

现代通信技术概论

第1章 绪论

通信是人类文明发展史中永恒的话题，它是把消息从信源传送到信宿的一个过程。

本章将在简要回顾国内外通信发展史的基础上，对与通信系统技术相关的一些经典的基础知识进行介绍。主要内容包括通信信号、系统模型与指标、系统的分类、系统传输方式、信道特性和调制解调等基本概念。通过本章的学习，将在整体上初步建立起关于通信的一些基本概念。

第1章 绪论

1.1 通信发展简史

1.2 信号与通信

1.3 通信系统的模型与指标

1.4 通信系统的分类

1.5 通信系统的传输方式

1.6 通信信道

1.7 调制与解调

1.1 通信发展简史

现代通信源于西方科技的发展与进步，通信发展史也是一部人类科技进步史。

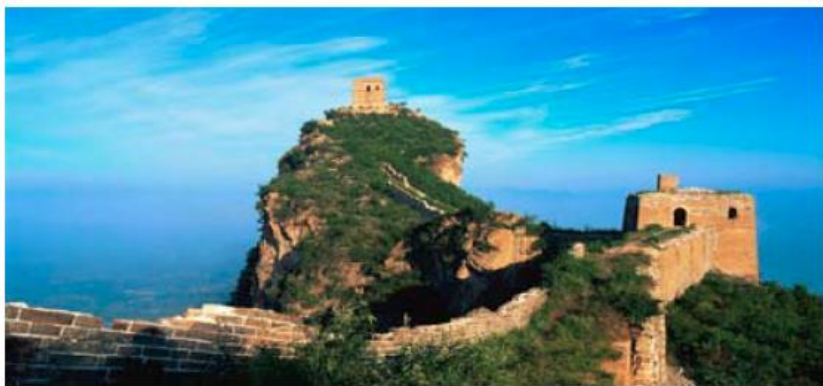
我国通信事业经历了从早期非常落后到后来跨越式发展的变化历程，目前已经处于世界先进国家行列。

了解通信发展史将有助于我们更深入地认识过去、把握现状、展望未来。

1.1.1 国际通信发展简史

19世纪中叶以后，由于电报、电话的发明以及电磁波的发现，人类的通信手段发生了根本性的变革，开创了电气通信新时代。随着科技水平的不断提高，相继出现了无线电、固定电话、移动电话、互联网等各种通信手段，真正让神话传说中的“千里眼”、“顺风耳”变成了现实。

古代通信



“烽火戏诸侯”



“烽火连三月，家书抵万金”

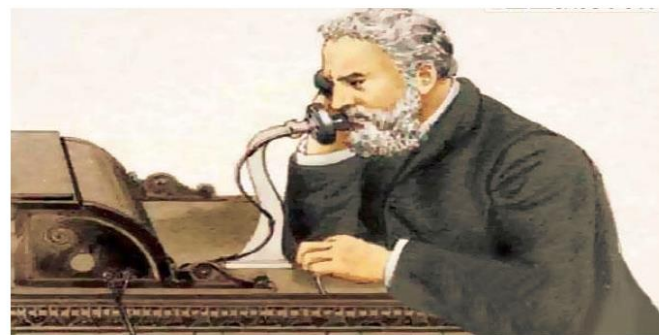
电、电报、电话机的发明

- ◆**1831**年，法拉第发现了磁生电现象。
- ◆**1837**年，莫尔斯发明了电报机。
- ◆**1864**年，麦克斯韦预言电磁波的存在。
- ◆**1875**年，贝尔发明电话机。

■1837年，莫尔斯电码（Morse code）



■1876年，贝尔发明了电话



1876 年，贝尔在演示使用电话

计算机、光通信和互联网的发明

- ◆ **1946**年，世界上第一台电子计算机诞生。
- ◆ **1947**年，贝尔实验室发明蜂窝移动通信。
- ◆ **1966**年，英籍华人高锟提出光通信的设想。
- ◆ **1969**年，**ARPA**网形成互联网雏形。
- ◆ **1993**年，美国政府提出了建设国家“信息高速公路”的建设计划，从此进入互联网时代。
- ◆ **2008**年，第一部运行**Android**操作系统的手机诞生，手机通信实现智能化。

光通信、移动电话、互联网是现代通信的重要标志，计算机技术在通信领域的广泛应用使得二者密不可分。

1.1.2.国内通信发展简史

1980年代以前，国内通信水平十分落后。

改革开放之后，随着人们对通信需求的日益膨胀，我国通信业务以超常规、成倍数、跳跃式的发展速度和发展规模，取得了令世人瞩目的成就。

鼓励引进、消化与吸收

1982年，福州开通了第一套万门程控交换机。

1984年，东方红二号同步通信卫星发射成功。

1986年，国家对通信技术设备进口减免**10**年关税。

1991年，以大唐、中兴、华为等为代表的民族通信制造业实现了群体突破。

1993年，公用分组交换网（**CHINAPAC**）开通。

1994年，广东开通**GSM**数字蜂窝移动电话网。

1998年，**TD-SCDMA**标准成为第一个具有自主知识产权的无线通信国际标准

形成良性竞争，争取自有知识产权

2002年，中国移动迈入**2.5G**时代。

2006年，**TD-SCDMA**成为国家通信行业标准。

2009年初，**3G**牌照正式发放，标志**3G**普及阶段到来。

2010年，全球首个具有**4G**特征的**TD-LTE**演示网在上海世博园建成开通。

2012年进入**TD-LTE**技术成熟期。

目前我国通信行业已形成中国移动、联通、电信等几大运营商互相竞争互相合作的格局。中国移动用户总数世界第一，移动和固话用户总数合计接近**10**亿。互联网用户总数超过**3**亿，我国成为世界上名副其实的通信大国。

1.2 信号与通信

通信系统传送的是消息，而消息只有附着在某种物理形式的“载体”上才能够得以传送。这类物理形式的“载体”，通常表现为电或光信号的形式。

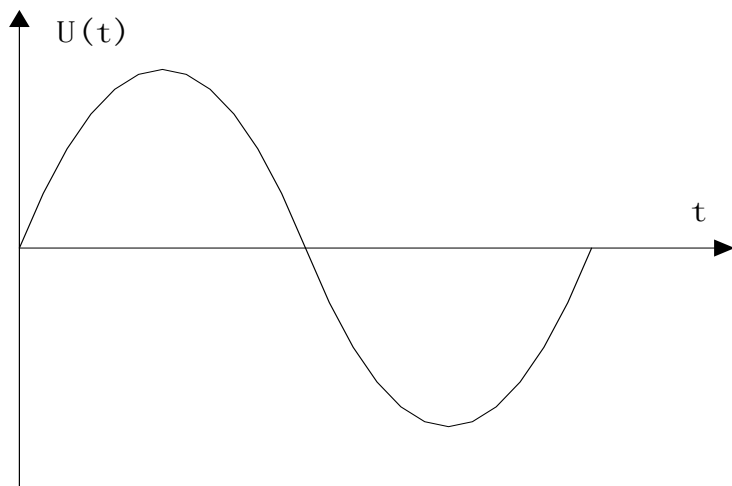
通信过程可以理解为变化的消息信号对“载体”信号施加“影响”并让接收端能够“感知到”这个影响，从而检测并获得消息。

1.2.1 模拟信号与数字信号

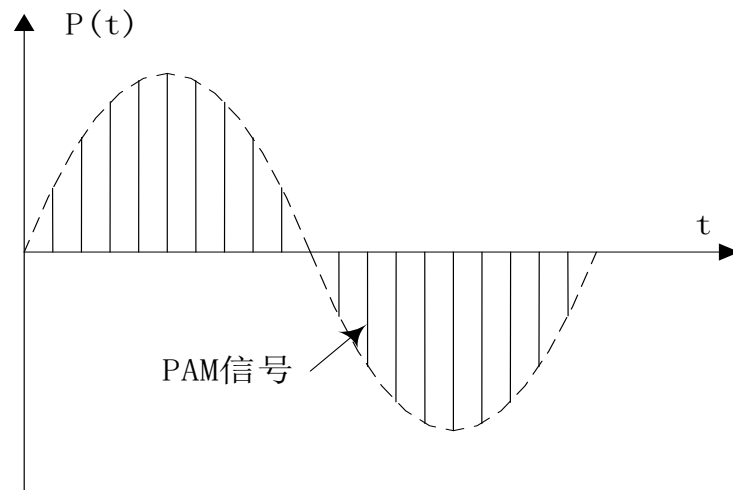
信号的分类方法有很多种，例如，按照信号的形成机理分为光信号和电信号；按照形状分为正弦波、方波、锯齿波等；按照幅度上的离散性分为模拟信号与数字信号。

