数据通信

数据传输

殷亚凤
yafeng@nju.edu.cn
http://cs.nju.edu.cn/yafeng/
Room 901, Building of CS

内容回顾：数据通信综述

- 数据通信简介
- 网络和因特网
- 协议体系结构和套接字编程

数据传输

1. 概念与术语
   - 基本概念
   - 傅立叶分析
   - 频谱、带宽和数据率
2. 模拟与数字数据传输
3. 传输损伤
4. 信道容量

数据传输

成功的数据传输依赖于两个因素:

- 传输媒体的特性
- 传输信号的质量

概念与术语

导向媒体
(电磁波在导线引导下沿某一物理路径前进)

双绞线， 光纤
同轴电缆

非导向媒体
(无线传输，提供传输电磁波的方式，但不引导传输方向)

空气，真空
海水

点对点 (导向媒体)

- 直连链路
- 只有2个设备共享

多点 (导向媒体)

- 有2个以上的设备共享同一个传输媒体

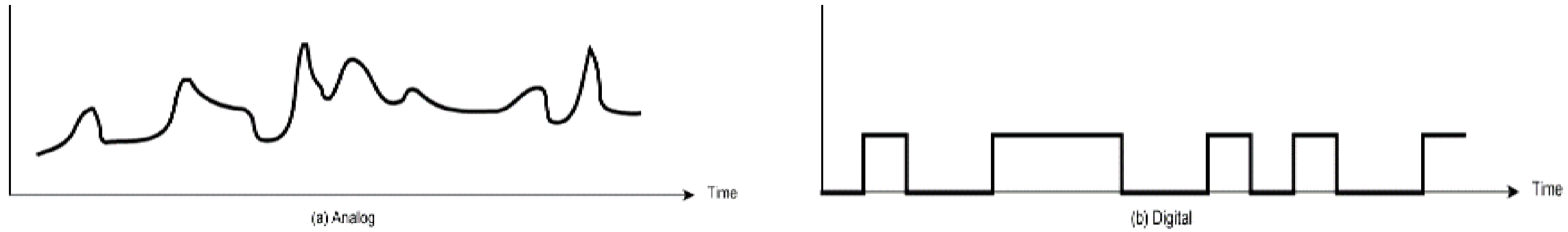
概念与术语

- 数据： 传达某种意义或信息的实体
- 信号： 数据的电气或电磁表示方式
- 发送信号： 信号沿适当媒体的物理传输
- 传输： 用传播并处理信号的方式进行的数据通信过程

概念与术语

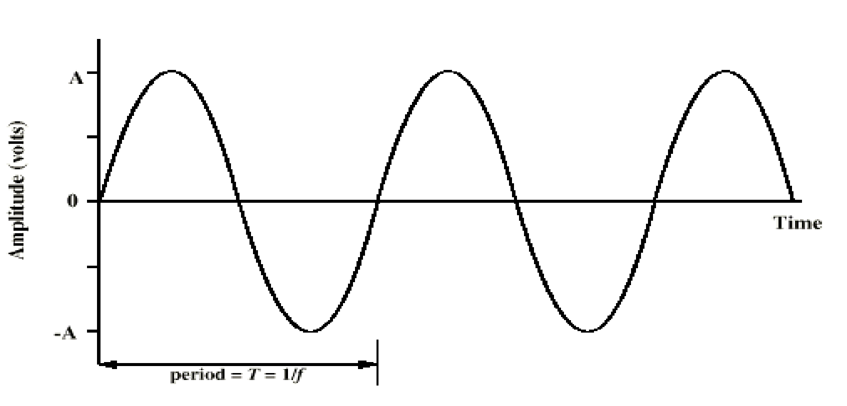
- 模拟与数字数据：
  - 模拟数据：一段时间内具有连续的值，如传感器数据(温度)
  - 数字数据：值是离散的，如计算机产生的数据(文本、数字)

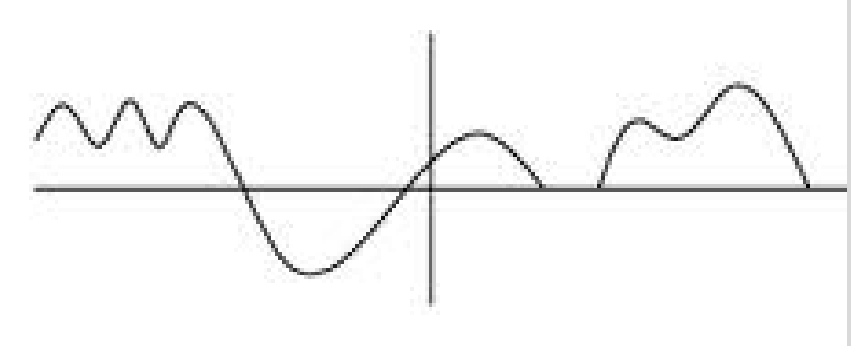
- 模拟与数字信号
  - 模拟信号，连续变化的电磁波，可以在导向和非导向媒体传输，如音频信号
  - 数字信号，电压脉冲序列，在导向媒体传输，如文本编码（ASCII，GB）



频率、频谱和带宽：时域信号

周期与非周期信号
Periodic and Aperiodic signals





周期信号$s(t)$:

$$s(t+T)=s(t)\quad -\infty<t<\infty$$

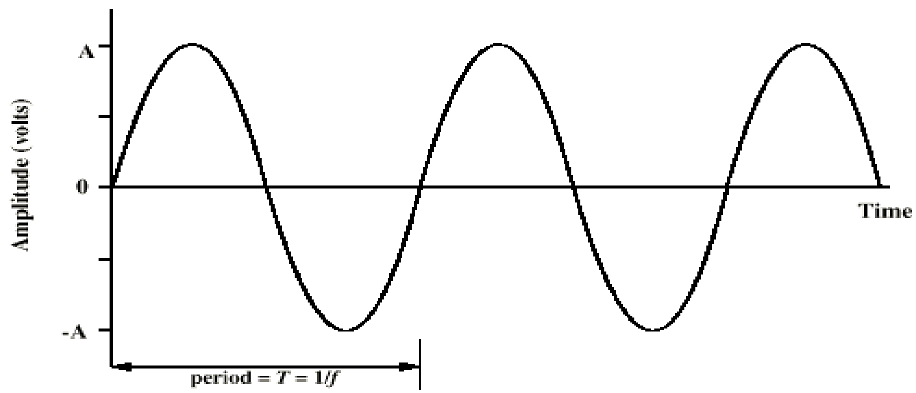
T是信号周期
（通常使用最小周期，即满足以上等式的最小值）

非周期信号$s(t)$：

技巧：

可以将非周期信号理解为周期无限大的周期信号，这样所有的公示计算只需要取极限了

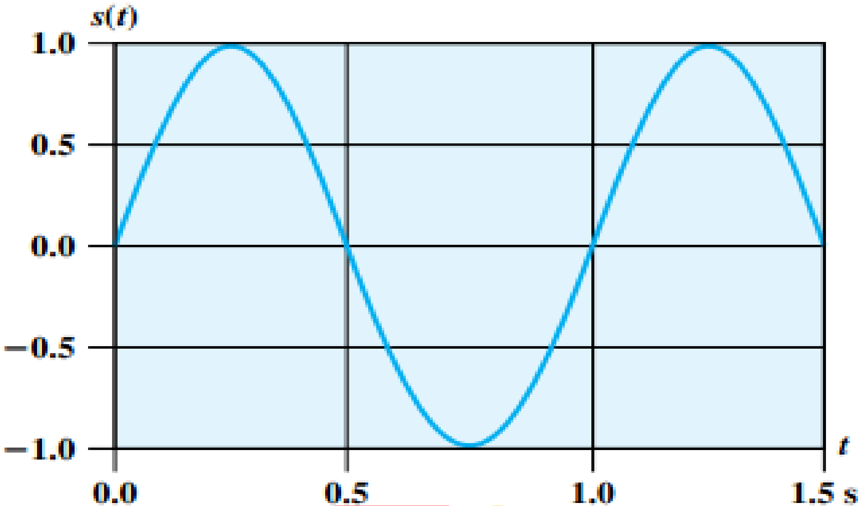
正弦波:周期连续信号



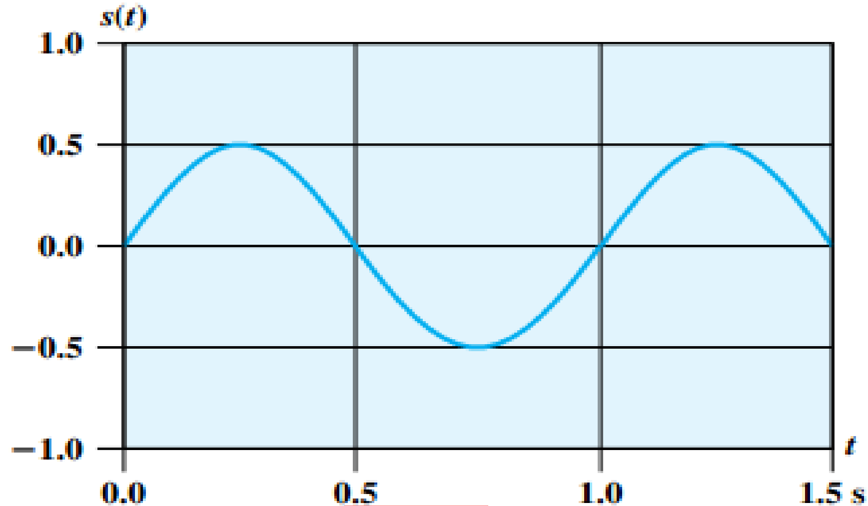
$$s(t) = \boxed{A}\,sin(2\pi \boxed{f} t + \boxed{\Phi})$$

- **振幅** Peak Amplitud A (volt)　一段时间内信号值或信号强度的峰值
- **频率** Frequency　f (Hz)　信号循环的速度
- **周期** Period T (sec)　信号重复一周所花的时间 T = 1/f
- **相位** Phase ϕ　一个周期内信号在时间轴的相对位置 t/T的余数
- **波长** Wavelength λ　信号一个周期所占的空间长度 λ = vT, v*= 3x10^8 m/s

