

# 现代信息系统原理

王琳

信息与软件工程学院信息工程系

E-mail: [wl@uestc.edu.cn](mailto:wl@uestc.edu.cn)

# 课堂案例

# 带你破解 WiFi 穿墙之谜

在互联网时代，人们对网络的依赖性越来越大，WiFi已成为人类生存基本需求。

## 1. WiFi的协议和频谱

协议版本	发布时间	工作频段	峰值速率	覆盖半径
802.11	1997	2.4 GHz	2 Mbps	—
802.11a	1999	5 GHz	54 Mbps	约 30 米
802.11b	1999	2.4 GHz	11 Mbps	约 30 米
802.11g	2003	2.4 GHz	54 Mbps	约 30 米
802.11n	2009	2.4 GHz 或 5 GHz	600 Mbps	约 70 米
802.11ac	2011	5 GHz	867-1730 Mbps	约 35 米

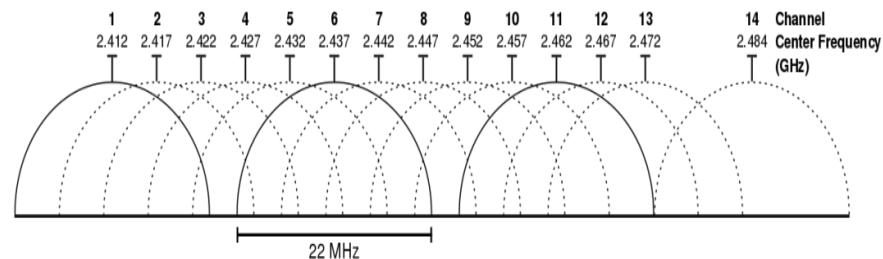
可见，WiFi有两个工作频段：

2. 4G和5G。

这两个频段都是非授权频段——只要符合国家法规，不经授权就可使用。

## 2. 4G频段：

频谱范围**2.4GHz~2.4835GHz**，共83.5M带宽，划分为13个信道，每个信道宽20M。  
这13个信道紧密交叠，干扰不可避免。



# 5G频段：

5GHz的优势由协议802.11ac来体现。

5G频谱范围**4.910GHz～5.875GHz**，有900多M的带宽，是2.4G的10倍还多！

内部还会划分成几个子频段，有的还没分配，有的作为其他用途。中国可以使用的部分如右下图所示。

支持802.11ac的路由器和手机可把这些可用的信道自由组合，使用20M、40M、80M甚至160M带宽的信道。

信道多，带宽大，干扰小，峰值下载速度有效提升。

发布年份	802.11 标准	频段	新命名
2009	802.11n	2.4 GHz 或 5 GHz	Wi-Fi 4
2013	802.11ac wave1	5 GHz	Wi-Fi 5
2015	802.11ac wave2	5 GHz	
2019	802.11ax	2.4 GHz 或 5 GHz	Wi-Fi 6

协议版本	发布时间	工作频段	峰值速率	覆盖半径
802.11	1997	2.4 GHz	2 Mbps	—
802.11a	1999	5 GHz	54 Mbps	约30米
802.11b	1999	2.4 GHz	11 Mbps	约30米
802.11g	2003	2.4 GHz	54 Mbps	约30米
802.11n	2009	2.4 GHz 或 5 GHz	600 Mbps	约70米
802.11ac	2011	5 GHz	867-1730 Mbps	约35米

信道编号	频率(MHz)	在中国是否可用
36	5180	可用
38	5190	可用
40	5200	可用
42	5210	可用
44	5220	可用
46	5230	可用
48	5240	可用
52	5260	可用，但需要使用 DFS/TPC 技术规避干扰
56	5280	可用，但需要使用 DFS/TPC 技术规避干扰
60	5300	可用，但需要使用 DFS/TPC 技术规避干扰
64	5320	可用，但需要使用 DFS/TPC 技术规避干扰
149	5745	可用
153	5765	可用
157	5785	可用
161	5805	可用
165	5825	可用

