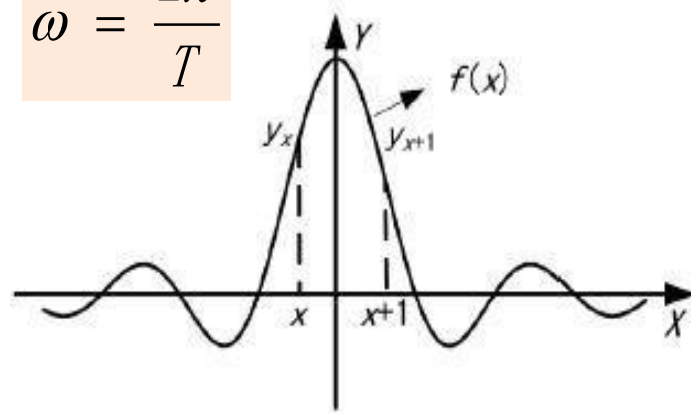


矩形脉冲的振幅频谱图



矩形脉冲的**振幅**频谱图表示信号含有的各个频率分量的幅度值。其横坐标为频率 ω (角频率, 单位为 Hz), 纵坐标对应各频率分量的幅度值 $f(x)$ 。

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

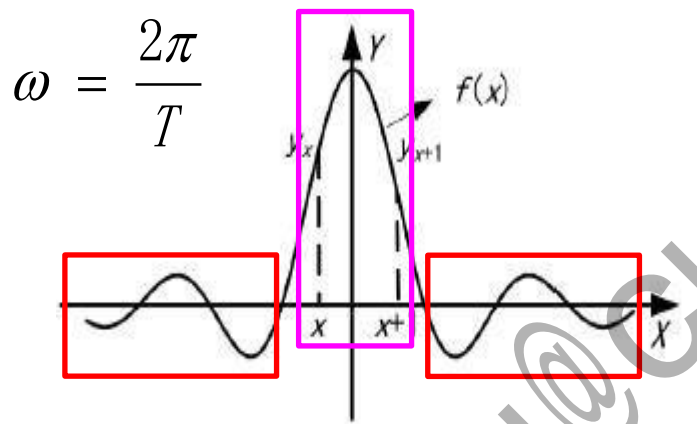
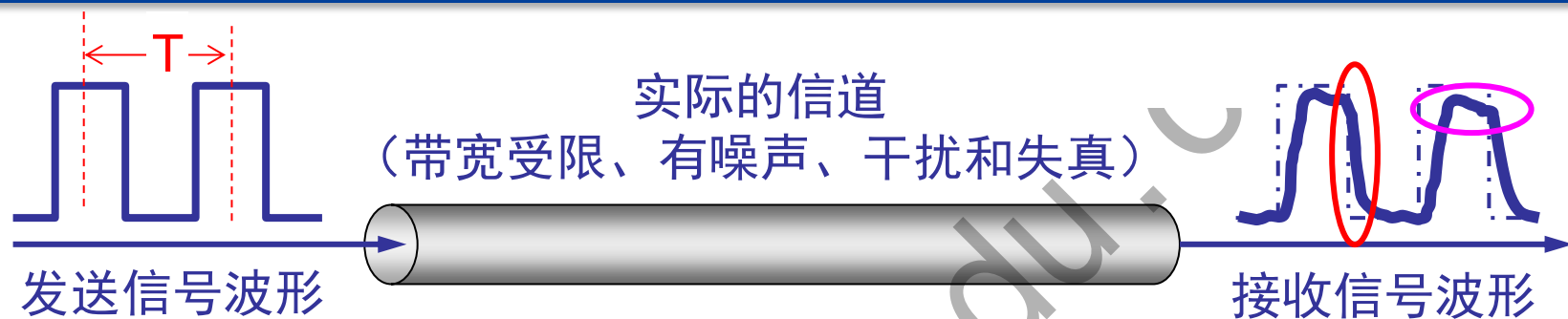


矩形脉冲的**振幅**频谱图





脉冲信号的高频分量和低频分量



矩形脉冲的**振幅**频谱图(幅度谱)