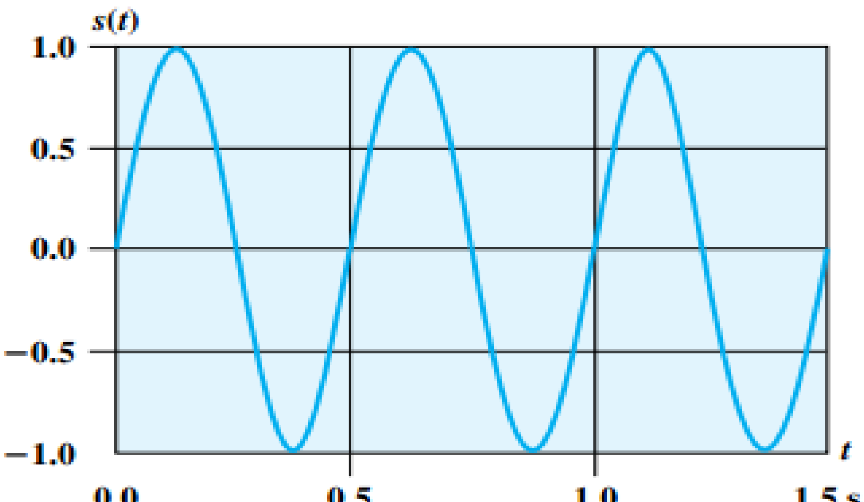
正弦波：周期连续信号



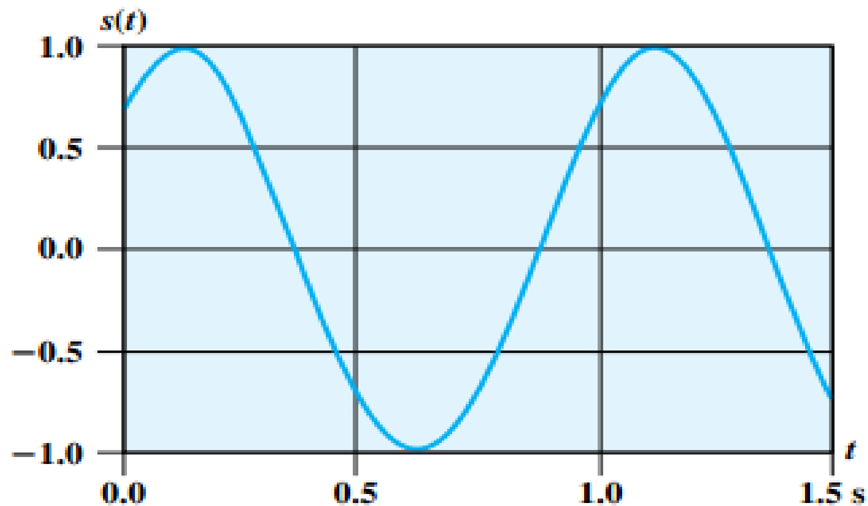
(a) $A = 1, f = 1, \phi = 0$



(b) $A = 0.5, f = 1, \phi = 0$



(c) $A = 1, f = 2, \phi = 0$



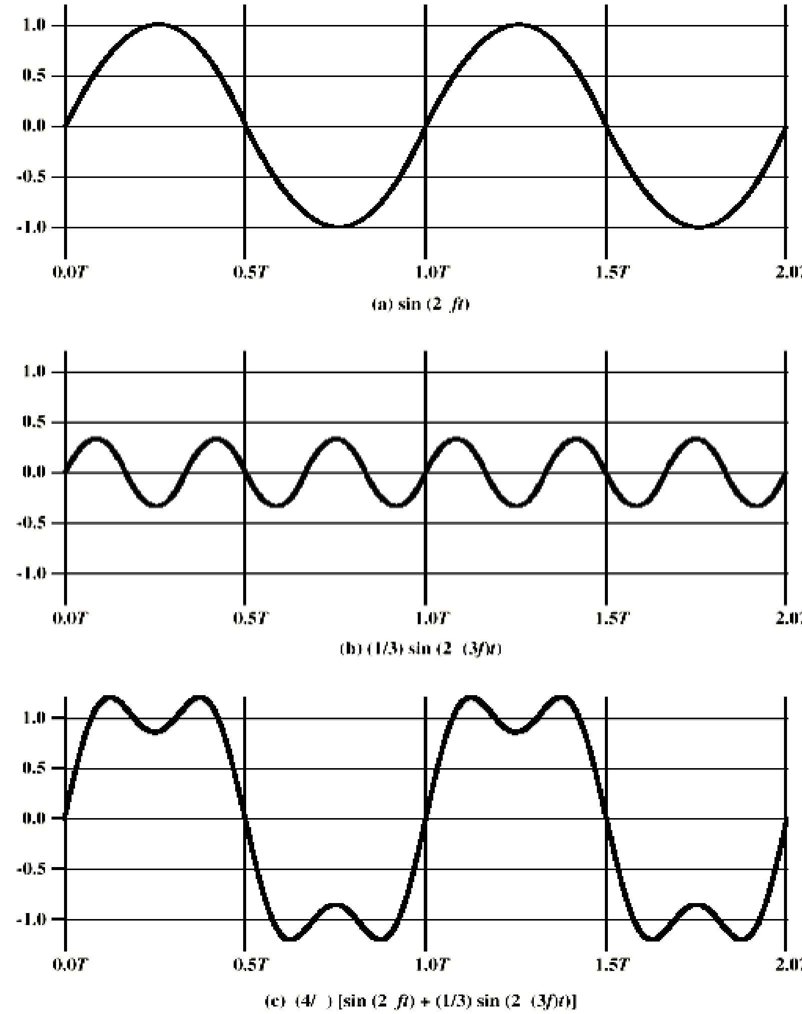
(d) $A = 1, f = 1, \phi = \pi/4$

频率、频谱和带宽：频域概念

- 一个电磁信号是由多种频率组成的

$$s(t) = (4/\pi) \times [\sin(2\pi f t) + (1/3)\sin(2\pi(3f)t)]$$

- 频率成份为正弦波
  - 每个正弦波具有适当的振幅，频率与相位
  - 当一个信号的所有频率成分都是某个频率的整数倍时，后者称为基频；基频的每个倍数频率称为该信号的谐频；
  - 整个信号的周期等于基频周期
- 傅立叶分析是找出信号频域成份的工具



频率成份叠加

数据传输

1. 概念与术语
    - 基本概念
    - 傅立叶分析
    - 频谱、带宽和数据率
2. 模拟与数字数据传输
3. 传输损伤
4. 信道容量

傅立叶分析

周期信号的傅立叶级数表示

- 任何周期信号都可以表示为正弦波之和
- 周期信号的频谱包含离散的频率分量
  - 基频 (Fundamental harmonic); 谐波 (Harmonics);
  - 直流分量 (DC component)

$$x(t)=\boxed{\frac{A_0}{2}}+\sum_{n=1}^{\infty}\left[A_n\cos\left(2\pi n \boxed{f_0} t\right)+B_n\sin\left(2\pi n f_0 t\right)\right]$$

$$A_0=\frac{2}{T}\int_0^T x(t)\,\mathrm{d}t$$

$$A_n=\frac{2}{T}\int_0^T x(t)\cos(2\pi n f_0 t)\,dt$$

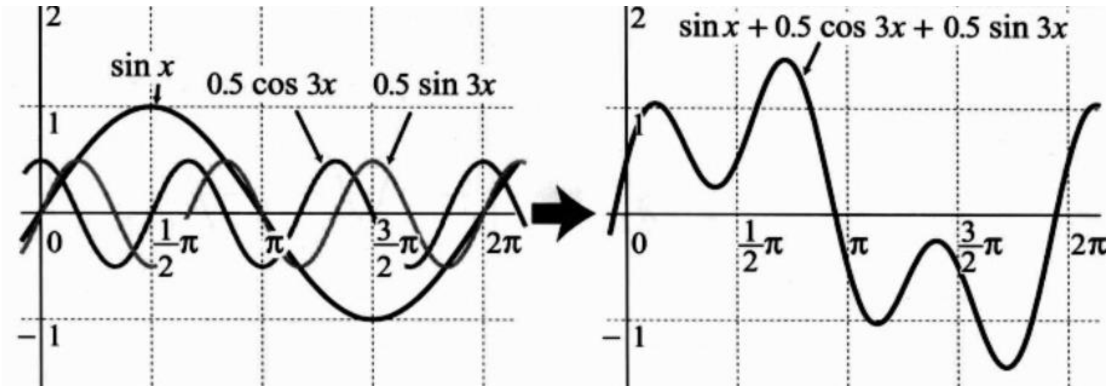
$$B_n=\frac{2}{T}\int_0^T x(t)\sin(2\pi n f_0 t)\,dt$$

证明

傅立叶分析

周期信号的傅立叶级数表示

- 对sin和cos进行组合，能够得到很多不同形状的波形



- 任何周期信号都可以表示为正弦波之和

$$f(x) = a_0 \cancel{\cos 0x} + a_1 \cos 1x + a_2 \cos 2x + \ldots\ldots$$

$$+ \cancel{b_0 \sin 0x} + b_1 \sin 1x + b_2 \sin 2x + \ldots\ldots$$

其中

$$\cos 0x = \cos 0 = 1, \quad \sin 0x = \sin 0 = 0$$

傅立叶分析

周期信号的傅立叶级数表示

- 任何周期信号都可以表示为正弦波之和

$$
\begin{aligned}
f(x) = a_0 &+ a_1\cos 1x + a_2\cos 2x + \ldots\ldots \\
&+ b_1\sin 1x + b_2\sin 2x + \ldots\ldots
\end{aligned}
$$

如何得到cos和sin的系数呢?

$$\boxed{x(t)=\frac{A_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}\left[A_n\cos\left(2\pi n f_0 t\right)+B_n\sin\left(2\pi n f_0 t\right)\right]}$$

傅立叶分析

周期信号的傅立叶级数表示

- 任何周期信号都可以表示为正弦波之和

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos 1x + a_2 \cos 2x + \ldots\ldots$$
$$+ b_1 \sin 1x + b_2 \sin 2x + \ldots\ldots$$

如何得到cos和sin的系数呢？ “**函数的正交**”

两个三角函数正交=>它们乘积的定积分在[-π, π]上等于0

例如：在一个周期内

sin x和cos y 正交，

sin x和sin y， cos x和cos y 在x≠y时正交

但是，sin x和sin y， cos x和cos y 在x=y时不正交

$$\sin\alpha\cos\beta = \frac{1}{2}[\sin(\alpha+\beta) + \sin(\alpha-\beta)]$$

$$\cos\alpha\sin\beta = \frac{1}{2}[\sin(\alpha+\beta) - \sin(\alpha-\beta)]$$

$$\cos\alpha\cos\beta = \frac{1}{2}[\cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)]$$

$$\sin\alpha\sin\beta = -\frac{1}{2}[\cos(\alpha+\beta) - \cos(\alpha-\beta)]$$

傅立叶分析

周期信号的傅立叶级数表示

- 任何周期信号都可以表示为正弦波之和

0

$$f(x) = a_0 + \underline{a_1 \cos 1x + a_2 \cos 2x + \ldots\ldots}$$
$$+ b_1 \sin 1x + b_2 \sin 2x + \ldots\ldots$$

两边同时乘以sin(nx)，并在一个周期内积分

因此，当n≠0

$$\int_0^{2\pi} f(x)\sin nx\,dx = \int_0^{2\pi} b_n \sin nx \sin nx\,dx = b_n \int_0^{2\pi} \frac{1}{2}(1-\cos 2nx)\,dx = b_n \pi$$

$$\Rightarrow b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\sin nx\,dx$$

cos()sin() → 0

sin(nx)sin(?x) → 0 (?≠n)