## 2. WiFi的速率估算

WiFi工作在2.4G和5G分别能达到多大的峰值下载速率？

2.4G频段采用协议版本802.11n来估算，

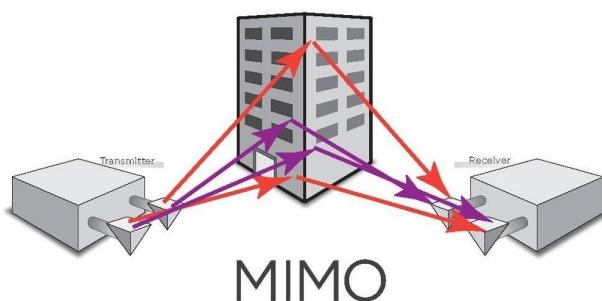
5G频段采用协议版本802.11ac估算。

802.11n引入了几个特点：

1. 支持MIMO，可使用最多4个天线来收发送数据，下载速率成倍提升。
2. 新增了双倍带宽，即40M信道带宽。单用户理论峰值下载速率又得到了成倍提升！

因此，要估算802.11n最大下载速率，数天线的个数！一个天线加上40M信道最大能达到150Mbps的速率，两个天线是300Mbps，以此类推，4个天线可达600Mbps！

协议版本	发布时间	工作频段	峰值速率	覆盖半径
802.11	1997	2.4 GHz	2 Mbps	—
802.11a	1999	5 GHz	54 Mbps	约30米
802.11b	1999	2.4 GHz	11 Mbps	约30米
802.11g	2003	2.4 GHz	54 Mbps	约30米
802.11n	2009	2.4 GHz或5 GHz	600 Mbps	约70米
802.11ac	2011	5 GHz	867-1730 Mbps	约35米



## 2. WiFi的速率估算

而802.11ac又在下面几点上进行了增强：

1. **MIMO增强**: 最多可以使用**8个天线**来收发送数据，速率倍增！
2. 信道扩宽：支持**80MHz**带宽信道，最大可支持**160M**带宽信道，速率倍倍增！
3. 高阶调制：支持**256QAM**，速率再增**30%**！

在这3点的加成之下，**802.11ac**单天线可达**433Mbps**，两天线**867Mbps**，三天线**1.3Gbps**，四天线**1.7Gbps**，八天线**3.4Gbps**！

这只是理论上的推算，实际上支持802.11ac的路由器，天线个数都在**4根以内**。

协议版本	发布时间	工作频段	峰值速率	覆盖半径
802.11	1997	2.4 GHz	2 Mbps	—
802.11a	1999	5 GHz	54 Mbps	约30米
802.11b	1999	2.4 GHz	11 Mbps	约30米
802.11g	2003	2.4 GHz	54 Mbps	约30米
802.11n	2009	2.4 GHz或5 GHz	600 Mbps	约70米
802.11ac	2011	5 GHz	867-1730 Mbps	约35米

### 3. WiFi的信号强度和损耗

WiFi信号在传播中遇到障碍物之后的反应：

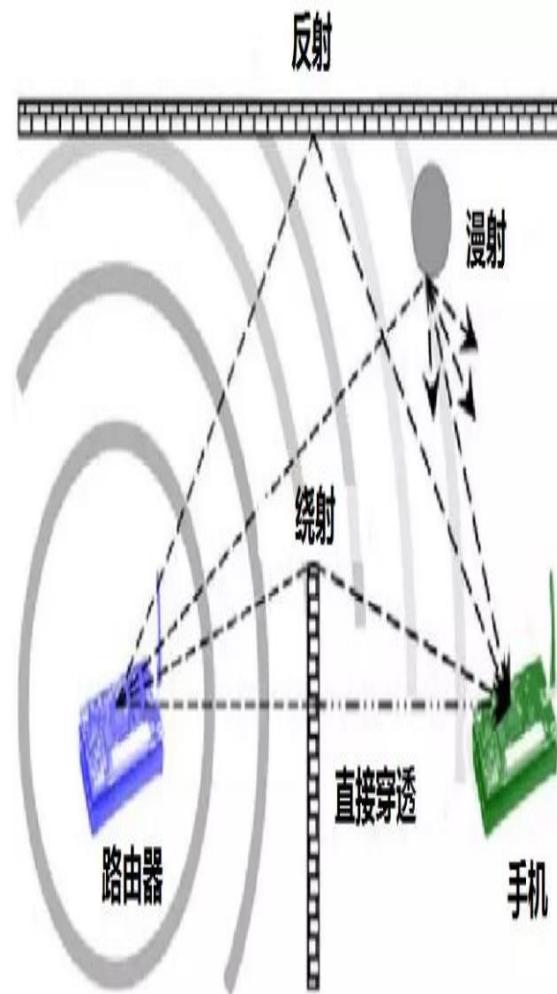
**折射**： WiFi信号经过玻璃或水的时候，信号路径发生偏折，我们和路由器都在空气中，因此折射的影响可忽略。