模拟信号

幅度在某一范围内可以连续取值的信号，称为模拟信号。典型的模拟信号如下：



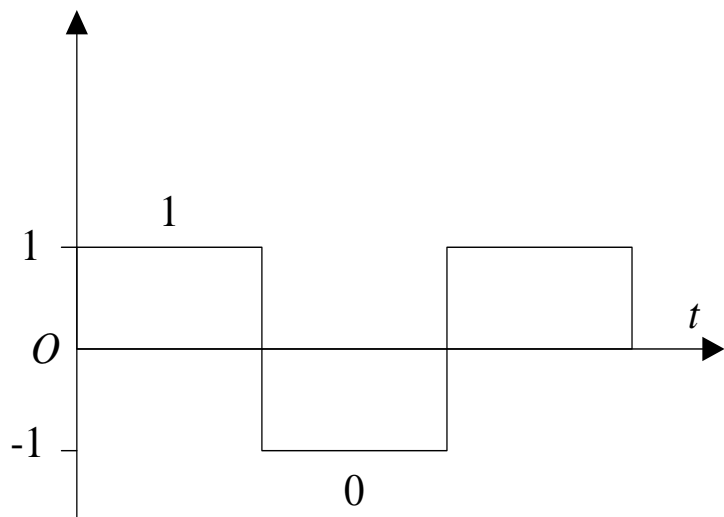
(a) 时间和幅值都连续



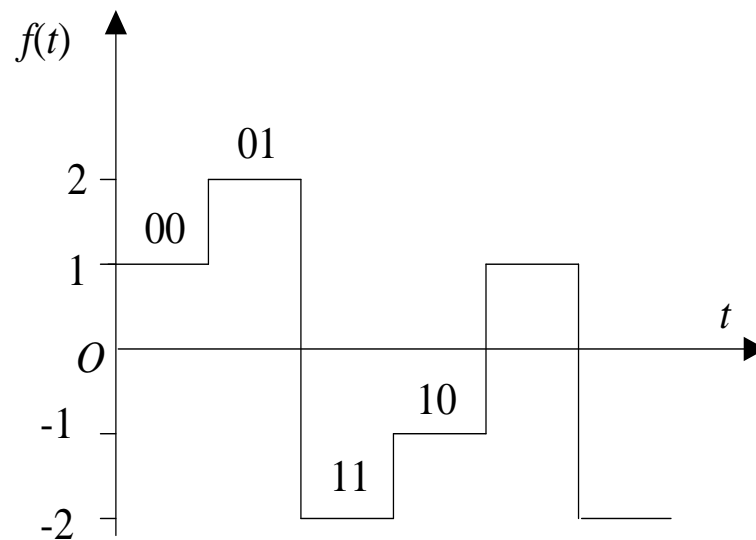
(b) 时间离散但幅值仍连续

数字信号

幅度仅能够取有限个离散值的信号称为数字信号。典型的数字信号如下：



(a) 二进制数字信号



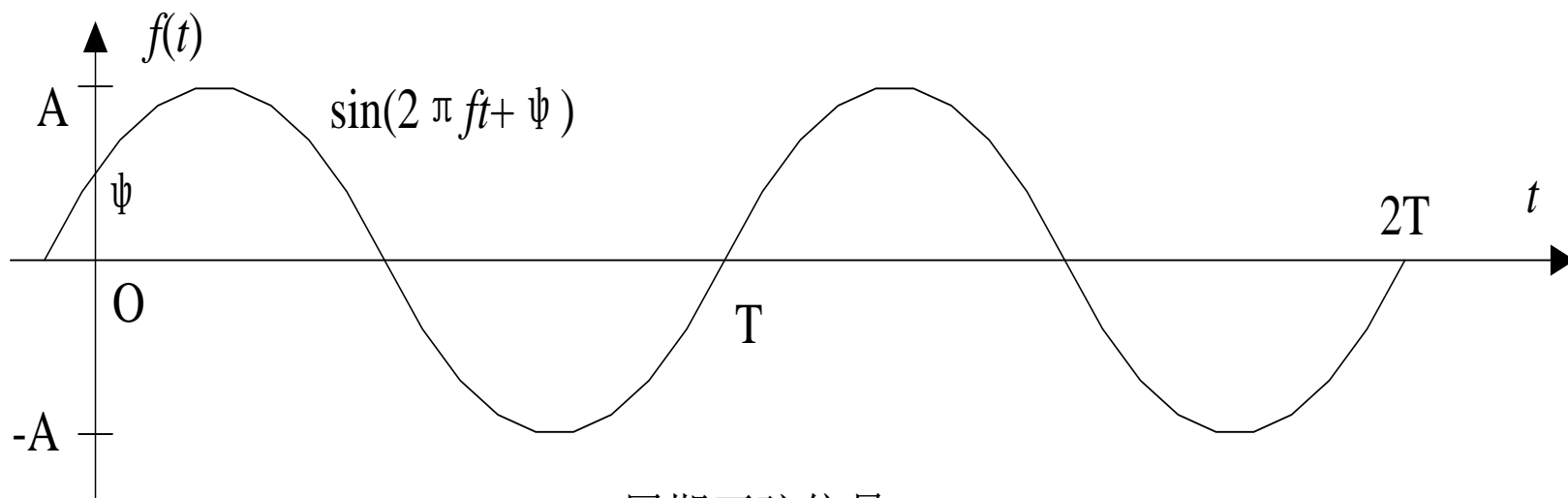
(b) 四进制数字信号

1.2.2 信号的时域和频域特性

信号的时域特性和频域特性是分别从时间和频率两个角度对同一个信号的描述。

周期正弦信号

周期正弦信号 $u(t)=A \sin(2\pi ft+\psi)$ 是一种频率单一、幅值固定的模拟信号，三个参量 A 、 f 、 ψ 常被用作“携带”（载波）消息。

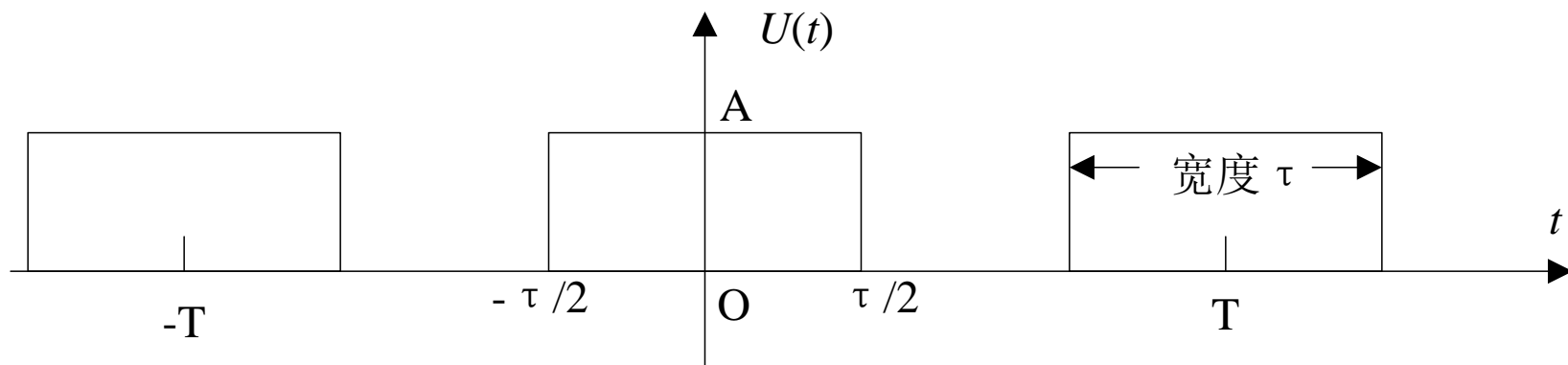


(a) 周期正弦信号

周期脉冲信号

周期脉冲数字信号是一种幅度为A、周期为T、宽度为 τ 的重复出现的矩形波。

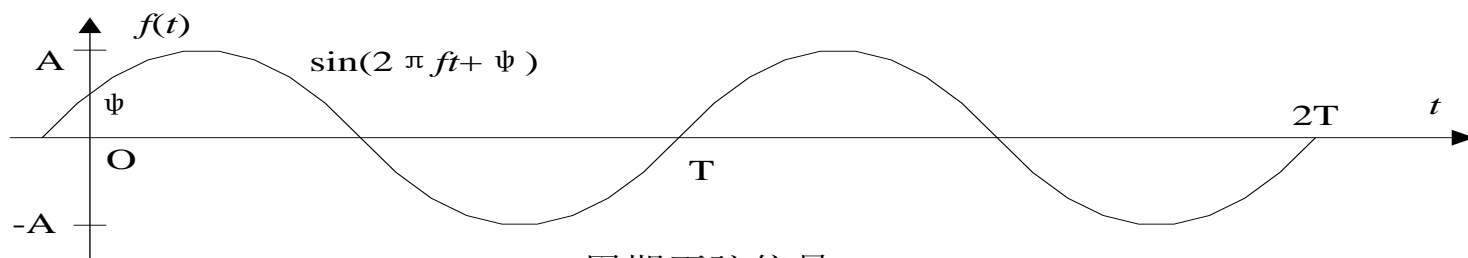
$$u(t)=\begin{cases} A & (-\frac{\tau}{2}+nT \leq t < nT+\frac{\tau}{2}, n \in \square) \\ 0 & \text{其它时间} \end{cases}$$