$\boxed{\text{sin x和sin y，cos x和cos y 在x=y时不正交}}$ $\boxed{\sin(nx)\sin(nx) \neq 0}$ **b_n**

傅立叶分析

周期信号的傅立叶级数表示

- 任何周期信号都可以表示为正弦波之和

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos 1x + a_2 \cos 2x + \ldots\ldots$$

$$+ b_1 \sin 1x + b_2 \sin 2x + \ldots\ldots \quad 0$$

因此，当n≠0

$$\int_0^{2\pi} f(x) \sin nx dx = \int_0^{2\pi} b_n \sin nx \sin nx dx = b_n \int_0^{2\pi} \frac{1}{2}(1 - \cos 2nx) dx = b_n \pi$$

$$=> b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin nx dx$$

同理

$$\int_0^{2\pi} f(x) \cos nx dx = \int_0^{2\pi} a_n \cos nx \cos nx dx = a_n \int_0^{2\pi} \frac{1}{2}(1 + \cos 2nx) dx = a_n \pi$$

$$=> a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos nx dx$$

sin()cos() → 0
cos(nx)cos(?x) → 0 (?≠n)
cos(nx)cos(nx) ≠ 0 a_n

傅立叶分析

周期信号的傅立叶级数表示

- 任何周期信号都可以表示为正弦波之和

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos 1x + a_2 \cos 2x + \ldots\ldots$$
$$+ b_1 \sin 1x + b_2 \sin 2x + \ldots\ldots$$

因此，当n≠0

$$\boxed{\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\cos nx dx \\ b_n &= \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\sin nx dx \end{aligned}}$$

傅立叶分析

周期信号的傅立叶级数表示

- 任何周期信号都可以表示为正弦波之和

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos 1x + a_2 \cos 2x + \ldots\ldots$$
$$+ b_1 \sin 1x + b_2 \sin 2x + \ldots\ldots$$

因此，当n≠0

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\cos nx dx$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\sin nx dx$$

当n=0

$$\int_0^{2\pi} f(x)\cos nx dx \,|_{n=0} = \int_0^{2\pi} a_0 dx = 2\pi a_0$$

$$=> \boxed{a_0 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\cos nx dx}$$

傅立叶分析

周期信号的傅立叶级数表示

- 任何周期信号都可以表示为正弦波之和
- 周期信号的频谱包含离散的频率分量
  - 基频 (Fundamental harmonic); 谐波 (Harmonics);
  - 直流分量 (DC component)

$$x(t)=\boxed{\frac{A_0}{2}}+\sum_{n=1}^{\infty}\left[A_n\cos\left(2\pi n\boxed{f_0}t\right)+B_n\sin\left(2\pi nf_0t\right)\right]$$

$$A_0=\frac{2}{T}\int_0^T x(t)\,\mathrm{d}t$$

$$A_n=\frac{2}{T}\int_0^T x(t)\cos(2\pi nf_0t)\,dt$$

$$B_n=\frac{2}{T}\int_0^T x(t)\sin(2\pi nf_0t)\,dt$$

傅立叶分析

周期信号的傅立叶级数表示

$x(t)$

正弦-余弦表达式

$$= \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}\left[A_n \cos\left(2\pi n f_0 t\right) + B_n \sin\left(2\pi n f_0 t\right)\right]$$

$$A_n = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\cos(2\pi n f_0 t)\,dt$$

$$B_n = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\sin(2\pi n f_0 t)\,dt$$

$$= \frac{C_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}\left[C_n \cos\left(2\pi n f_0 t + \theta\right)\right]$$

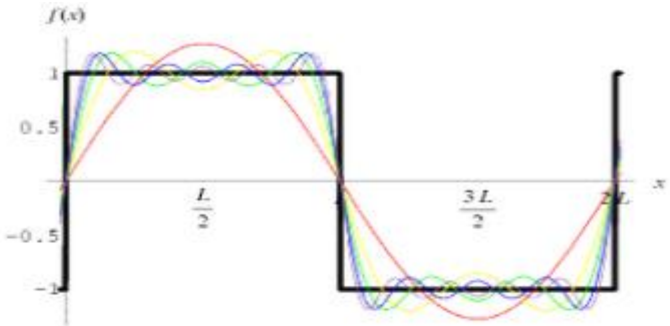
$$C_0 = A_0$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

$$\theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{-B_n}{A_n}\right)$$

振幅-相位表达式

例：连续方波信号的傅立叶级数



$$f(x)=\begin{cases}1, 0\le x<L\\ -1, L\le x<2L\end{cases}$$

$$a_0=\frac{1}{2L}\int_0^{2L} f(x)dx=0$$

$$a_n=\frac{1}{L}\int_0^{2L} f(x)\cos\frac{n\pi x}{L}dx=0$$

$$b_n=\frac{1}{L}\int_0^{2L} f(x)\sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)dx$$

$$b_n=\frac{2}{L}\int_0^{L} f(x)\sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)dx$$

$$=-\frac{2}{n\pi}(\cos n\pi-1)$$

$$=\frac{2}{n\pi}[1-(-1)^n]$$

$$=\frac{4}{n\pi}\begin{cases}0 & n\text{ even}\\ 1 & n\text{ odd.}\end{cases}$$

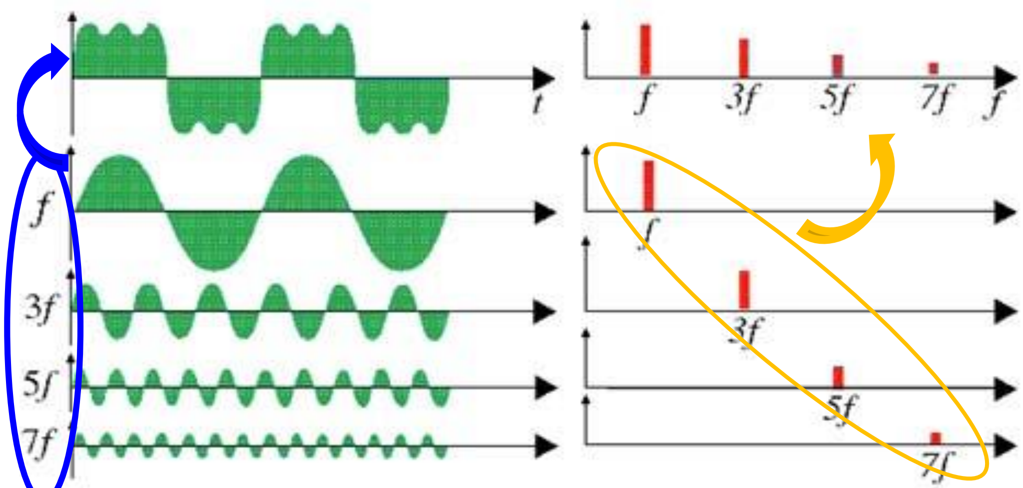
傅里叶级数表示

$$f(x)=\frac{4}{\pi}\sum_{n=1,3,5,\ldots}^{\infty}\frac{1}{n}\sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right).$$

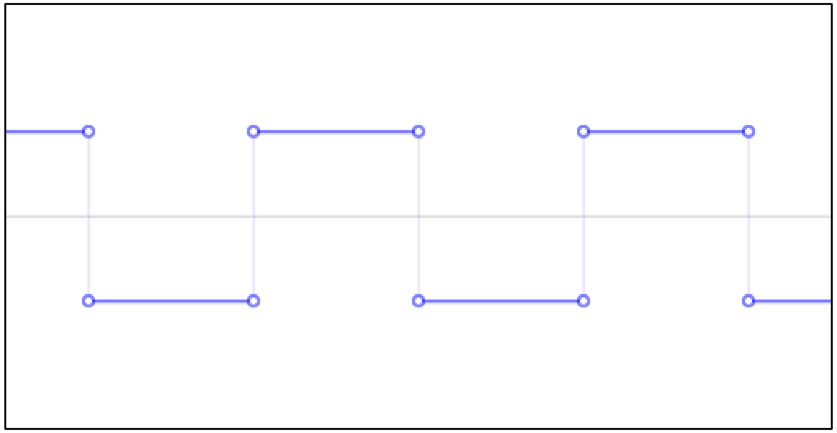
奇数

方波的时域与频域表示

$$s(t)=A\times\frac{4}{\pi}[\sin\omega_1 t+\frac{1}{3}\sin 3\omega_1 t+\frac{1}{5}\sin 5\omega_1 t+\frac{1}{7}\sin 7\omega_1 t]$$



a. Time domain b. Frequency domain



非周期信号的傅立叶变换

- 周期信号的频谱由离散的频率成份组成 (傅里叶级数)
- **非周期信号的频谱由连续的频率组成**
- **非周期信号的频谱由傅立叶变换来定义**

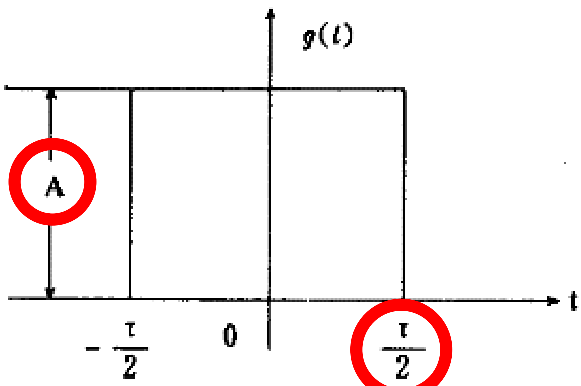
$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi f t}\, df$$

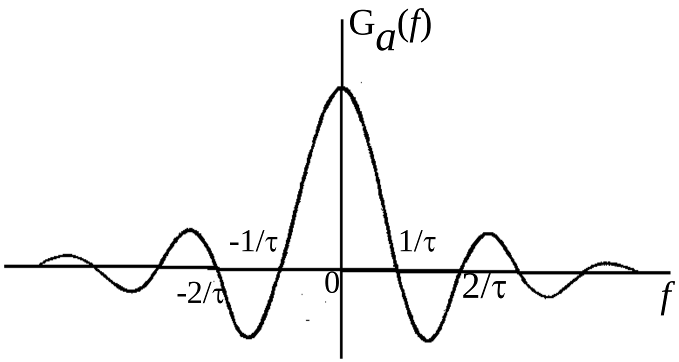
$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t}\, dt$$

（Page 601）

脉冲信号的傅立叶变换

Example





(b) $G_a(f)$

$$g_a(t) = \begin{cases} 1 & |t| \le \tau/2 \\ 0 & |t| > \tau/2 \end{cases}$$

$$G_a(f) = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} e^{-j2\pi ft} dt = \frac{1}{j2\pi f}(e^{j\pi f\tau} - e^{-j\pi f\tau}) = \frac{\sin(\pi f\tau)}{\pi f}$$

$$\boxed{\sin x = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i}}$$

数据传输

1. 概念与术语
    - 基本概念
    - 傅里叶分析
    - 频谱、带宽和数据率
2. 模拟与数字数据传输
3. 传输损伤
4. 信道容量

信号能量与功率

信号x(t)的能量和功率：当作为电压源或电流源的信号馈送到1欧姆电阻上时所发出的能量或功率。

能量(E_x)
$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt$$

功率(P_x)
$$P_x = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |x(t)|^2 dt$$