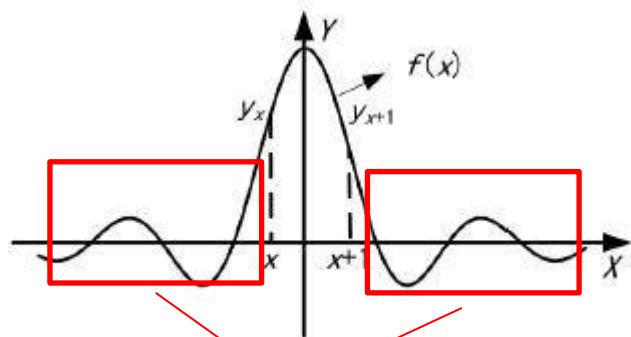
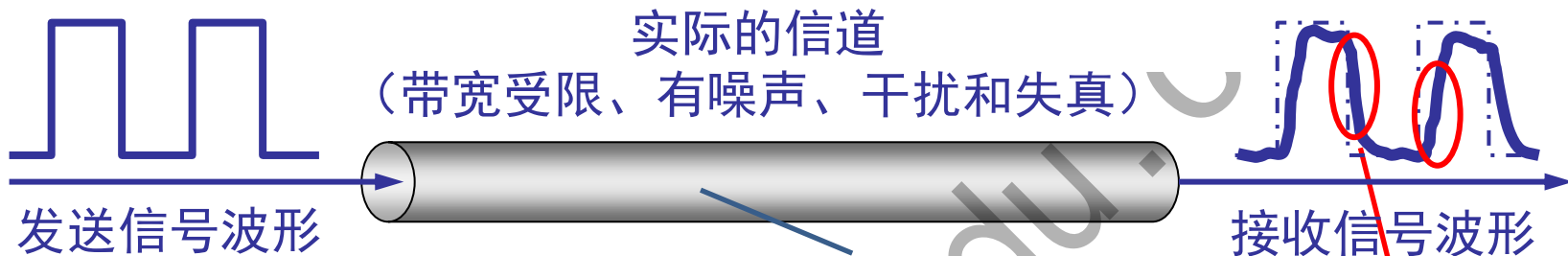
在高速信号传输中，信号的高频分量衰减要比低频分量的衰减大很多。

- ✓ **高频**分量主要影响脉冲的跳变沿，脉冲信号波形变化愈剧烈，说明所含的高频分量愈丰富；
- ✓ **低频**分量影响脉冲的顶部，变化愈缓慢，说明所含的低频分量愈丰富；
- ✓ 当信号中任一频谱分量的幅度值或相位值发生相对变化时，输出波形一般要发生失真。





高频分量的过分衰减会导致码间串扰



矩形脉冲信号包含很丰富的高频分量

一个特定的信号往往是由许多不同的频率成份组成，而具体的信道所能通过的频率范围(带宽)总是有限的。如果信道的带宽不够宽，那么信号中的许多高频分量往往不能通过信道。

如果高频分量受到衰减，那么接收到的波形前沿和后沿就变得不那么陡峭了，每一个码元所占的时间界限也不再是很明确的，而是前后都拖了“尾巴”。

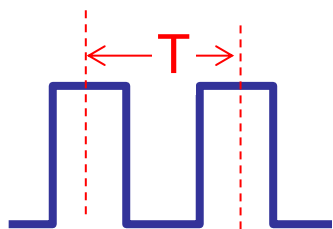
这种在接收端收到的信号波形失去了码元之间的清晰界限的现象叫做码间串扰。





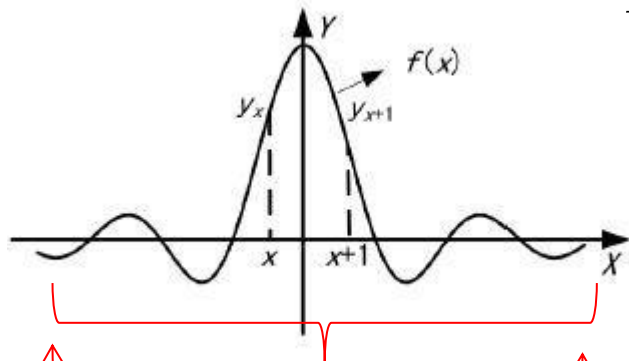
码元速率和带宽的关系

定量?