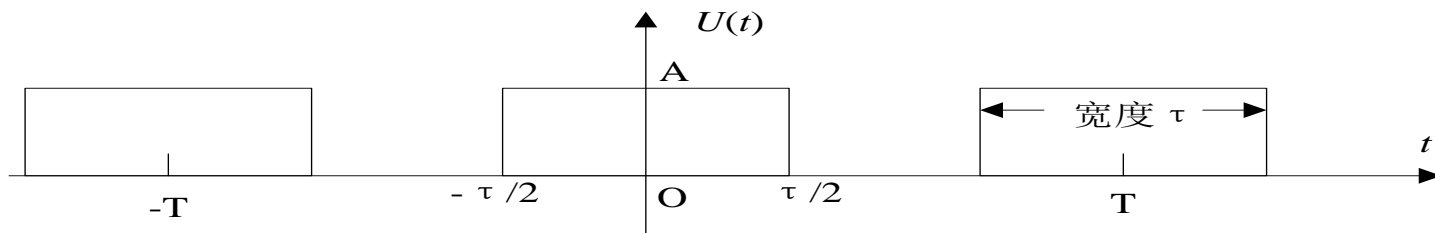
(b) 周期脉冲信号

信号的时域特性

时域特性表达的是信号幅度和相位随时间变化的规律，简称为幅时特性。



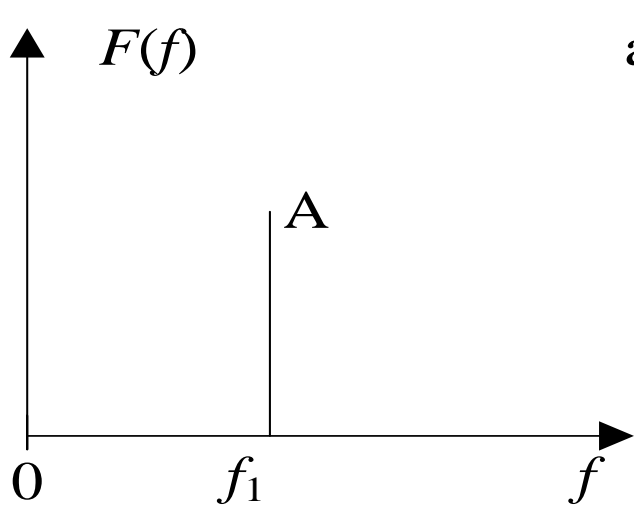
(a) 周期正弦信号



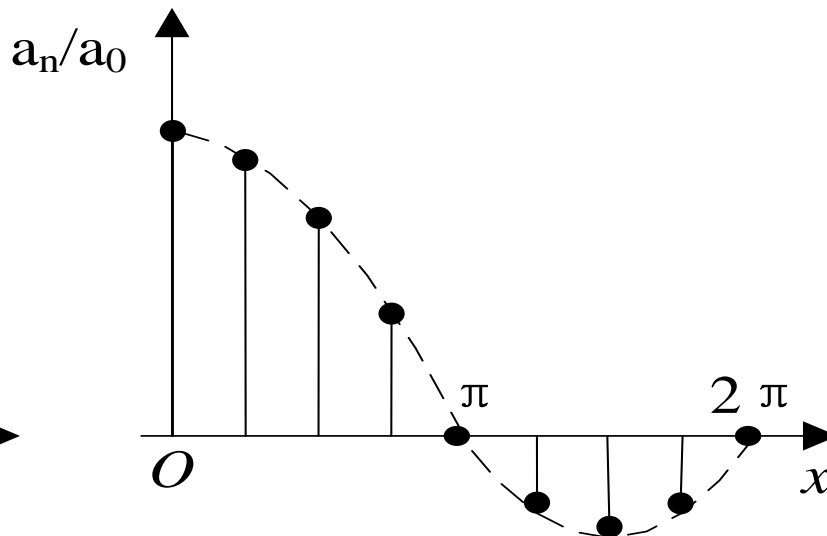
(b) 周期脉冲信号

信号的频域特性

信号的频域特性表达的是信号幅度和相位随频率变化的规律。



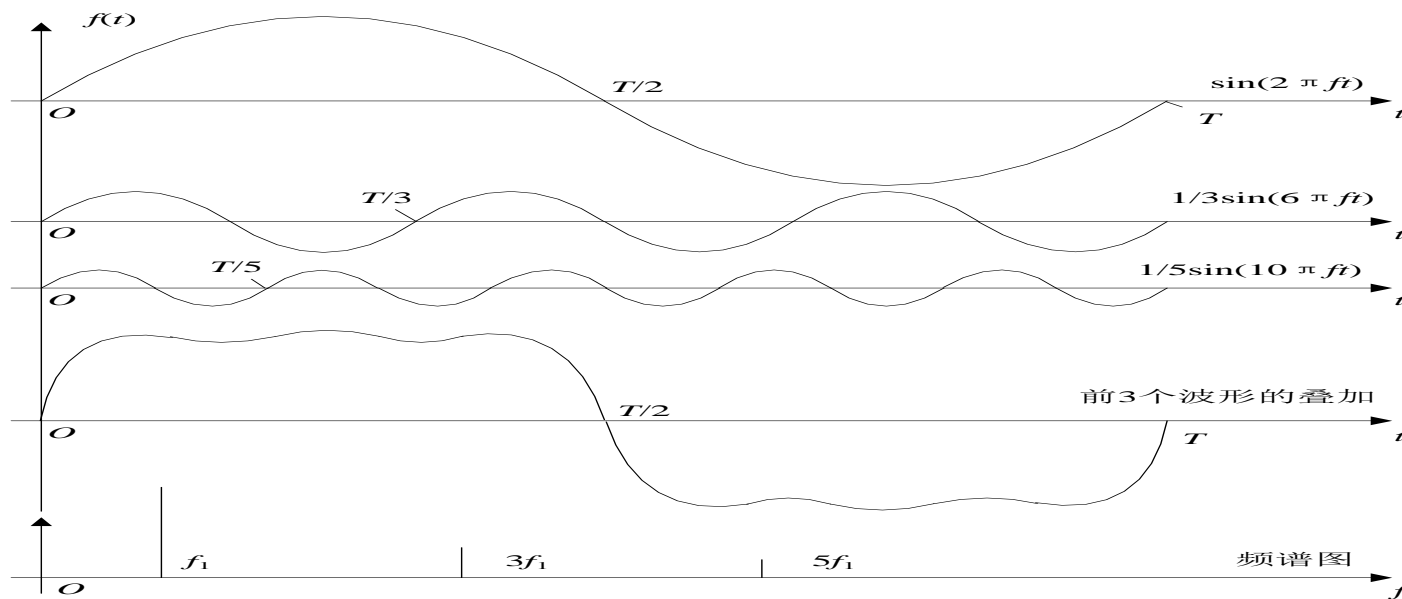
(a) 周期正弦信号的频谱



(b) 周期脉冲信号的频谱

周期脉冲信号的频谱分析

根据傅立叶级数理论，任意周期函数 $u(t)$ 均可分解为直流分量和无限多个正弦及余弦分量之和。



正弦信号谐波分量叠加逼近矩形波信号

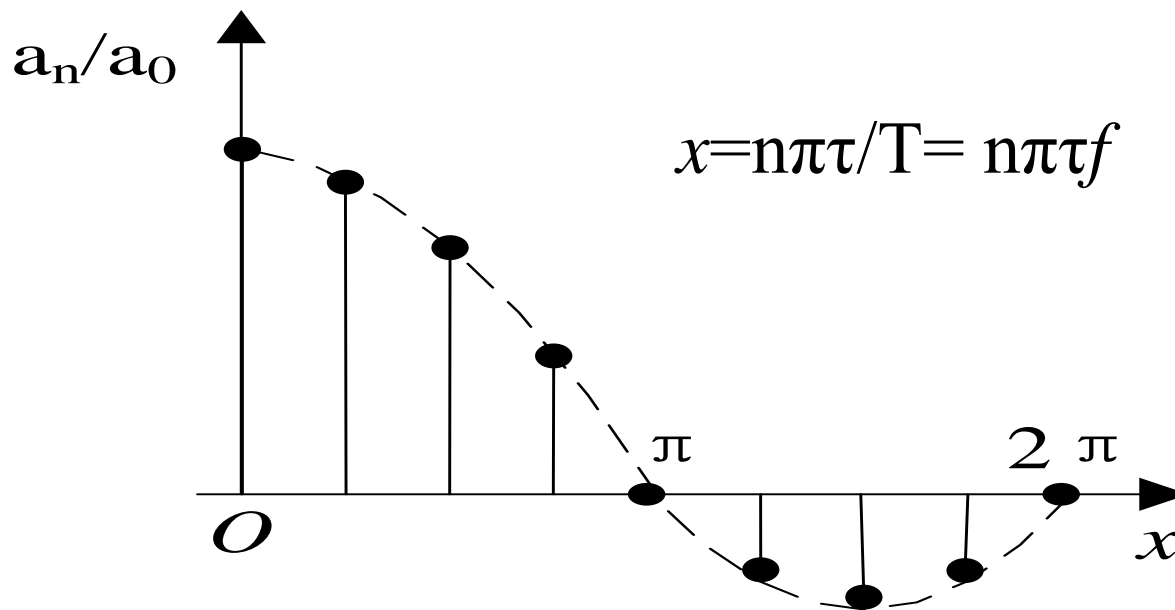
1.2.3 信号的带宽

把一个信号所包含谐波的最高频率 f_h 与最低频率 f_l 之差，即该信号所拥有的频率范围，定义为该信号的带宽。

例如，单一频率的正弦波带宽为0，而周期脉冲方波带宽是最高次谐波与最低次谐波之差。

数字通信传输近似周期方波信号，因此分析其带宽具有重要现实意义。

周期脉冲方波信号频谱



(b) 周期脉冲信号的频谱

周期脉冲方波带宽分析

1) 频谱是离散的 n 次谐波分量的叠加，谱线间隔为 Ω ； 2) 各次谐波分量正比于 A 和 τ ，反比于 T ，受包络线 $\sin x/x$ 的限制； 3) 当 $x \rightarrow \infty$ 时，谱线摆动于正负值之间 $\rightarrow 0$ ； 4) 随谐波次数的增高，幅度越来越小，可近似认为信号绝大部分能量都集中在第一个过零点 $f=1/\tau$ ($x=\pi$) 左侧的频率范围内。

$$u(t) = \frac{A\tau}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2A\tau}{T} \frac{\sin x}{x} \cos \frac{2t}{\tau} x$$

周期脉冲方波信号带宽分析

通常把第一个过零点左侧的频率范围称为有效带宽： $B=1/\tau$

重要结论：信号带宽与方波宽度成反比。即方波越窄（ τ 越小）所占用的带宽就越宽。

1.2.4 信号的衰耗与增益

信号在传输过程中若输出端功率小于输入端功率，则称信号受到了衰耗（减）；若输出端功率大于输入端功率，则称信号得到了增益，定义为：

$$d = 10 \lg \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad \text{dB (分贝)}$$