对周期信号，一个周期的平均功率为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^2 dt$$

信号的频谱与带宽

频谱

- 信号所包含的频率范围

绝对带宽

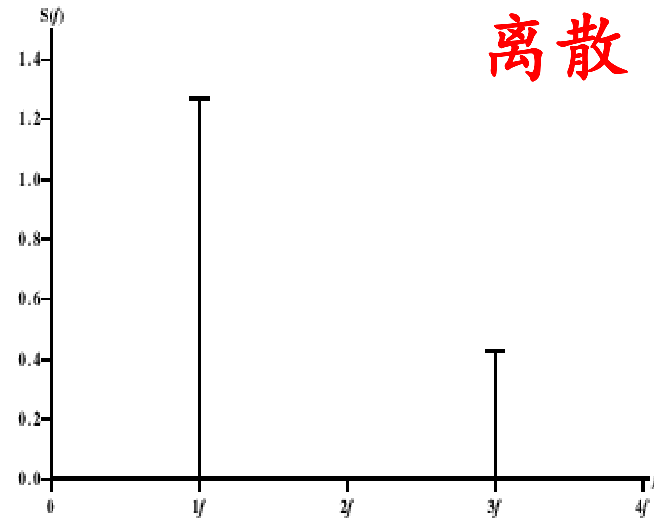
- 信号的频谱宽度

有效带宽

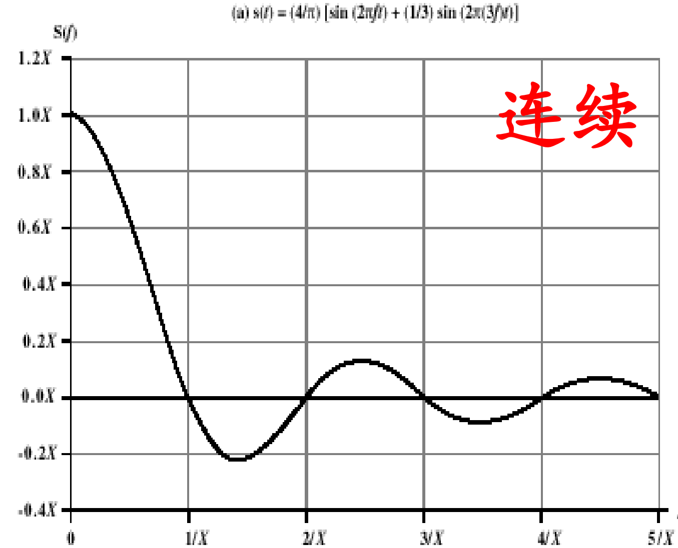
- 包含信号**绝大多数**能量的窄带
- 功率谱，半功率带宽(3dB带宽)

直流分量

- 信号中频率为零的成份



(a) $s(t) = (4/\pi)\,[\sin(2\pi ft) + (1/3)\sin(2\pi(3f)t)]$

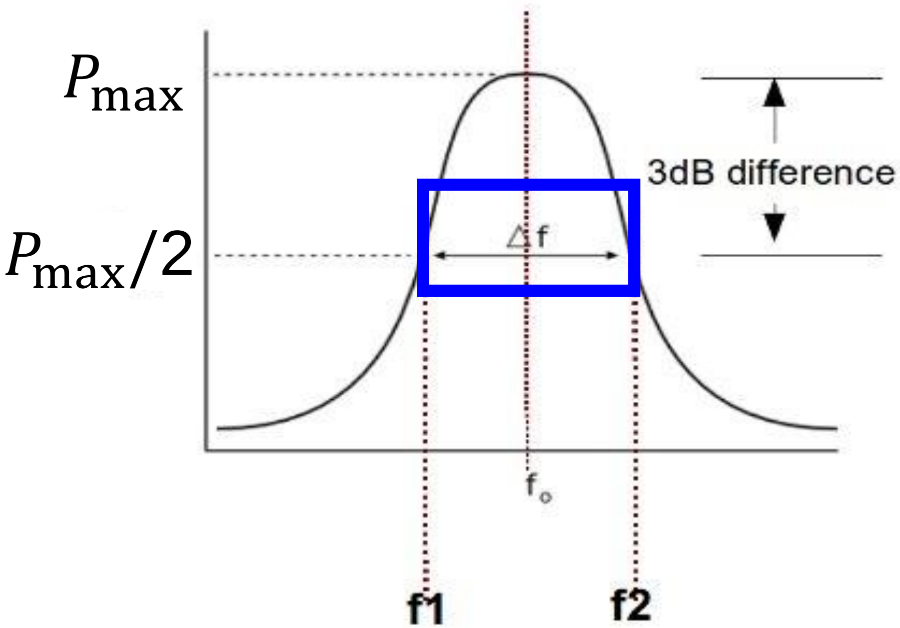


(b) $s(t) = 1 \quad -X/2 \le t \le X/2$

信号的半功率带宽--3dB带宽

半功率带宽：信号频率下降至其最大功率值的一半时，各频率之间的间隔。

- $P_{半功}=0.5P_{峰值}$，也就是说该区间边界的**功率值比峰值功率值低3dB；**
- 信号带宽值可取0.5倍峰值点形成的*f区间*。



0.3

$$10\lg\frac{P_{峰值}}{P_{半功}}=10\lg 2=3dB$$

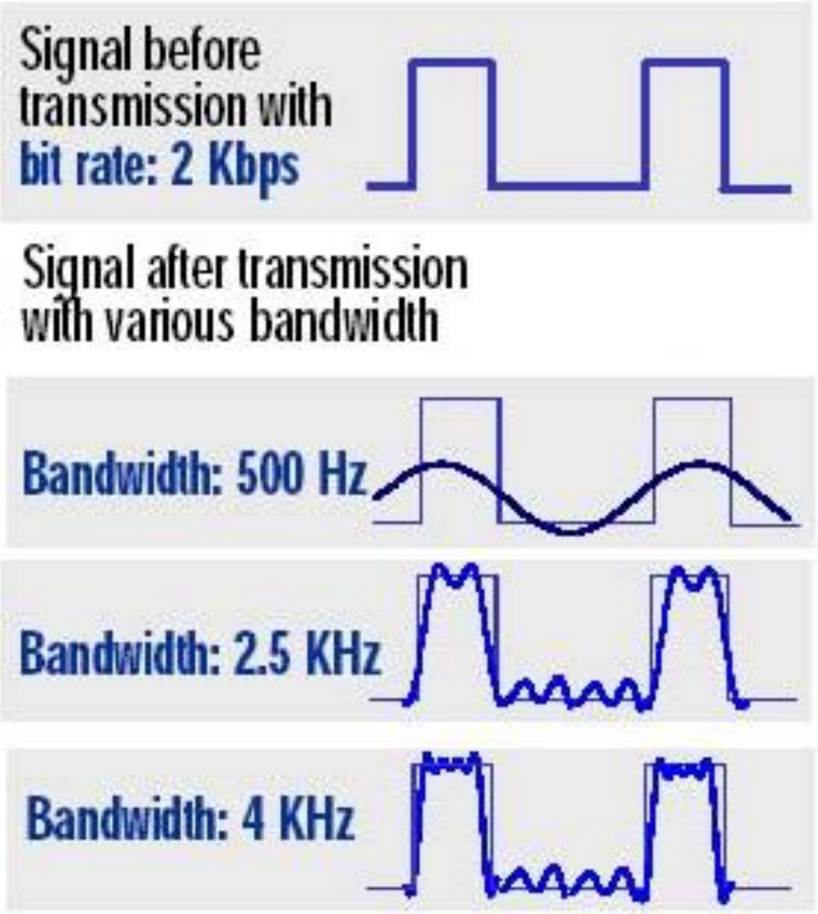
数据率与带宽

任何传输**系统**只能提供有限的带宽

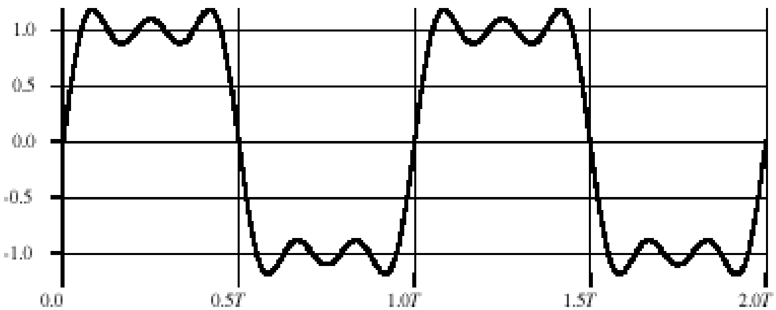
数字**信号**具有无限的带宽

数字信息近似为有限带宽信号

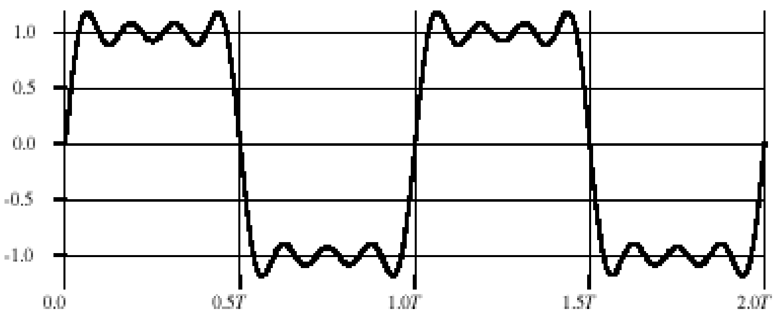
带宽限制影响数据率



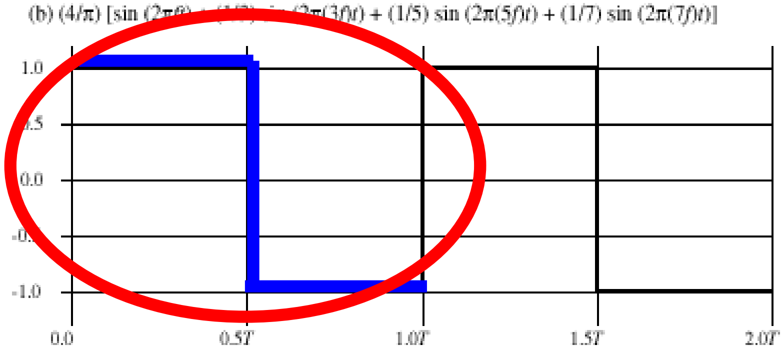
数据率与带宽的关系



(a) $(4/\pi)\,[\sin(2\pi ft) + (1/3)\sin(2\pi(3f)t) + (1/5)\sin(2\pi(5f)t)]$



(b) $(4/\pi)\,[\sin(2\pi ft) + (1/3)\sin(2\pi(3f)t) + (1/5)\sin(2\pi(5f)t) + (1/7)\sin(2\pi(7f)t)]$