发送信号波形

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



信道带宽 W 应尽可能包含信号的所有频率范围

W

- ◆ 如果码元速率 C 的越高，意味着脉冲波形的周期 T 变小，那么信号高频分量也就越多，信号的频率范围也就越大。
- ◆ 如果信道的频带 W 越宽，也就是能够通过的信号高频分量越多，那么就可以用更高的速率 C 传送码元而不出现码间串扰。
- ◆ 但是，任何信道的频带宽度 W 都是有限的，因此码元传输的速率 C 也是有上限的，否则就会出现码间串扰的问题，使接收端对码元的判决（即识别）成为不可能。



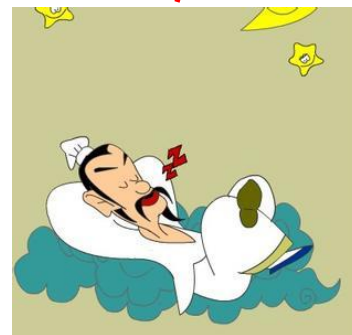


奈氏(Nyquist)准则

- 1924 年，奈奎斯特(Nyquist)推导出著名的奈氏准则，给出了在假定的理想条件下，为了避免码间串扰，码元的传输速率的上限值。

$$C = 2 * W * \log_2 N \text{ Baud/s}$$

- “理想条件”指无噪声的信道
- W是理想信道的带宽，单位为赫(Hz)
- Baud是波特，是码元传输速率的单位，1波特=1码元/秒



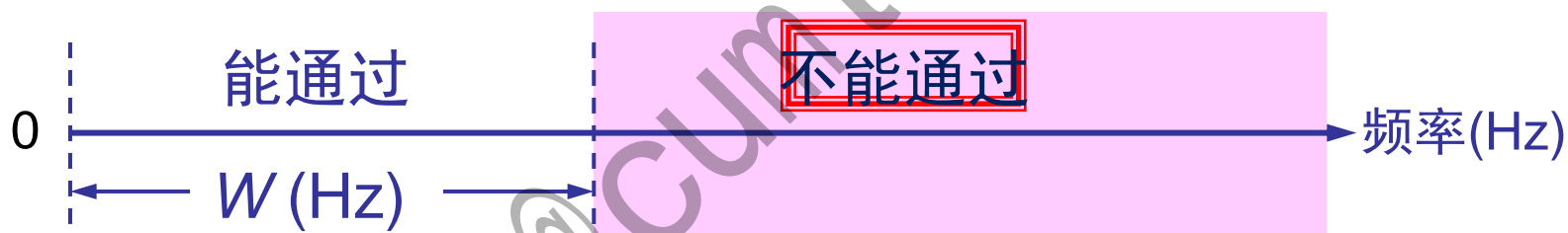


一种形式的奈氏准则

$$C = 2 * W * \log_2 N \quad \text{Baud/s}$$

理想低通信道的最高码元传输速率 = $2W$ Baud

W 是理想低通信道的带宽，单位为赫(Hz)