例如，把10mW功率信号加到输入端并在输出端测得功率5mW，得衰耗约为3dB。

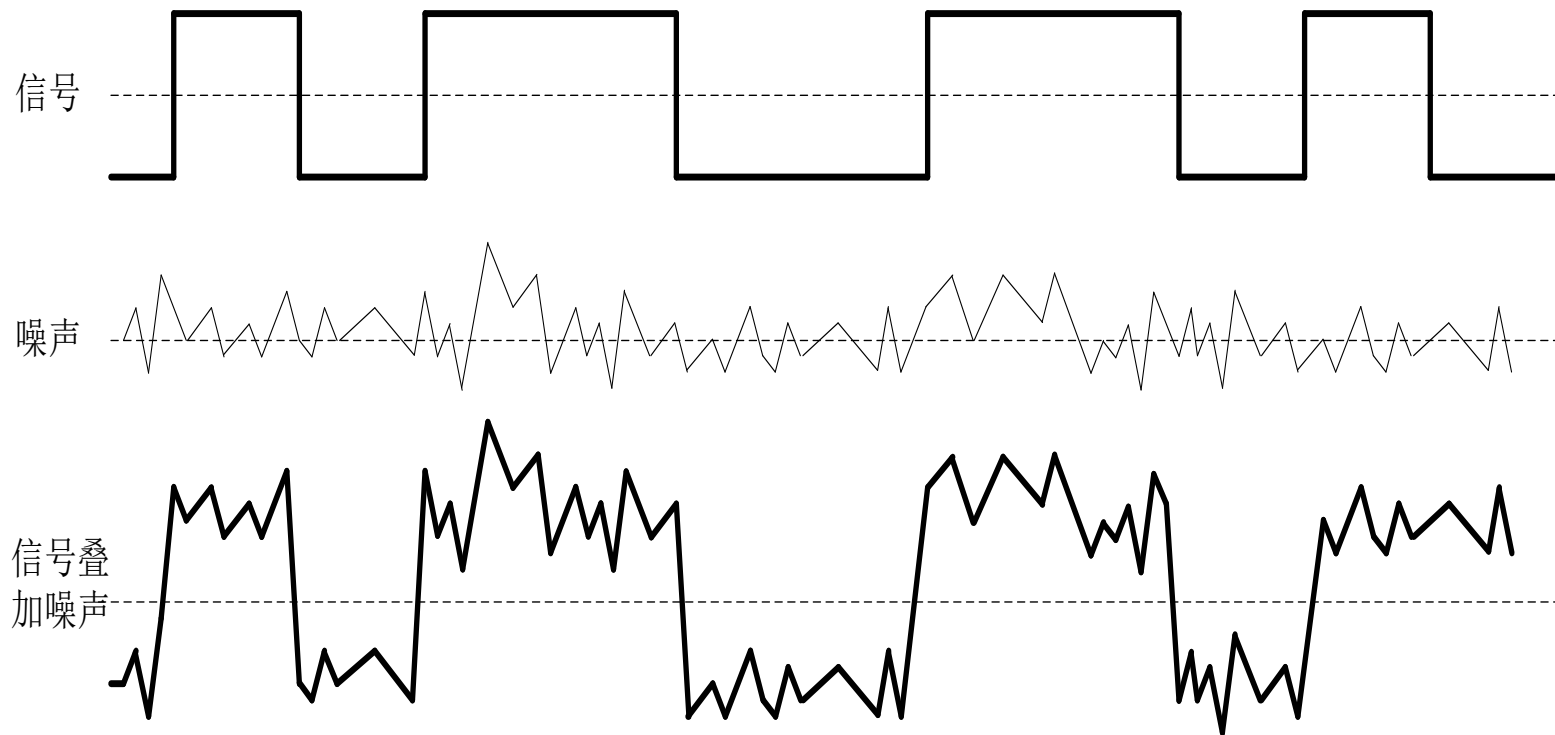
1.2.5 噪声与失真

叠加在有用信号之上并对其产生有害影响的成分，称为噪声。

经过传输后的信号，由于受到各种因素的影响可能会发生畸变，称为信号失真。

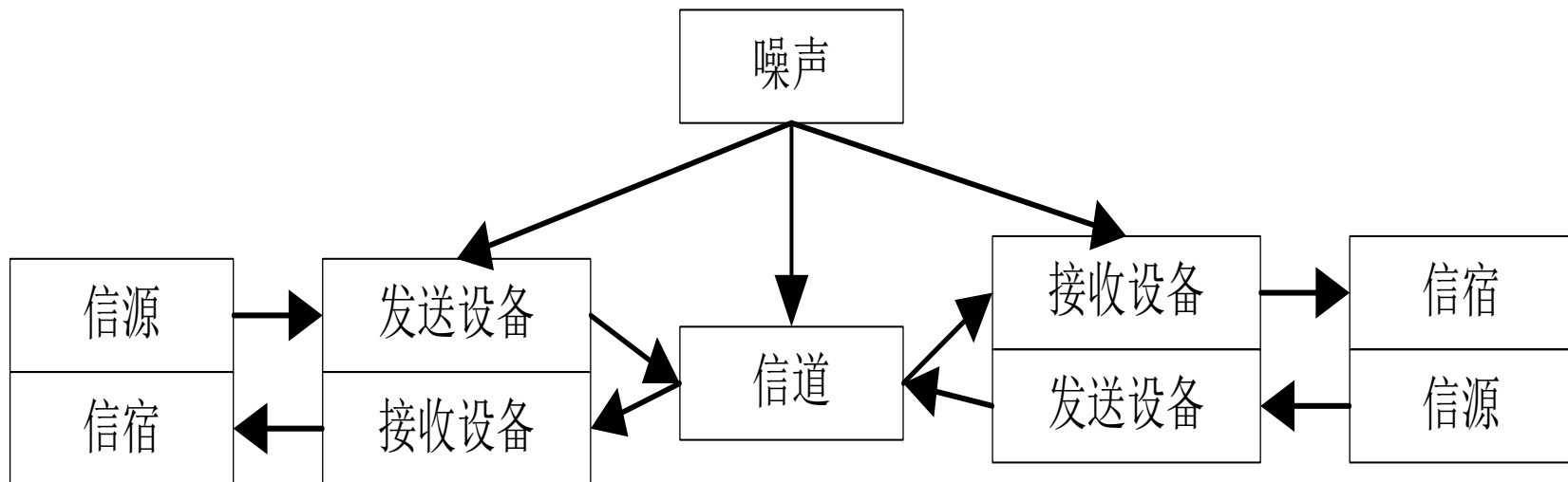
未导致系统产生新的谐波频率的失真称为线性失真，否则称为非线性失真。

噪声叠加导致信号幅度失真



1.3 通信系统的模型与指标

通信系统的一般模型：



通信系统的指标

一个通信系统质量如何，通常由两个指标来衡量，即系统的有效性和可靠性。

有效性指的是单位时间内系统能够传输消息量的多少，以信道带宽（Hz）或传输速率（bit/s）为单位。在相同条件下，带宽或传输速率越高越好。

可靠性指的是消息传输的准确程度，以不出差错或差错越少越好。

模拟通信系统的指标

在模拟通信系统中，系统的频带越宽其有效性越高，而其可靠性常用信噪比来衡量，信噪比越大其可靠性越高。通信系统中某点的信噪比定义为该点的信号功率 P_s 与噪声功率 P_N 之比的对数：

$$SNR = 10 \lg\left(\frac{P_s}{P_N}\right) \quad dB$$

数字通信系统的指标

◆ 传输速率（衡量系统的有效性）

- ✓ 码元速率 B （调制速率或符号速率）
- ✓ 比特速率 R （数据传输速率或信息传输速率）
- ✓ $R=B \log_2 N$ （bit/s）， N 进制

◆ 差错率（衡量系统的可靠性）

$$\text{差错率} = \frac{\text{传输过程中出现错误的单位数量}}{\text{总的传输单位数量}}$$

◆ 频带利用率（衡量系统的利用率）

$$\text{频带利用率} = \frac{\text{系统最大传输比特率}}{\text{系统拥有的频带宽度}} \quad (\text{bit/s} \cdot \text{Hz})$$

1.4 通信系统的分类

从不同的角度出发，可以把通信系统进行不同的分类。

1.4.1 按照传输媒介分

◆有线通信系统：利用导体对信号进行导向性传输，有较强的封闭性和安全性，信号传输质量好，容量可以无限制地增大。但敷设、维护成本较高。

◆无线通信系统：利用非导向性传输媒体在自由空间传播信号，具有优良的可移动性和低廉的扩张成本，但易受到外界的干扰，频率资源有限，传输速率也受限。

1.4.2 按照传输信号的特性分

◆模拟通信系统：优点是简单直观；缺点是抗干扰能力弱，噪声积累无法彻底消除。

◆数字通信系统：

- ✓抗干扰能力强：可消除噪声累积现象，适于远距离传输；
- ✓易加密：对数字信号加密容易处理；
- ✓便于集成化、智能化：采用计算机技术
- ✓占用较宽频带： 4kHz VS 64kHz
- ✓技术较复杂

1.4.3 按照业务功能分

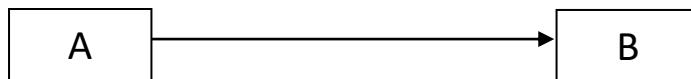
- ✓ 电话通信
- ✓ 电报通信
- ✓ 传真通信
- ✓ 数据通信
- ✓ 卫星通信
- ✓ 微波通信
- ✓ 移动通信
- ✓ 图像通信
- ✓ 多媒体通信
- ✓ 计算机网络通信系统

1.5 通信系统的传输方式

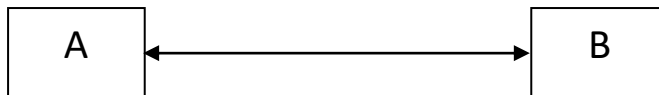
通信系统的传输方式是指通信双方所共同遵守的传输规则。从不同的角度观察，可以有不同传输方式。

1.5.1 单工与双工传输方式

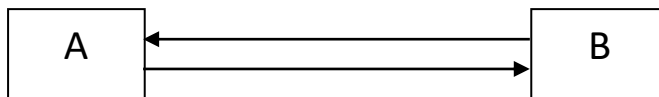
✓单工:



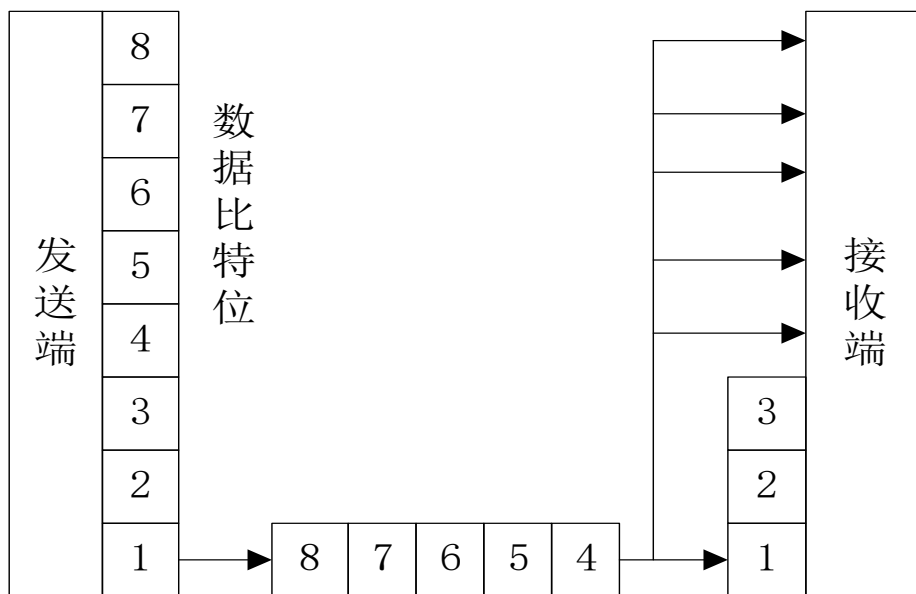
✓半双工:



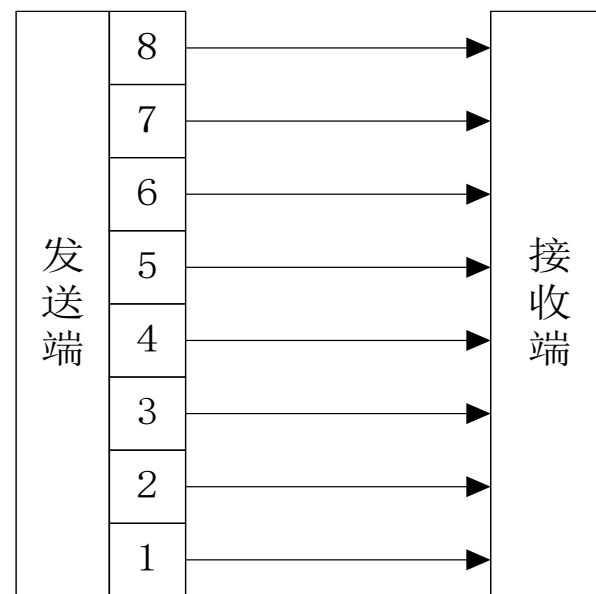
✓全双工:



1.5.2 串行与并行传输方式



(a) 串行传输方式



(b) 并行传输方式

1.5.3 同步与异步传输方式

- ◆异步传输方式：收发双方的时钟节拍各自独立并允许有一定的误差。为了达到双方同步目的，需要在每个字符的头、尾各附加一个比特的起始位和终止位，用来指示一个字符的开始和结束。
- ◆同步传输方式：要求双方时钟严格一致。为求一致，发送方的编码中隐含着供接收方提取的同步时钟频率。收发以数据帧为单位，帧头包含帧同步码，中间是信息码，帧尾是帧结束码。

1.6 通信信道

信道是信号传输的通路，其传输特性描述的是不同频率的信号通过信道后能量幅度和相位变化的情况。

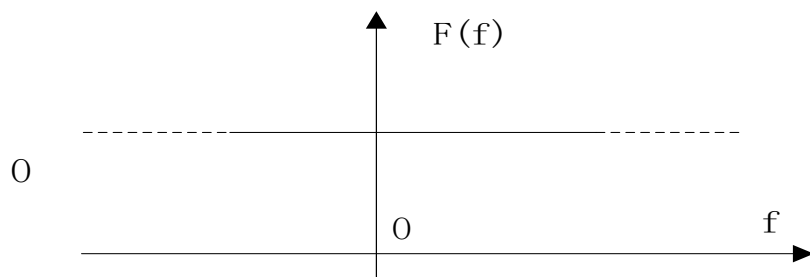
信道带宽用以衡量一个信道的传输能力，带宽越大表明传输能力越强。

信道容量则是用来衡量信道所能达到的最大传输能力的一个重要指标。

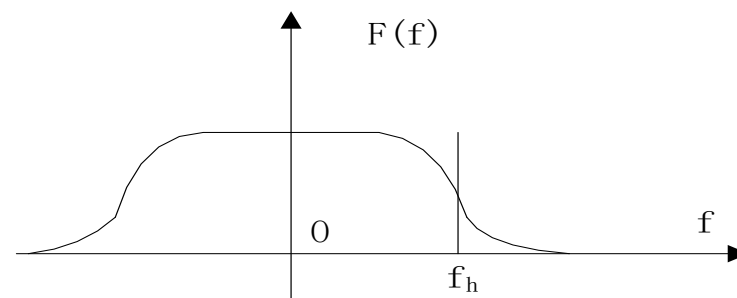
信道复用是利用同一传输媒介同时传送多路信号且相互之间不产生干扰的通信技术。

1.6.1 传输特性与带宽

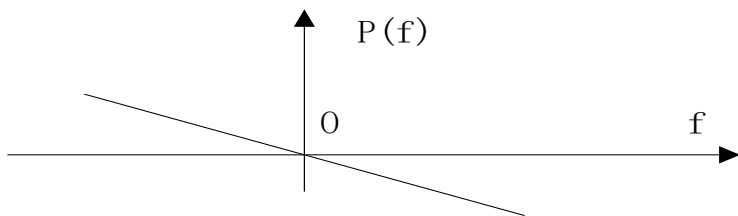
信道的传输特性即信道的频率响应特性，包括幅频特性和相频特性。



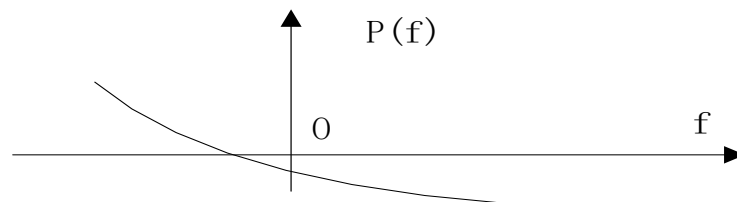
(a) 理想信道幅频特性



(c) 实际信道幅频特性



(b) 理想信道相频特性



(d) 实际信道相频特性

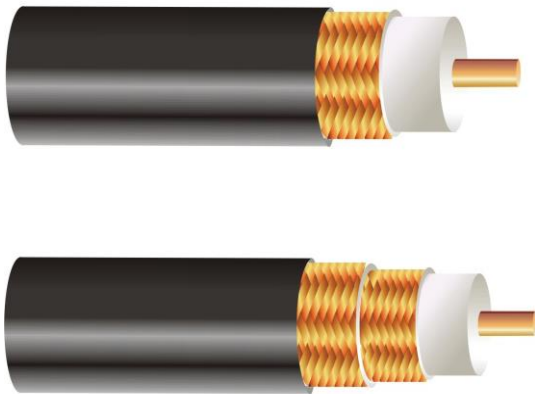
信号带宽与信道带宽的匹配

为了不失真地实现通信信号传输，信号的有效带宽必须和信道带宽相匹配。两者匹配最主要考虑的是频率范围（或频带）的匹配。

信号与信道的关系等价于车与马路的关系。

1.6.2 传输媒介

有线传输媒介：



(a) 同轴电缆

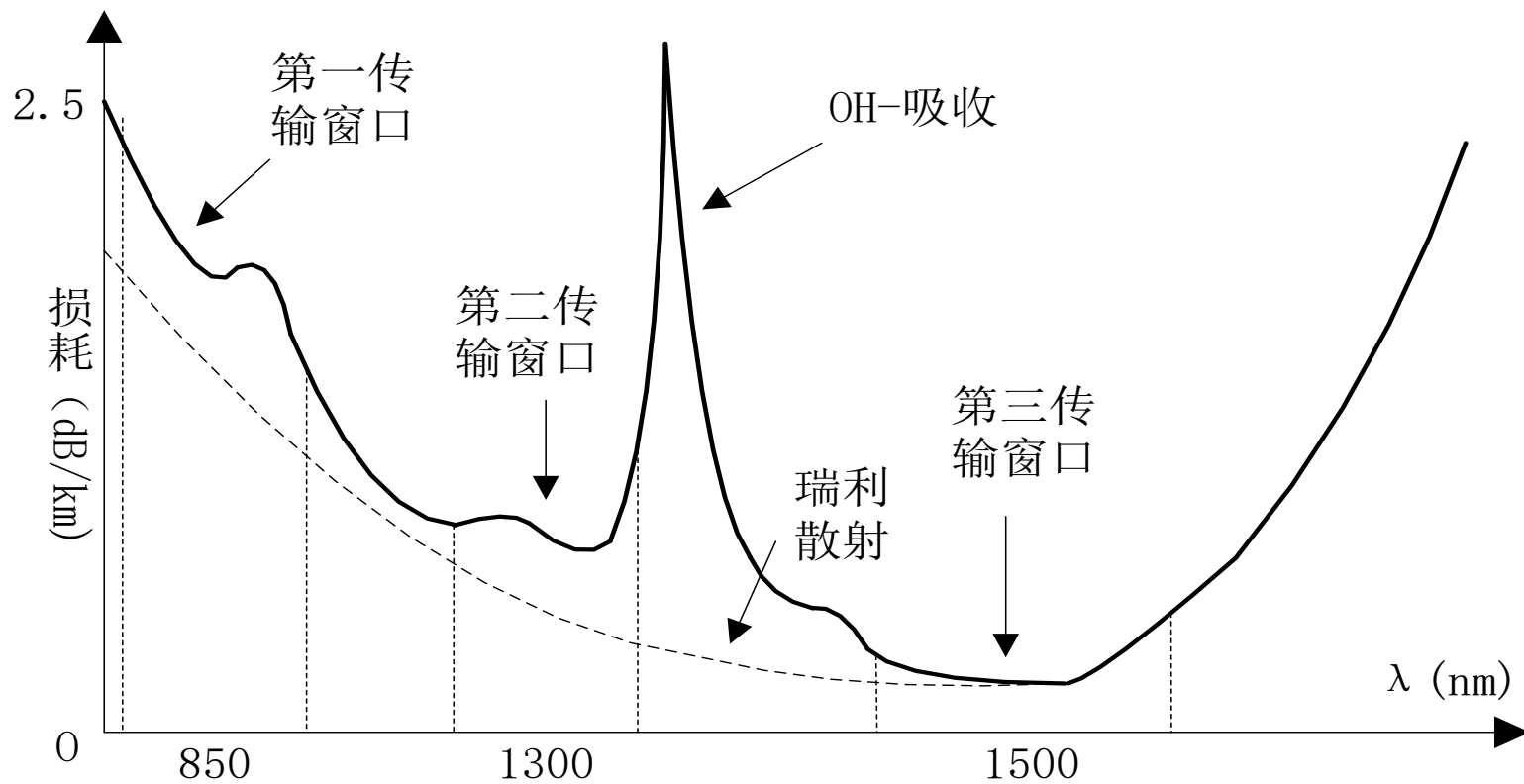


(b) 双绞线



(c) 光缆

光纤通信介质的三个可用窗口



无线传输媒介

表1-3 无线电不同频段的划分及用途

频段	频率范围	波长范围	主要用途	主要传播方式
极低频 (ELF) 极长波	30-3000 Hz	0.1-1000 km	远程通信、海上潜艇远程导航	地波
甚低频 (TLF) 超长波	3-30KHz	1000-10 km		
低频 (LF) 长波	30-300KHz	10 -1 km	中远程、地下通信、无线导航	地波或天波
中频 (MF) 中波	300-3MHz	1000-100 m	中波广播、业余无线电	地波或天波
高频 (HF) 短波	3-30MHz	100 -10 m	短波通信、短波电台、航海通信	天波
甚高频 (VHF) 超短波	30-300MHz	10 - 1 m	电视、调频广播、电离层下散射	视距波、散射波
特高频 (UHF) 分米波	0.3-3GHz	10- 1 dm	移动通信、遥测、雷达导航、蓝牙	视距波、散射波
超高频 (SHF) 厘米波	3-30GHz	10 -1 cm	微波、卫星通信、雷达探测	视距波
极高频 (EHF) 毫米波	30-300GHz	10 -1 nm	雷达、微波、射电天文通信	视距波
光波 (近红外线)	$10^5 - 10^7$ GHz	$0.3- 3 \times 10^{-6}$ cm	光纤通信	光导纤维