(c) $(4/\pi)\sum(1/k)\sin(2\pi(kf)t)$, for k odd

数据率：

R_b=2比特/T=2f (bps), f是信号频率

有效带宽：

- 方波包含无限个频率成份
- 方波中第k个频率成份的振幅为1/k
- 可以将带宽限制在有限的频率成份上

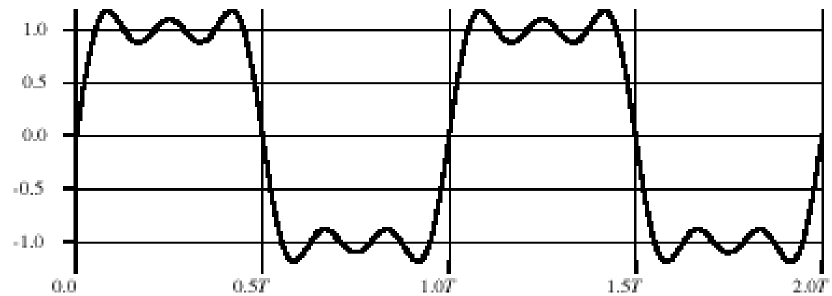
数据率与带宽（开源与节流）

- **例1：** Bandwidth=4MHz

$f = 1MHz,\ T = 1\mu s,$

$R_b = 2bits/1\mu s = 2Mbps$

$BW = 5f - f = 4f = 4MHz$



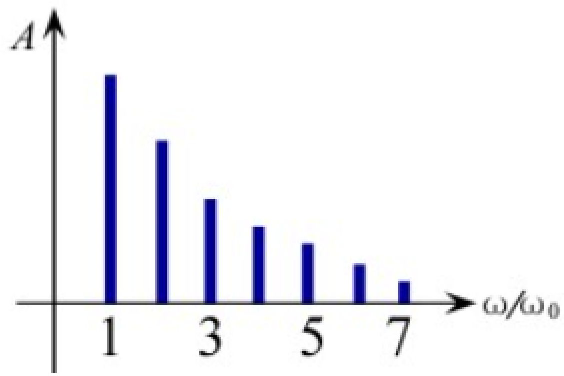
(a) (4/π) [sin (2πft) + (1/3) sin (2π(3f)t) + (1/5) sin (2π(5f)t)]

- **例2：** Bandwidth=8MHz

$f = 2MHz,\ T = 0.5\mu s,$

$R_b = 4bits/1\mu s = 4Mbps$

$BW = 5f - f = 4f = 8MHz$

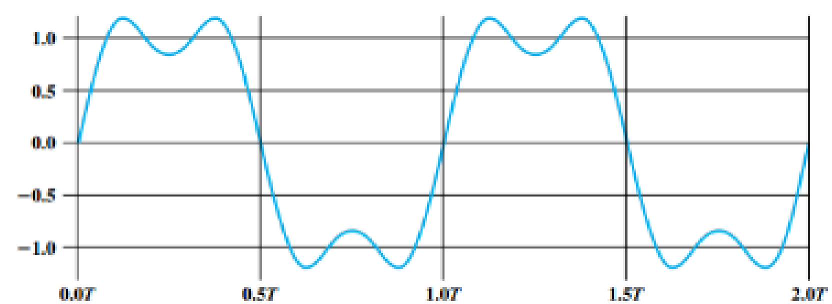


- **例3：** Bandwidth=4MHz

$f = 2MHz,\ T = 0.5\mu s,$

$BW = 3f - f = 2f = 4MHz$

$R_b = 4bits/1\mu s = 4Mbps$



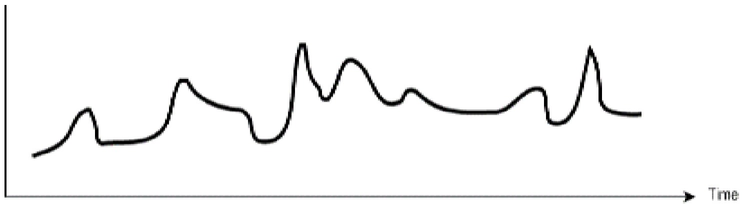
(c) (4/π) [sin(2πft) + (1/3)sin(2π(3f)t)]

数据传输

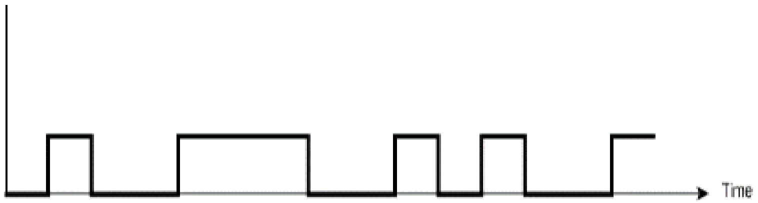
1. 概念与术语
   - 基本概念
   - 傅立叶分析
   - 频谱、带宽和数据率
2. 模拟与数字数据传输
3. 传输损伤
4. 信道容量

模拟/数字数据和模拟/数字信号

- 模拟与数字数据：
  - 模拟数据：一段时间内具有连续的值，如传感器数据(温度)
  - 数字数据：值是离散的，如计算机产生的数据(文本、数字)
- 模拟与数字信号
  - 模拟信号，连续变化的电磁波，可以在导向和非导向媒体传输，如音频信号
  - 数字信号，电压脉冲序列，在导向媒体传输，如文本编码（ASCII，GB）

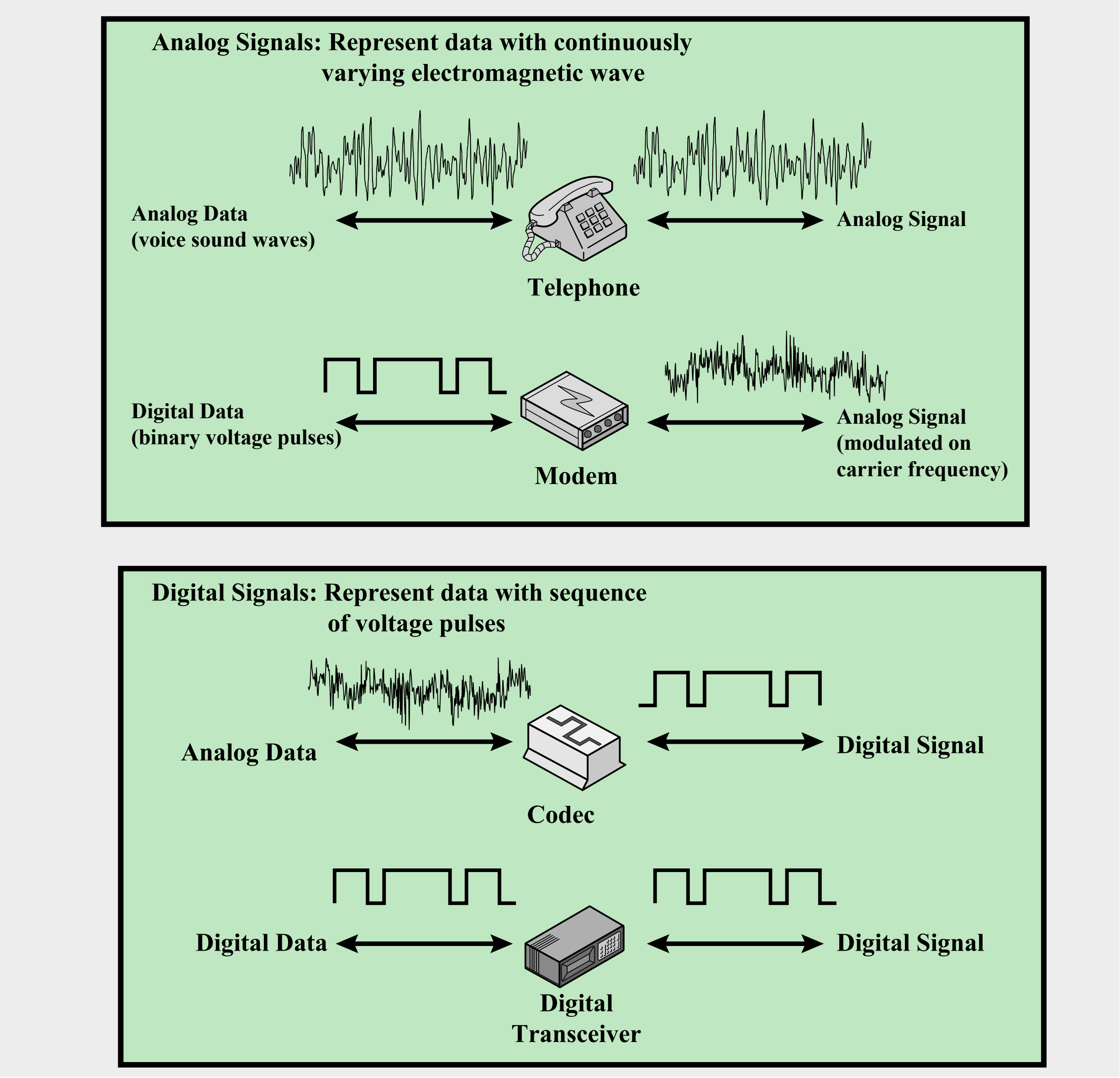


(a) Analog



(b) Digital

模拟/数字数据和模拟/数字信号



模拟传输和数字传输

模拟信号和数字信号均可在适当的传输媒体上传输。

- 模拟传输
  - 传输一段距离后，模拟信号会变得越来越弱（衰减）。
  - 模拟传输系统包括**放大器**，用于增强信号能量，完成远距离传输

- 数字传输
  - 数字信号受衰减、噪声以及其他损伤的影响
  - 使用**转发器**，进行远距离传输

模拟和数字传输

表3.1 模拟和数字传输

(a) 数据和信号

	模拟信号	数字信号
模拟数据	两种选择：(1) 信号与模拟数据占相同的频谱；(2) 模拟数据被编码后占不同的频谱段	模拟数据通过编解码器的编码产生数字比特流
数字数据	数字数据通过调制解调器产生模拟信号	两种选择：(1) 信号由两个电平组成，分别代表了两个二进制的值；(2) 数字数据被编码后产生具有所要求的属性的数字信号

(b) 对信号的处理

	模拟传输	数字传输
模拟信号	通过放大器来传播；不论信号是用来表示模拟数据的，还是数字数据的，处理方式相同	假设这个模拟信号表示的是数字数据，信号通过转发器传播。在每个转发器上，根据入口信号恢复数字数据，并用它来生成新的外出模拟信号
数字信号	不使用	数字信号表示的是0和1的比特流，它代表了数字数据，或者是经过编码的模拟数据。信号通过转发器传播。在每个转发器上，根据入口信号恢复数字数据，并用它来生成新的外出数字信号