- “低通”即指低频通过，由截止频率决定。
- 每赫带宽的理想低通信道的最高码元传输速率是每秒2个码元。



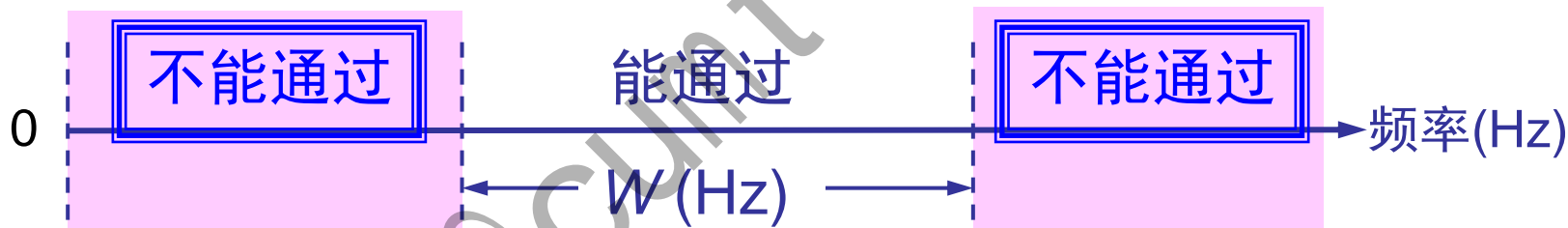


另一种形式的奈氏准则

$$C = 2 * W * \log_2 N \quad \text{Baud/s}$$

理想带通特性信道的最高码元传输速率 = W Baud

W 是理想带通信道的带宽，单位为赫(Hz)



- 每赫带宽的理想低通信道的最高码元传输速率是每秒 1 个码元。





(2) 信噪比

- 噪声存在于所有的电子设备和通信信道中。
- 噪声是随机产生的，它的瞬时值有时会很大。因此噪声会使接收端对码元的判决产生错误。
- 但噪声的影响是相对的。如果信号相对较强，那么噪声的影响就相对较小。
- **信噪比**就是信号的平均功率和噪声的平均功率之比。常记为 S/N ，并用分贝 (dB) 作为度量单位。

$$S/N_{dB} = 10 \log_{10} \frac{S}{N}$$

$$\text{即: } \frac{S}{N} = 10^{(S/N_{dB})/10}$$

例：当 $S/N = 10$ 时，信噪比为 10 dB，而当 $S/N = 1000$ 时，信噪比为 30 dB。





香农公式

- 1948年，香农(Shannon)用信息论的理论推导出了带宽受限且有高斯白噪声干扰的信道的**无差错的、极限**信息传输速率。

- 信道的极限信息传输速率 C

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

- W 为信道的带宽（以 Hz 为单位）；
- S 为信道内所传信号的平均功率；
- N 为信道内部的高斯噪声功率。

例：信道带宽 $W=3\text{KHz}$ ，信噪比为 30dB ，

则 $C=3000*\log_2(1+1000) \approx 30\text{Kbps}$

- ✓ 白噪声也称热噪声（thermal noise），是通信设备中无源器件如电阻、馈线由于电子布朗运动而引起的噪声，又称电阻噪声。
- ✓ 高斯白噪声的功率谱密度服从均匀分布，幅度分布服从高斯分布，好像白光的频谱在可见光的频谱范围内均匀分布那样。





$$C = W \log_2 (1 + S / N)$$

香农公式表明

- 信道的带宽或信道中的信噪比越大，则信息的极限传输速率就越高。
- 只要信息传输速率低于信道的极限信息传输速率，就一定可以找到某种办法来实现无差错的传输。
- 若信道带宽 W 或信噪比 S/N 没有上限（当然实际信道不可能是这样的），则信道的极限信息传输速率 C 也就没有上限。
- 实际信道上能够达到的信息传输速率要比香农的极限传输速率低不少。





进一步讨论:

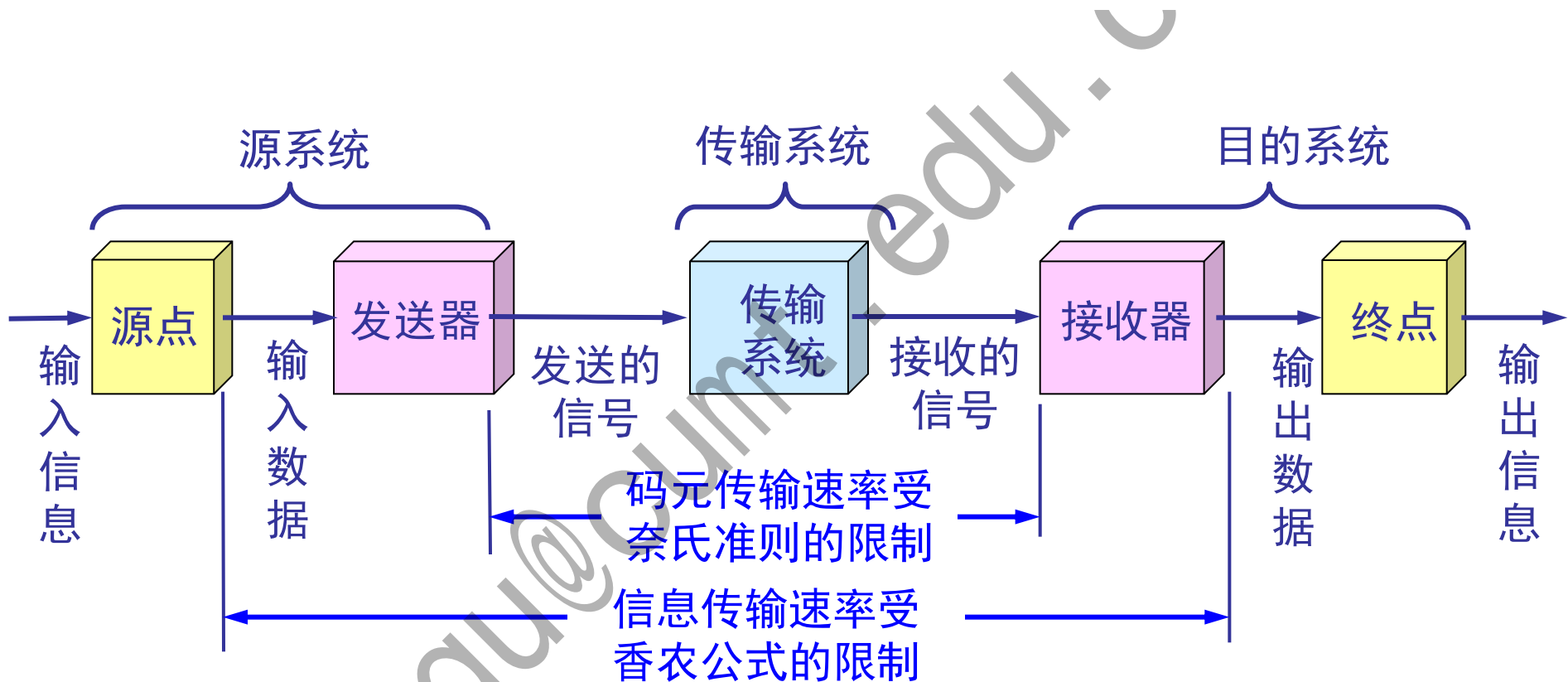
$$C = W \log_2 (1 + S / N)$$

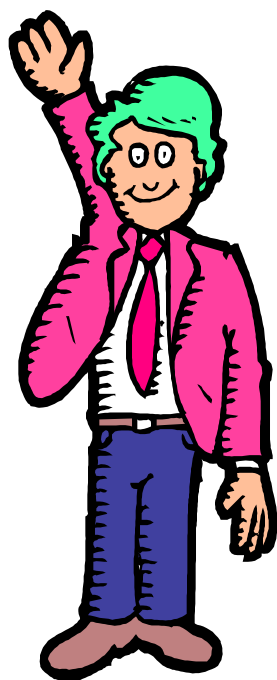
- 提高信道中码元传输速率最直接的方法让信道带宽 **W** 尽可能包含信号的所有频率范围，并提高电子设备的设计制造工艺，去除噪声，提高信噪比 **S/N**。
 - 不过，让物理媒介去适应信号比较难，还得想办法让信号去适应物理媒介。
- 对于 **频带宽度** 已确定的信道，如果 **信噪比** 不能再提高了，并且码元传输速率也达到了上限值，那么还有办法提高信息的传输速率。
 - 用 **编码** 的方法 **让每一个码元携带更多比特的信息量**。





奈氏准则和香农公式 在数据通信系统中的作用范围





**THANK
YOU!**