1.6.3 信道容量

信道容量是指信息在信道中无差错传输的最大速率。在信号平均功率受限的高斯白噪声信道中，用香农公式计算信道容量

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{比特/秒})$$

其中， B 为信道带宽， S 为信号平均功率， N 为噪声平均功率， C 是该信道理论最大传输速率。

香农公式的意义

香农公式表明：当信号与信道加性高斯白噪声的平均功率 S 与 N 给定时，在具有一定频带宽度 B 的信道上，单位时间内可传输的信息量 C 是有限的。

当且仅当传输速率 $\leq C$ 时，总可以找到一种信道编码方式，实现无差错传输。换句话说，在允许存在一定的差错率前提下，实际传输速率可以大于信道容量 C ，但此时不能保证无差错传输。

香农公式与扩频通信

按照香农公式：1) B 一定时， $S \nearrow$ 或 $N \searrow$ 可令 $C \nearrow$ ，即通过提高信噪比可提高信道容量；2) S/N 一定时，若 $B \nearrow$ 则 $C \nearrow$ 。

结论： C 、 B 和 S/N 可以通过相互提升或降低取得平衡。在扩频通信技术中，令 $B \rightarrow \infty$ （很大）， S/N 可以很小，而 C 变化不大。

例如，信道带宽3KHz，最大信息速率为10000bit/s。为了保证这些信息能够无误传输，要求至少 $S/N \approx 9$ 。若10000bit/s不变，但信道带宽变为10kHz，信噪比 S/N 就可降低为1左右。

1.6.4 信道的复用

在发送端将若干个独立无关的分支信号合并为一个复合信号，然后送入同一个信道内传输，接收端再将复合信号分解开来，恢复原来的各分支信号，称为多路复用。

多路复用目的是提高线路利用率。

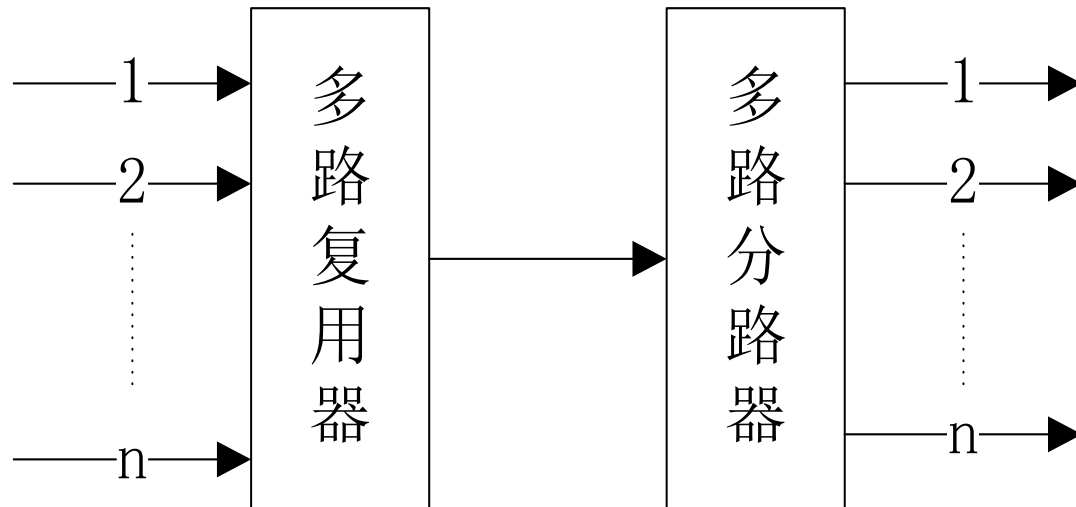
常用的多路复用技术：

✓ 频分 (**FDM**)

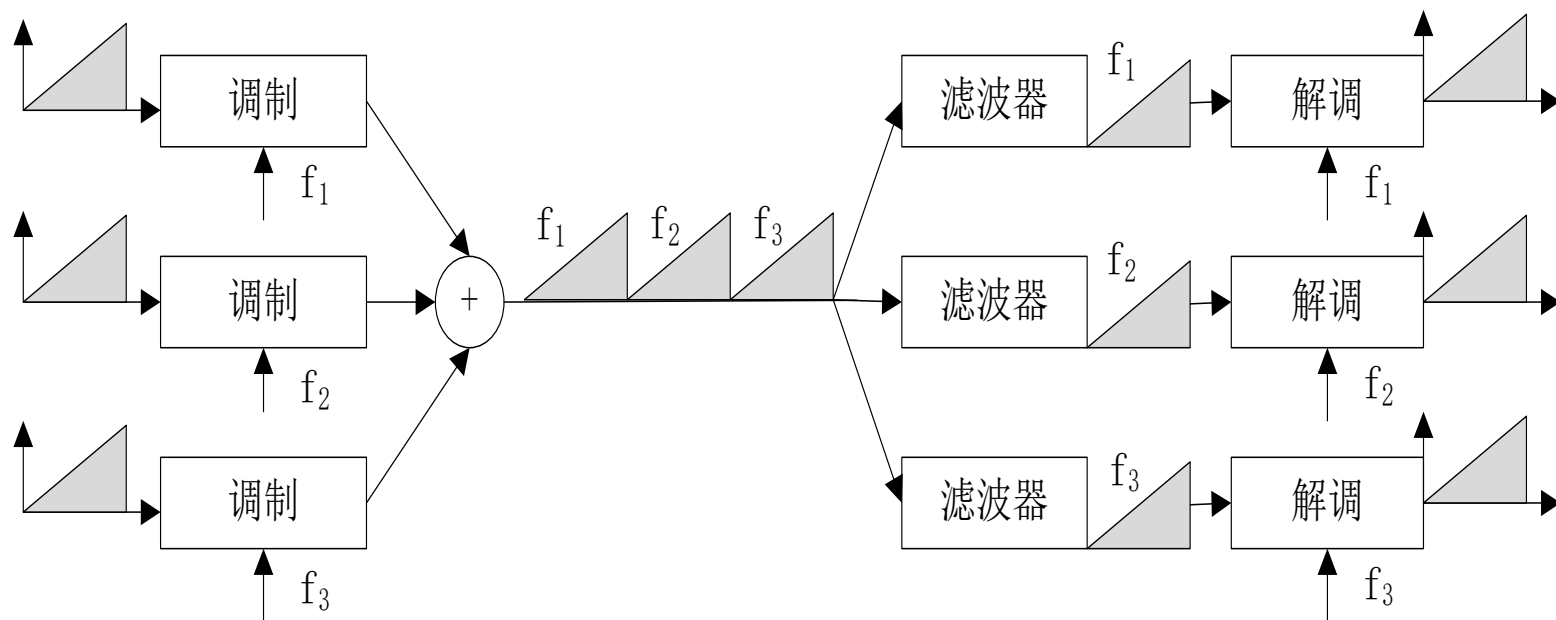
✓ 时分 (**TDM**)

✓ 码分 (**CDM**)

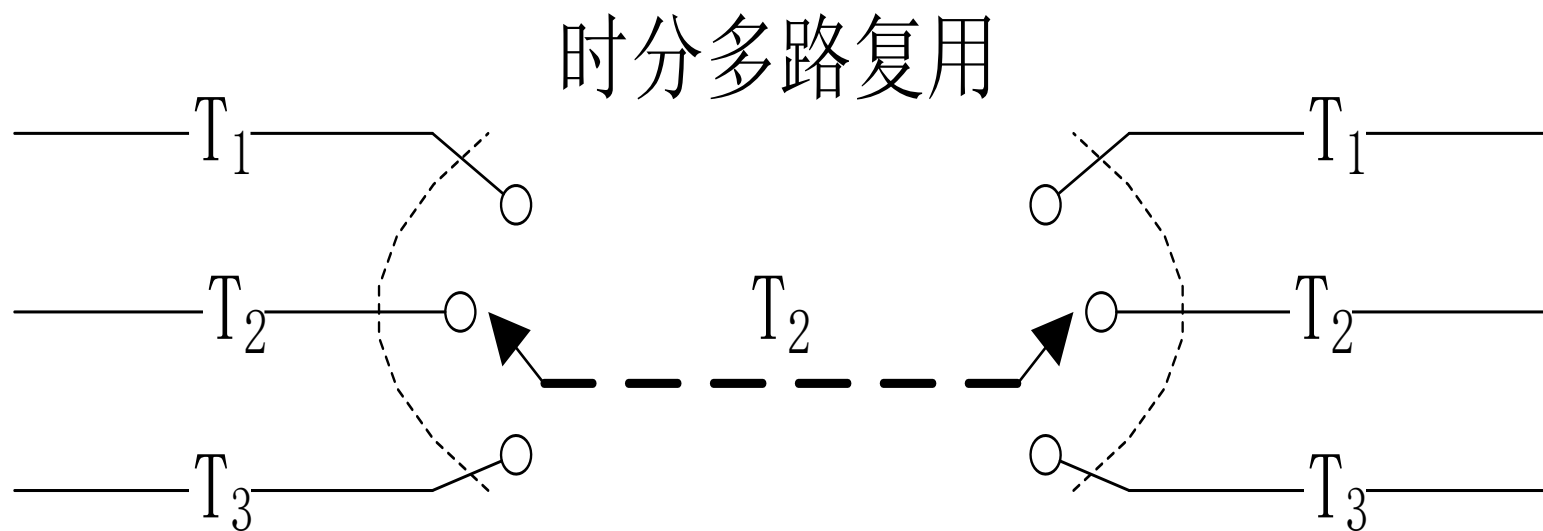
多路复用原理示意图



FDM原理示意图



TDM原理示意图



1.7 调制与解调

调制解调是通信技术最重要的概念之一。

“携带”消息的信号称为载波信号，而被“携带”的消息称为调制信号，调制就是让消息被载波信号“携带”，解调就是从载波信号中检测出消息。

正弦周期信号和脉冲周期信号常被用作载波信号。

1.7.1 调制的目的

◆ 把消息信号调制成适合在信道中传输的信号

例如，话音频率是300~3400Hz，而信道频带在10kHz~100kHz之间，利用频率为11kHz的载波调制到11.3kHz~14.4kHz之间，就可通过信道进行传输。