数字信号传输的优势

目前普遍采用数字技术的原因

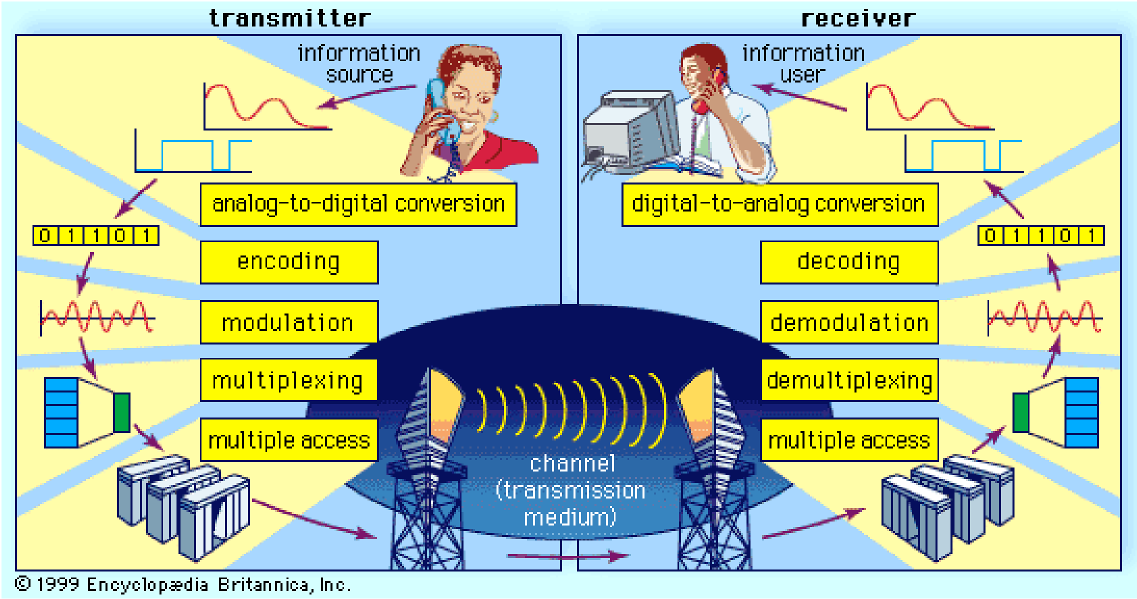
1. 数字技术

2. 数据完整性

3. 容量利用率

4. 安全和保密

5. 综合性

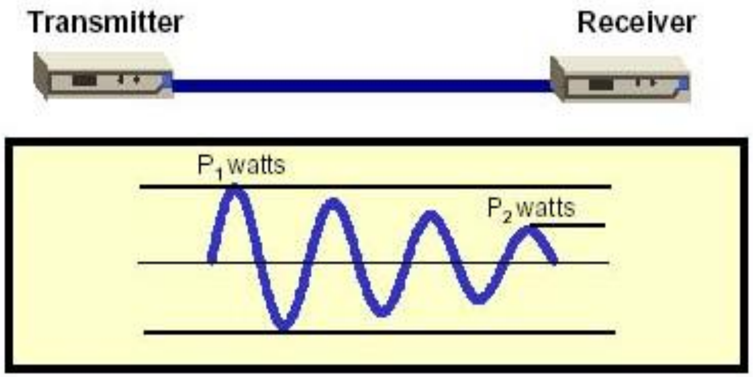


数据传输

1. 概念与术语
   - 基本概念
   - 傅立叶分析
   - 频谱、带宽和数据率
2. 模拟与数字数据传输
3. 传输损伤
4. 信道容量

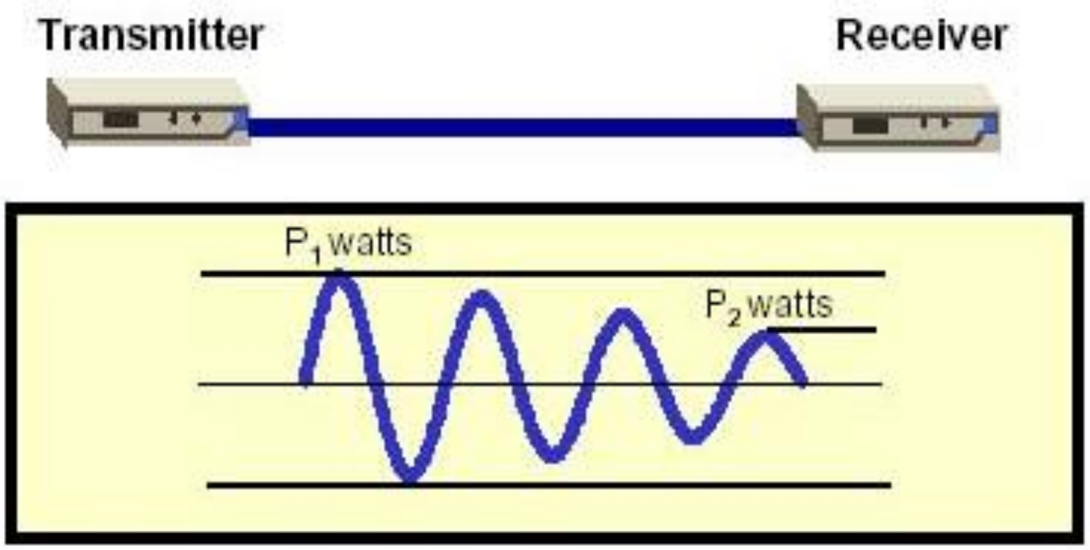
传输损伤

- 接收信号通常与发送信号不同:
  - 降低模拟信号质量（如话音）
  - 数字信号比特差错
- 主要考虑的损伤包括
  - 衰减
  - 失真
  - 噪声



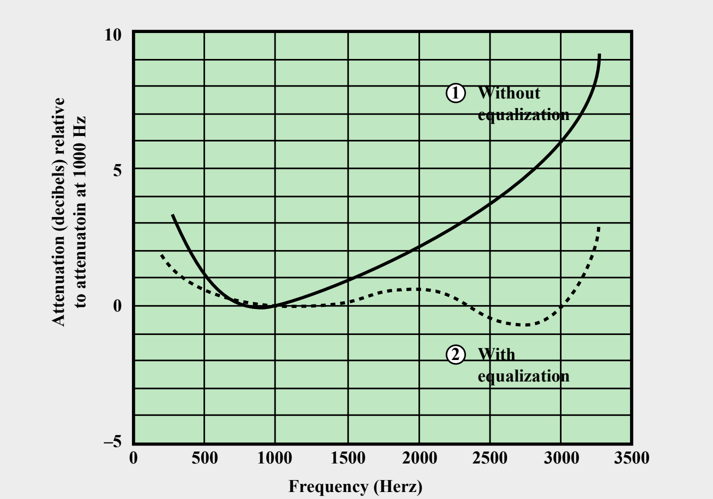
衰减

- 信号随着传输距离增加，强度不断减弱
- 由于衰减存在，传输工程需要考虑的因素：
  - 接收信号足够强，以便能够检测
  - 信号电平比噪声电平高
- 解决方法：放大器与转发器



衰减失真

- **频率**越高，衰减越严重（衰减失真）
  - 频率越小，传输损耗越小，覆盖距离越远，绕射能力越强。低频资源紧张，系统容量有限，用于广播，电视等系统
  - 频率越高，传播损耗越大，覆盖距离越小，绕射能力越弱。高频资源丰富，系统容量大，实现技术难度大，系统成品也相应提高

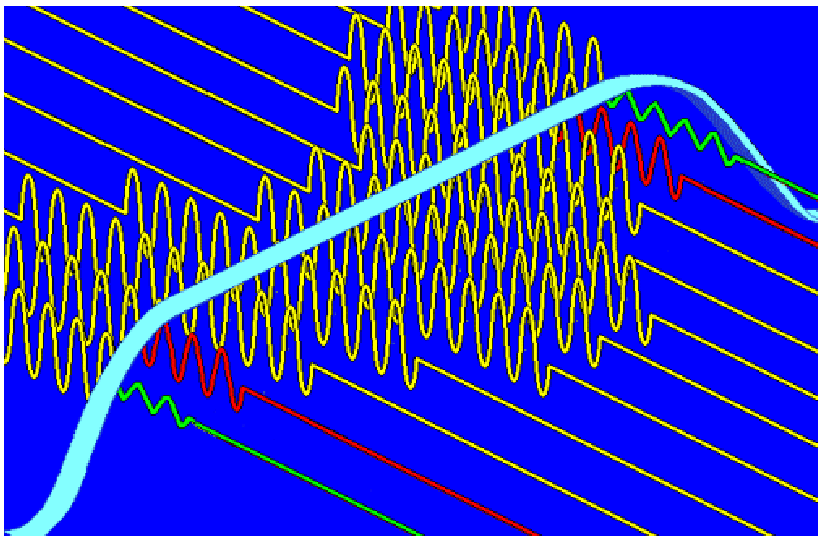


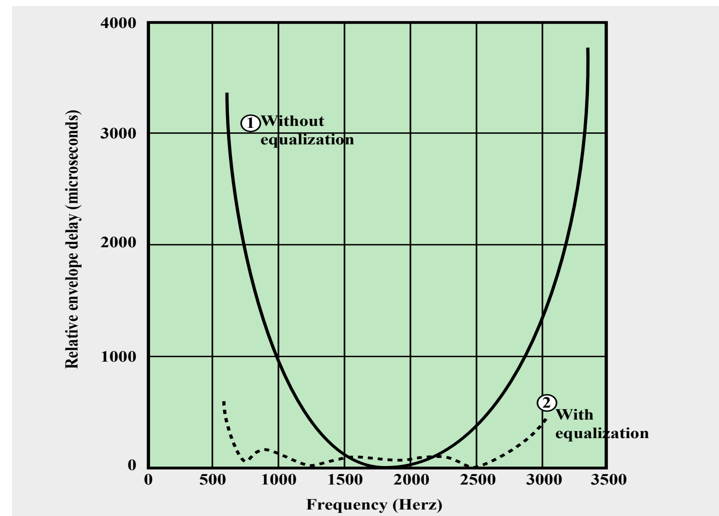
(a) Attenuation

- 衰减均衡技术
  - 改变线路的电气特性
- 放大器
  - 放大高频的倍数比放大低频的倍数要高

时延失真

- 在**导向媒体**上信号**传播速度**随频率的不同而改变
  - 靠近中心频率的地方传播速度快



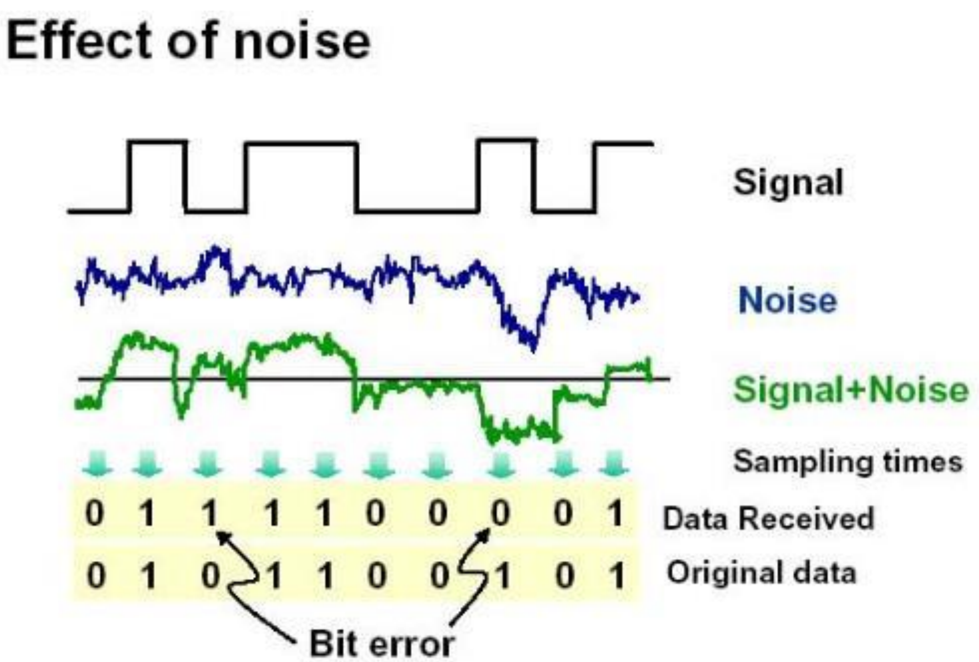


(b) Delay distortion

- 时延失真对数字信号影响严重
  - 码间串扰

噪声

- 噪声：传输系统中的无用信号
- 噪声是传输系统性能的主要制约因素



- 信噪比 Signal-to-Noise Ratio

$$SNR_{dB} = 10\lg\frac{S}{N}$$

S — 信号功率

N — 噪声功率

噪声

- 热噪声
  - 由电子的热运动造成
- 互调噪声
  - 由于在发送器、接收器存在非线性因素，或者时传输系统收到干扰产生互调噪声
- 串扰
  - 微波天线收到不需要的信号
- 冲击噪声
  - 外部电磁干扰（如雷电）以及通信系统本身的故障和缺陷引起

热噪声

- 由电子的热运动造成

- 热噪声均匀地分布在通信系统常用的频率范围内，因此通常称为白噪声。

- 热噪声的度量：1Hz带宽内存在的热噪声的值

$$N_0 = kT(W/Hz)$$

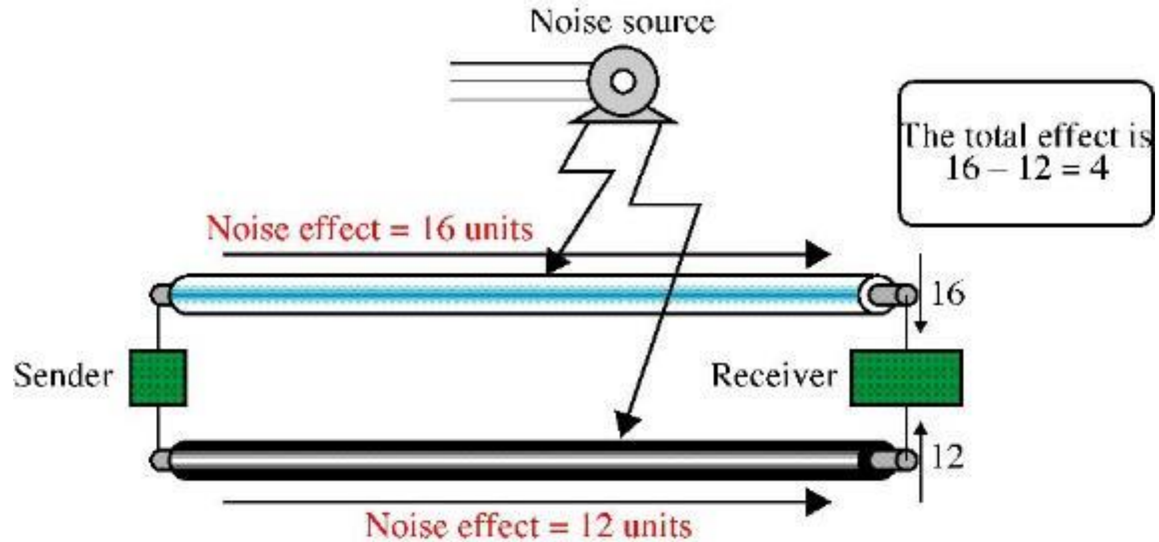
$N_0 =$ 噪声功率密度(W/Hz)

$k =$ 玻尔兹曼常量 $= 1.38 \times 10^{-23}$ J/K

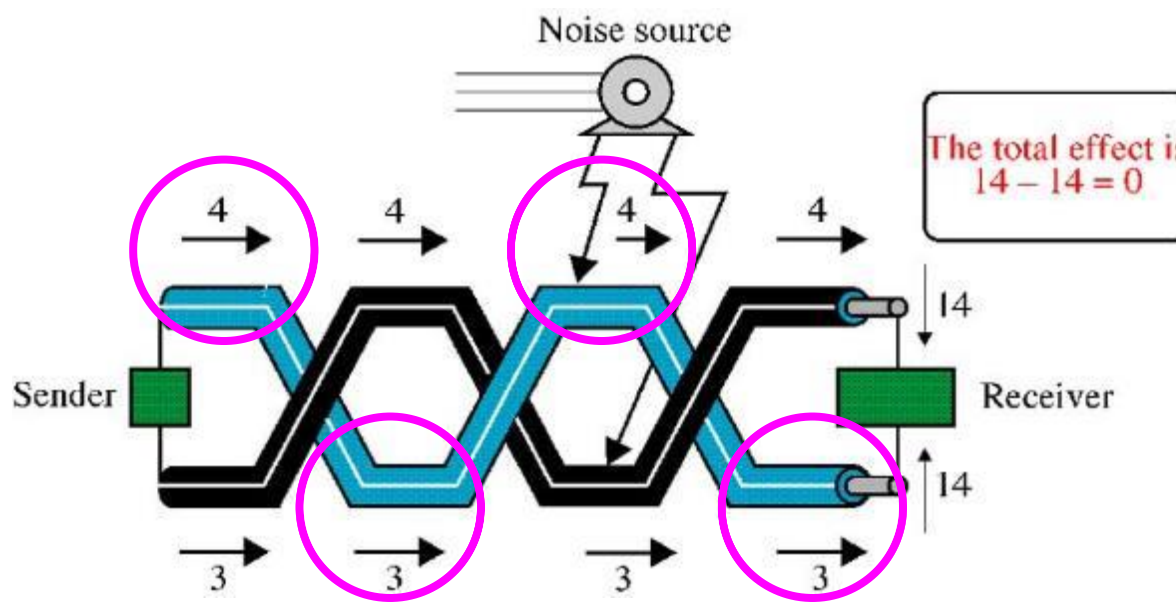
$T =$ 温度，以开尔文为单位（绝对温度），符号K表示1开尔文

串扰—双绞线

- 线缆间**串扰**：信号通道之间的耦合现象



- 双绞线的**扭绞结构**是为了减少相邻导线之间的串扰和消除外界干扰



数据传输

1. 概念与术语
   - 基本概念
   - 傅立叶分析
   - 频谱、带宽和数据率
2. 模拟与数字数据传输
3. 传输损伤
4. 信道容量

信道容量

给定条件下，某一通信信道上所能达到的**最大数据传输速率**

数据率:	带宽:	噪声:	误码率:
数据能够通信的速率，用比特每秒(bps)表示	在发送器和传输媒体的特性限制下的带宽，用赫兹或每秒的周数表示	通信通路上的平均噪声电平	差错发生率(0→1, 1→0)

奈奎斯特带宽

考虑**信道无噪声**的情况:

- 奈奎斯特带宽

如果信道带宽为B，那么可能实现的最大信号传输速率为2B

- 对于**二进制信号**，B Hz带宽能承载的数据率是$2B$ bps
  奈奎斯特带宽公式： $C = 2B$
- 对于**多进制信号**, 如M个信号电平，每个电平代表$\log_2 M$比特,
  奈奎斯特带宽公式: $C = 2B\log_2 M$

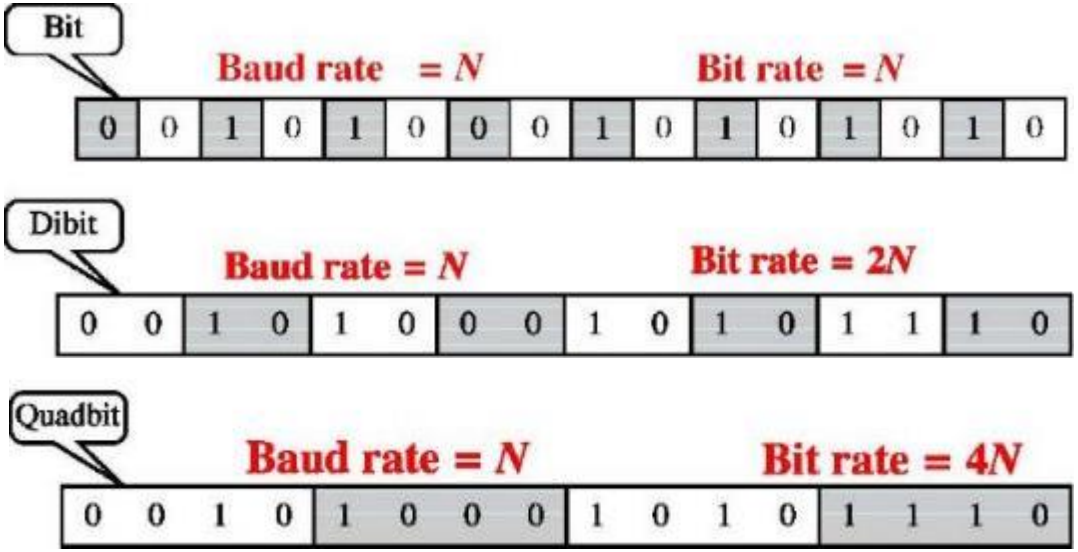
理想（极限）传输速率是对于无噪声的信道而言的，对于B Hz 的带宽，极限传输速率为2B 波特/秒，而不是2B bps，这跟调制方式有关，若采用二进制调制，则一个符号只能携带1bit信息，波特率就等于比特率，而对于多进制调制，一个符号可以携带多个比特的信息 [online]。

波特率 R_B与比特率 R_b

码元速率/调制速率/波特率 R_B

信息速率/数据率/比特率 R_b

$$R_b = R_B \log_2 M \ \ \text{bps}$$



- 给定带宽，可以增加信号电平数来增加比特率
  - 增加接收端的负担，噪声和其他损伤会限制M的取值

香农容量公式

考虑**噪声存在**（**高斯白噪声**）的情况:

- 噪声会影响信号，导致接收端错误判决，产生误比特
- 可以提高信号强度来抵御噪声的影响

- 定义信噪比 $\boxed{SNR_{db} = 10 \log_{10}(\text{信号功率/噪声功率})}$
  - 信号功率S可以通过信道传输模型获得
  - 高斯信道噪声功率与带宽成正比
    $N=N_0B$， N_0 每赫兹噪声功率密度W/Hz，常数

- 高斯信道的信噪比
  - $SNR = S/N_0B$

香农公式

- 香农给出了一个热噪声环境下的数据率上限

$$C = B\ \log_2(1+\mathrm{SNR})$$

  - C 是信道容量（bps）
  - B 是信道带宽
  - SNR 是信噪比 （注意 不是SNR_{db}）

- ➢ C 是理论最大值，实际值要小于香农容量
- ➢ 给定噪声值，可以通过增加**<u>信号强度</u>**和**<u>带宽</u>**提高数据率
- ➢ 增加信号强度，系统非线性程度提高，导致互调噪声
- ➢ 带宽增加，噪声也会增加，SNR反而下降

香农容量和奈奎斯特带宽的关系呢?