◆ 信道的多路复用

例如，信道在10kHz~100kHz之间，带宽是90 kHz，按每路话音信号4000Hz计算至少可以同时传输22路话音信号。

1.7.2 调制的分类

表1-4调制类型说明

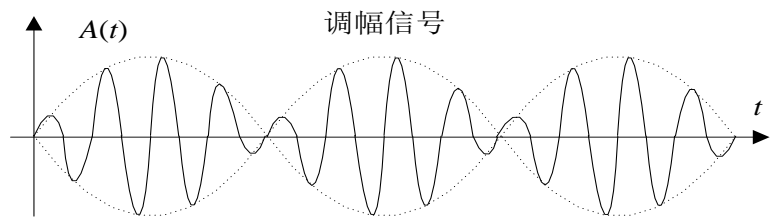
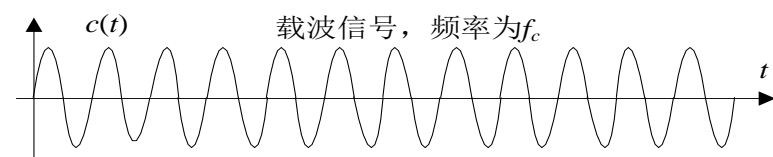
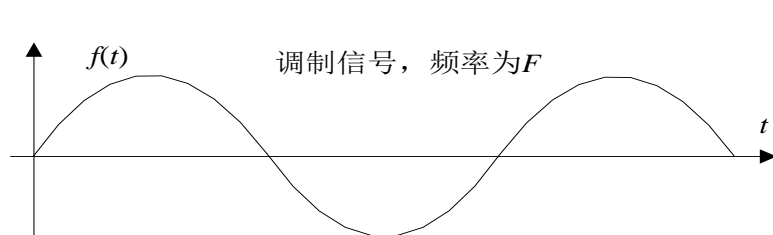
调制信号 载波信号	模拟信号	数字信号
正弦载波 $U_c \cos(\omega_c t + \psi)$	调幅 (AM)、单边带、 调频 (FM)、调相 (PM)	幅移键控 (ASK)、频移键控 (FSK)、相移键控 (PSK)、
脉冲载波	脉冲编码调制 (PCM)、脉冲增量 调制 (ΔM)、DPCM、	脉冲调幅 (PAM)、脉冲调相 (PPM)、脉冲调宽 (PWM)

1.7.3 模拟信号调制正弦波

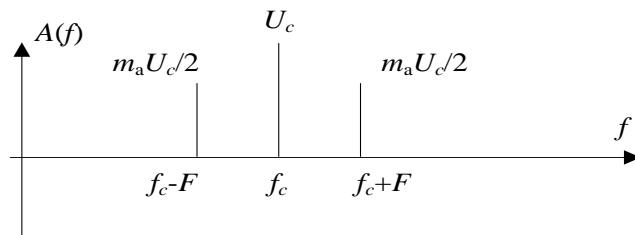
用模拟信号对正弦载波信号进行调制称为模拟调制。根据调制参数的不同分别有模拟振幅调制（**AM**）、频率调制（**FM**）和相位调制（**PM**）三种形式，后两种形式又称为角度调制。

模拟振幅调制

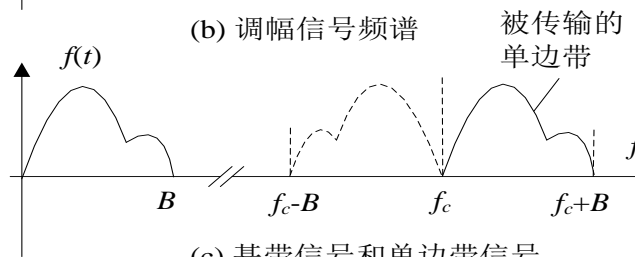
载波信号幅度随调制信号变化的调制称为振幅调制，简称调幅。调制与解调示意图如下：



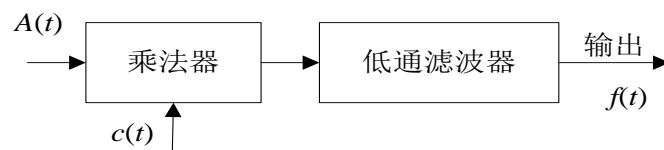
(a) 模拟调幅波形



(b) 调幅信号频谱



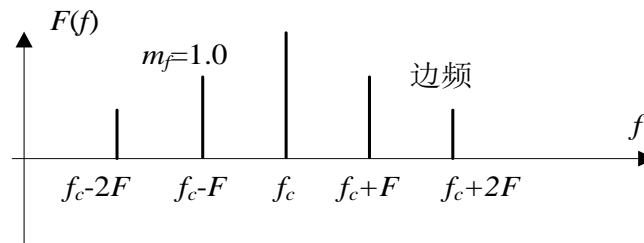
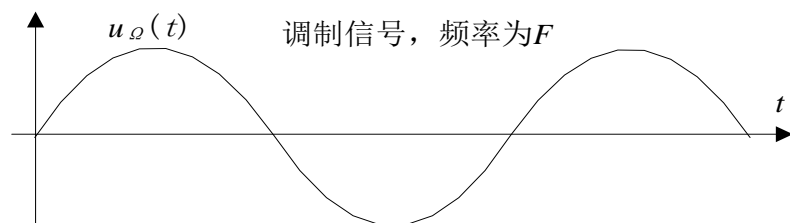
(c) 基带信号和单边带信号



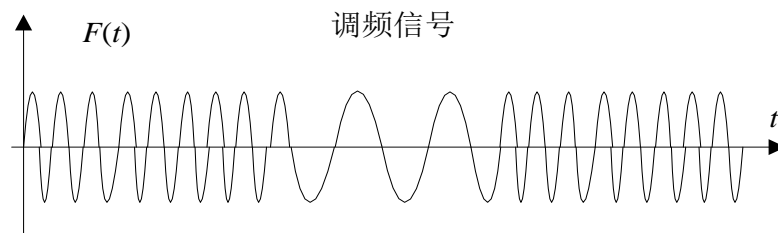
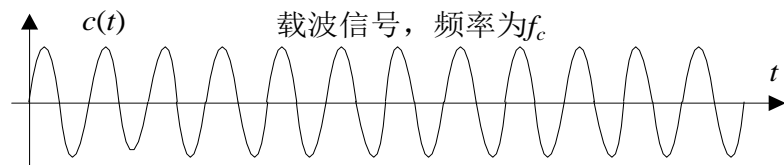
(d) 调幅信号的相干解调

模拟频率调制（调频）

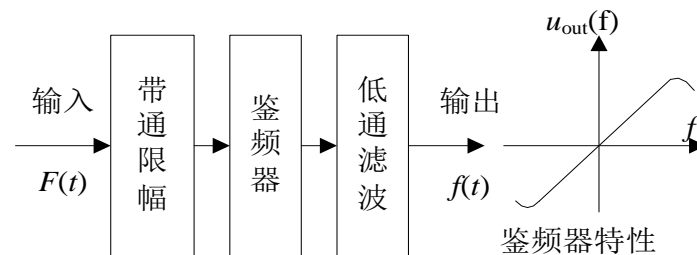
载波频率 f_c 随调制信号的瞬时幅值呈线性变化。



(b) 调频信号频谱



(a) 模拟调频波形



(c) 调频解调过程

调频与解调示意图

模拟相位调制（调相）

载波瞬时相位 $\theta(t)$ 随调制信号瞬时幅值呈线性变化。

把平面化的正弦载波立体化，即在三维空间中观察其变化过程。当一个振幅为 A ，频率为 f_c ，初始相位为 φ 的正弦载波 $A\sin(2\pi f_c t + \varphi)$ 随时间变化时，其 x 轴代表时间， y 轴代表幅度， z 轴代表的就是相位。载波信号的幅度和相位随时都在变化，利用每一个周期的初始相位不同可以实现对相位的调制。