信道容量

- **增加B**

$$C_t = B\log_2\left(1+\frac{S}{n_0 B}\right) \qquad (b/s)$$

$$\boxed{C = 2B\log_2 M}$$

当$S\to\infty$，或$n_0\to 0$时，$C_t\to\infty$。

但是，当$B\to\infty$时，C_t将趋向何值？

令：$x = S/n_0 B$，上式可以改写为：

$$C_t = \frac{S}{n_0}\frac{Bn_0}{S}\log_2\left(1+\frac{S}{n_0 B}\right) = \frac{S}{n_0}\log_2(1+x)^{1/x}$$

利用关系式

$$\lim_{x\to 0}\ln(1+x)^{1/x} = 1 \qquad \log_2 a = \log_2 e\cdot\ln a$$

上式变为

$$\lim_{B\to\infty} C_t = \lim_{x\to 0}\frac{S}{n_0}\log_2(1+x)^{1/x} = \frac{S}{n_0}\log_2 e \approx \boxed{1.44\frac{S}{n_0}}$$

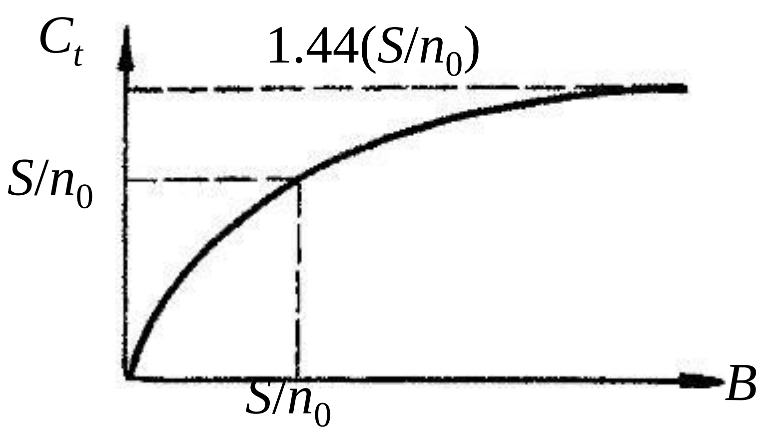
信道容量

- **增加*B***

$$\lim_{B\to\infty} C_t = \lim_{x\to 0}\frac{S}{n_0}\log_2(1+x)^{1/x} = \frac{S}{n_0}\log_2 e \approx 1.44\frac{S}{n_0}$$

上式表明，当给定S/n_0时，若带宽B趋于无穷大，信道容量不会趋于无限大，而只是S/n_0的1.44倍。这是因为当带宽B增大时，噪声功率也随之增大。

C_t和带宽B的关系曲线：



香农信道容量和带宽关系

信道容量

- **表达式E_b/n_0**

$$C_t = B\log_2\left(1+\frac{S}{n_0 B}\right) \qquad (b/s)$$

上式还可以改写成如下形式：

$$C_t = B\log_2\left(1+\frac{S}{n_0 B}\right) = B\log_2\left(1+\frac{E_b/T_b}{n_0 B}\right)$$

式中　$E_b = ST_b$ — 每比特能量；T_b = 每比特持续时间。

$\frac{E_b}{n_0}$ 更便于判别数字数据率和误码率，是度量数字通信系统性能好坏与否的标准

$$\frac{E_b}{n_0} = \frac{S/R}{n_0} = \frac{S}{kTR}$$

信道容量

[例]已知黑白电视图像信号每帧有30万个像素；每个像素有8个亮度电平；各电平独立地以等概率出现；图像每秒发送25帧。若要求接收图像信噪比达到30dB，试求所需传输带宽。

[解] 因为每个像素独立地以等概率取8个亮度电平，故每个像素的信息量为

$$I_p = -\log 2(1/8) = 3 \qquad (b/pix)$$

并且每帧图像的信息量为

$$I_F = 300{,}000 \times 3 = 900{,}000 \qquad (b/F)$$

因为每秒传输25帧图像，所以要求传输速率为

$$R_b = 900{,}000 \times 25 = 22{,}500{,}000 = 22.5 \times 106 \quad (b/s)$$

信道的容量C_t必须不小于此R_b值。将上述数值代入式：$C_t = B\log_2(1 + S/N)$

得到 $22.5 \times 106 = B\log_2(1 + 1000) \approx 9.97 \;\; B$

最后得出所需带宽

$$B = (22.5 \times 106) / 9.97 \approx 2.26 \quad (MHz)$$

课程习题（作业）

课本（截止日期：习题课前）：

3.5　3.6　3.12　3.13　3.16

3.18　3.20　3.21　3.22

提交方式：http://cslabcms.nju.edu.cn（本科教学支撑平台）

提交截止时间	2021年04月24日 星期六 23:55

- 命名：学号+姓名+第*章。
- 若提交遇到问题请及时发邮件或在下一次上课时反馈。

课程习题（作业）

3.5 如果图3.17中实线代表$\sin(2\pi t)$，那么虚线代表什么？也就是说，虚线可以写成$A\sin(2\pi ft+\phi)$，那么其中的A、f和ϕ分别是多少？

3.6 请将信号$(1+0.1\cos 5t)\cos 100t$分解为正弦函数的线性组合，并指出其中每个正弦成分的振幅、频率和相位。提示：使用$\cos a\cos b$的恒等变形。

3.7 指出函数$f(t)=(10\cos t)^2$的周期。

3.8 假设有两个周期函数$f_1(t)$和$f_2(t)$，周期分别为T_1和T_2。那么函数$f(t)=f_1(t)+f_2(t)$是否也永远为周期函数？如果是，请证明。如果不是，那么在什么条件下$f(t)$是周期函数？

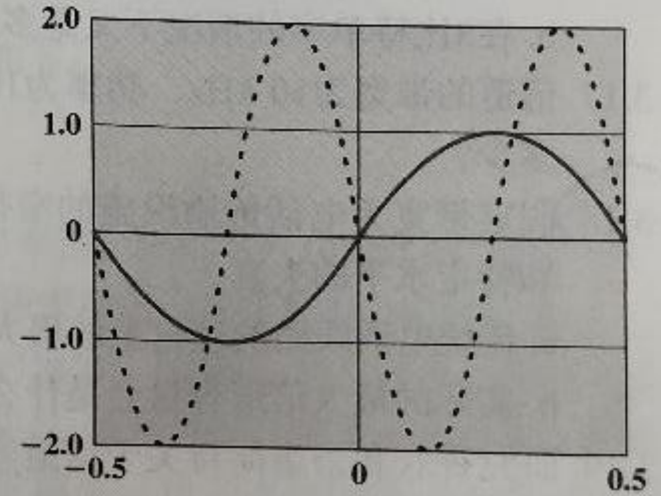


图3.17　习题3.5 的图示

课程习题（作业）

认为它是如何做到这一点的？

3.12 通常，医学数字影像的超声波检查包含从全动态超声波检查中提取的大约25幅图像。每幅图像由512 × 512个像素组成，其中每个像素使用8比特强度信息。

a. 这25幅图像共有多少比特？

b. 然而，理想情况下医生希望以30 fps（每秒帧）的速度使用512 × 512个像素，每像素8比特的帧。忽略所有可能的压缩和额外开销的因素，要维持这种全动态超声波所需的最小信道容量是多少？

c. 假设每次全动态检查包含25 s时长的帧，那么以未压缩形式存储一次检查需要多少字节的存储空间？

3.13 a. 假设数字化电视画面从源点发送时使用的是480 × 500的像素矩阵。其中每个像素可携带32种强度值中的一种。假设每秒发送30幅画面（此数字源大致相当于广播电视已采纳的标准），计算源点的数据率*R*（单位为bps）。

b. 假设该画面通过带宽为4.5 MHz，信噪比为35 dB的信道传输。计算这个信道容量（单位为bps）。

c. 假设(a)题中的每个像素从10个强度值中选一种，并且可以是三种颜色之一（红、绿、蓝）。请说明这种修改对传输的数字化图像属性会带来什么影响，图像传输速率是多少？

3.14 假定一个放大器的有效噪声温度为10 000 K，带宽为10 MHz，其输出端的热噪声值（以dBW为单位）估计为多少？

课程习题（作业）

道的容量是多少?

3.16 一个数字信号发送系统要求工作在9600 bps。

a. 如果一个信号单元可对一个4比特单字编码，那么所需要的最小信道带宽为多少?

b. 在8比特单字的情况下又是多少?

3.17 信道的带宽为10 kHz，功率为1000 W，操作环境温度为50℃，则这个信道的热噪声值为多少?

3.18 假定带宽为电话传输设施的窄带（可用）音频带宽，标称的SNR值为56 dB（400 000）和特定水平的失真。

a. 传统电话线路的理论上的最大信道容量（kbps）是多少?

b. 实际的最大信道容量会是什么样的呢?

3.19 研究香农和奈奎斯特关于信道容量的理论，两者从不同的角度出发，为信道的比特率设置了上限。它们两者之间的关系是什么?

3.20 假设一个信道的~~容量~~为1 MHz，SNR为63。 带宽

a. 该信道的数据率上限是多少?

b. (a)问题得到的是一个上限。但实际上，较低的数据率可以得到较好的差错表现。假设我们选择的数据率为最高理论上限的2/3。若要达到这个数据率，需要有几个电平的信号?

课程习题（作业）

3.21 假设信道所要达到的容量为20 Mbps，信道的带宽为3 MHz，且噪声为白（热）噪声，为了达到这一信道容量，要求信噪比为多少？

3.22 图3.7(c)中的方波周期为$T = 1$ ms，经过了一个允许8 kHz以下的频率无衰减通过的低通滤波器。

a. 计算输出波形的功率。

b. 假设这个滤波器的输入中有热噪声电压，且其$N_0 = 0.1\ \mu W/Hz$，计算以分贝为单位的输出信噪比。

3.23 假设某数字系统接收到的信号值是−151 dBW，接收系统的有效噪声温度是1500 K。对于一个传输速率为2400 bps的链路，其E_b/N_0是多少？

总结

问题？

殷亚凤
yafeng@nju.edu.cn
http://cs.nju.edu.cn/yafeng/
Room 901, Building of CS