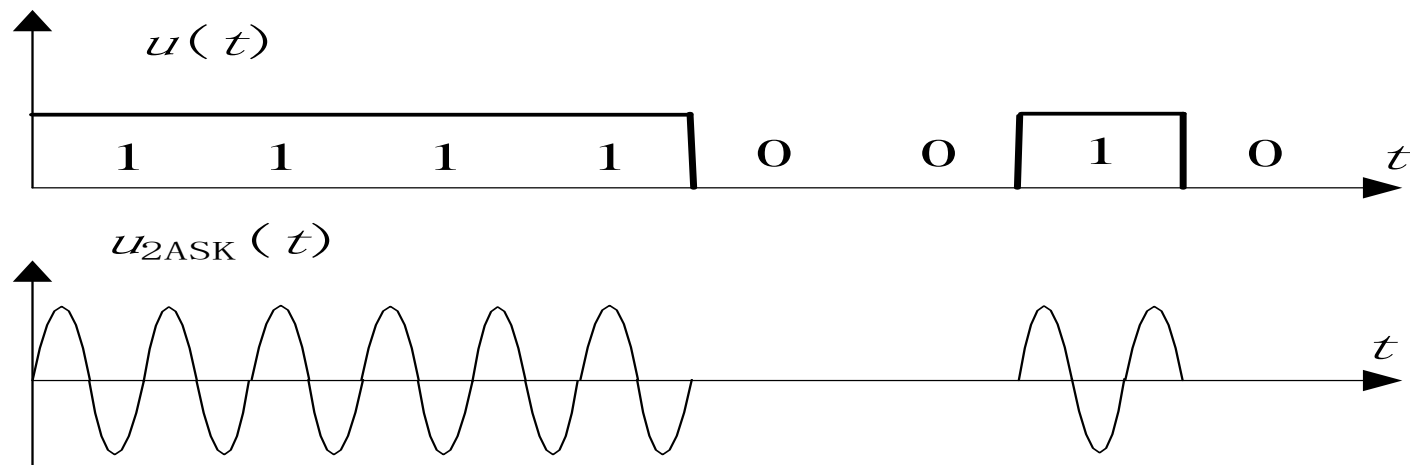
1.7.4 数字信号调制正弦波

用数字信号调制正弦载波信号称为载波键控，包括幅移键控、频移键控和相移键控。

二进制幅移键控 (2ASK)

利用二进制数字信号来控制载波振幅

$$u(t) = \begin{cases} A_m \sin(2\pi f_c t + \theta_i) & \text{当数字1时} \\ 0 & \text{当数字0时} \end{cases}$$

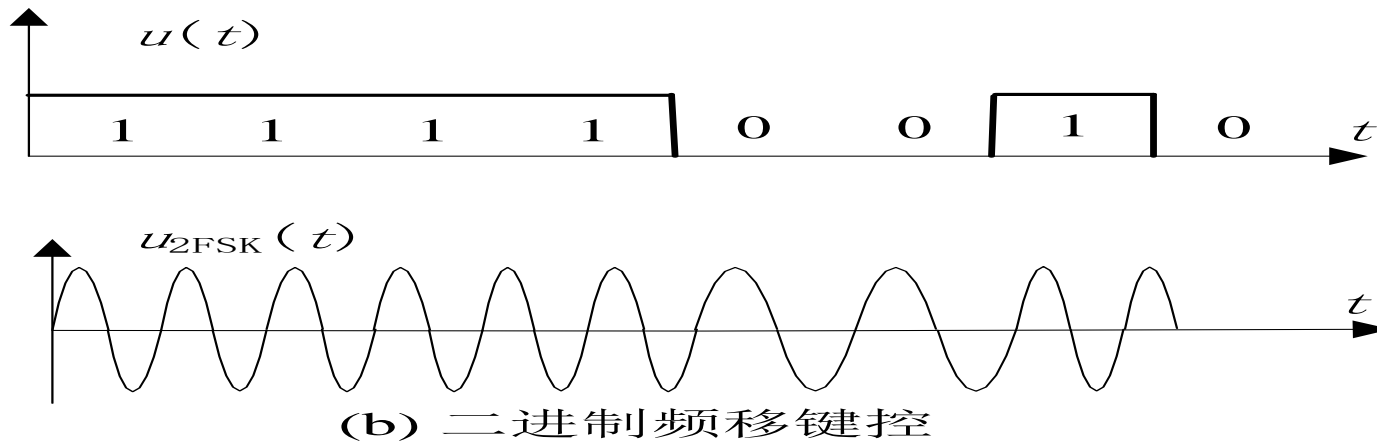


(a) 二进制幅移键控

二进制频移键控 (2FSK)

利用二进制数字信号来控制载波频率

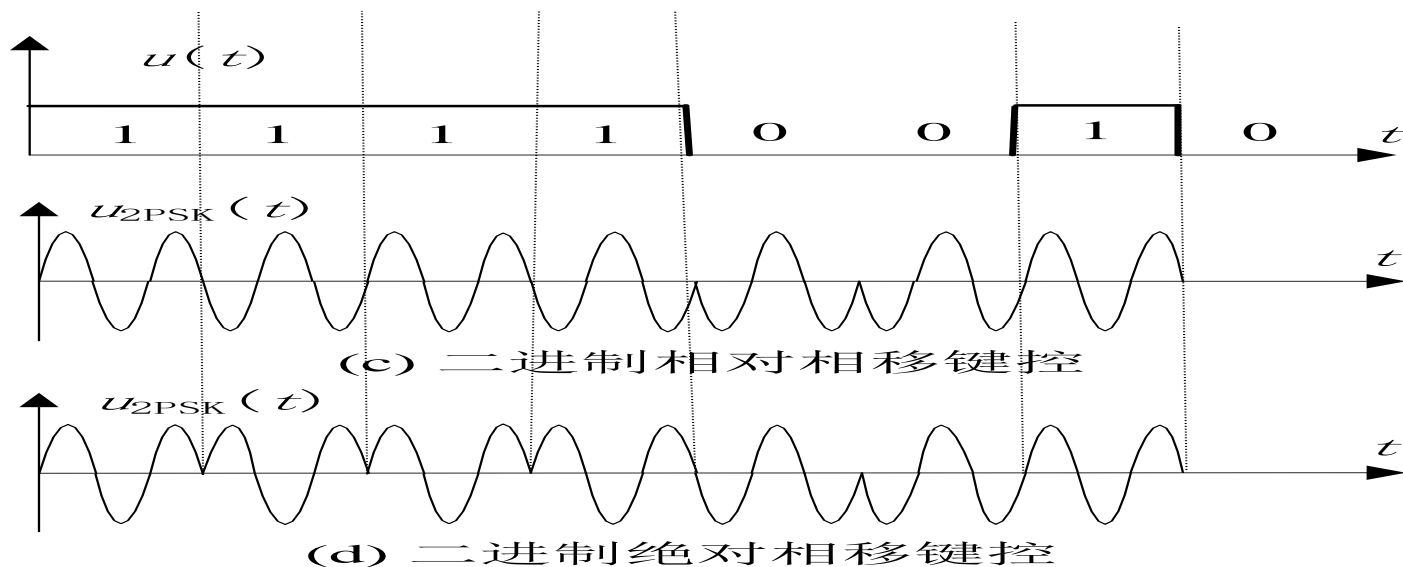
$$u(t) = \begin{cases} A_m \sin(2\pi f_1 t + \theta_i) & \text{数字1} \\ A_m \sin(2\pi f_2 t + \theta_i) & \text{数字0} \end{cases}$$



二进制相移键控 (2PSK)

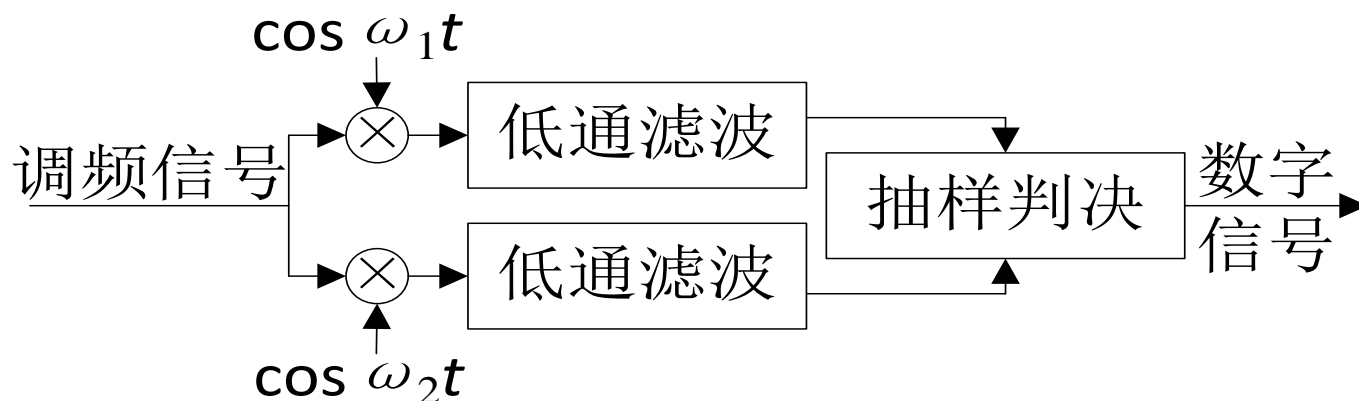
利用二进制数字信号来控制载波相位

$$u(t) = \begin{cases} A_m \sin(2\pi f_c t + \theta_i) & \text{数字1} \\ A_m \sin(2\pi f_c t + \theta_i + \pi) & \text{数字0} \end{cases}$$



数字调制的相干解调

用本地载波与接收到的载波键控信号相乘，得到基带信号；然后用低通滤波器过滤掉高频信号；最后对过滤后的基带信号进行采样和判决还原出原始数字信号。



(a) 2FSK相干解调过程

数字调频的相干解调示例

例如，接收到 $\cos\omega_1 t$ （“1”）或 $\cos\omega_2 t$ （“0”），与本地载波 $\cos\omega_1 t$ 和 $\cos\omega_2 t$ 同时分别相乘，可得如下三种结果之一：

$$\cos\omega_1 t \cos\omega_1 t = \cos 2\omega_1 t + \cos 0 = \cos 2\omega_1 t + 1 = 1$$

$$\cos\omega_2 t \cos\omega_2 t = \cos 2\omega_2 t + \cos 0 = \cos 2\omega_2 t + 1 = 1$$

$$\cos\omega_1 t \cos\omega_2 t = \cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t < 1$$

其中高频分量 $2\omega_1$ 、 $2\omega_2$ 以及 $\omega_1 + \omega_2$ 都被滤掉。抽样判决比较两个低通滤波输出电平的大小，上大判为1，下大则判为0。

本章小结和知识点

- ◆ 国内外通信发展简史
- ◆ 通信信号的性质与特征
- ◆ 通信系统的一般模型
- ◆ 可靠性与传输效率
- ◆ 通信系统的传输方式
- ◆ 信道的频率响应特性
- ◆ 信道的容量
- ◆ 调制与解调

作业

- 1、画出通信系统的一般模型**
- 2、衡量通信系统的主要性能指标有哪些？**