**反射**： WiFi信号经过光滑的物体表面时，信号会发生反射，和光的反射类似。

**绕射**： WiFi信号经过水泥墙难以穿越，部分信号会向旁边散开，等遇到一个可以穿过的区域再继续向原来方向直线传播。

**漫射**： WiFi信号遇到水泥墙，因为直线线路受阻，部分信号会散开，沿着墙壁上下左右继续延伸出去。

**穿透**： WiFi信号的能量一部分被障碍物吸收，剩余能量透过障碍物继续传播。



在室内环境下，手机接收到的WiFi信号主要是反射、绕射、漫射和穿透这四种效应的叠加。后三种效应都和信号的频率关系很大，频率越高绕射和穿透的能力越差。

**2.4G**和**5G**频段，在无线通信里都属于较高频段了，虽说**2.4G**绕射和穿透能力要比**5G**强一些，但也高不到哪里去。

来看看**2.4G**信号穿墙之后的损耗（经验值）：

结合上表可以得出结论：

木头，玻璃这些障碍物，对于WiFi信号的阻挡作用不强，只会带来一半左右的信号衰减；砖墙，水泥墙这些障碍物，堪称WiFi信号杀手，穿透的信号动辄衰减为原先的千分之一；电梯这类金属障碍物，简直就是WiFi信号的噩梦，轻轻松松衰减到原先的万分之一！

障碍物	穿透损耗
8 毫米木板	1~1.8dB
38 毫米木板	1.5~3dB
40 毫米木门	2~3dB
12 毫米玻璃	2~3dB
25 厘米水泥墙	20dB~30dB
砖墙	~15dB
楼层阻挡	~30dB
电梯阻挡	20~40dB

## 4. 提升WiFi信号的一些思考

### (1) 有没有所谓“大功率路由器？”

机智的你肯定很快就想到了，想要信号好穿墙能力强，增大发射功率啊！

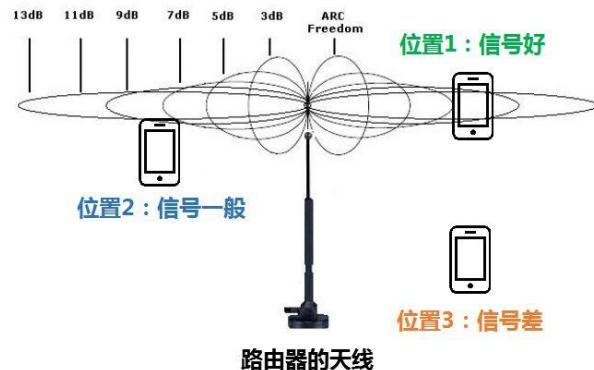
但是在WiFi这里，增大发射功率还真不行。

因为无线路由器的发射功率是有国家规定的一一最大**0.1W**，不符合要求的产品不能上市。

所以，想通过增强发射功率来提升 WiFi信号这条路是走不通的。

### (2) “高增益天线”是否可行？

虽然高增益天线的能量发射会更集中，但代价是波束变窄，WiFi信号的覆盖会不均匀，有的方向信号强，有的方向信号弱。



## 5. 提升WiFi信号的良策

### 方法一：路由器摆放位置优化

- (1) 传播距离越短信号越好，所以尽量把路由器放在房子的中央！
- (2) 木门，玻璃门等对信号的衰减小，尽量让路由器多走门，少穿墙！
- (3) 弱电箱一般在门口，四周面板也会屏蔽无线信号，不要把路由器放在弱电箱里！
- (4) 把路由器摆在开阔的地方，避开冰箱、洗衣机、各种家具等障碍物！

### 方法二：调整合理的天线角度

家用路由器都使用全向天线，其信号分布类似被水平压扁的轮胎。所以，无线信号在与天线垂直的方向上覆盖效果最好。如图：



因此，把无线路由器的天线调整到与地面垂直，直接对着房顶就好，别掰成各种乱七八糟的角度了，对着你的方向可能恰好信号最弱！

## 方法三：避免环境干扰

- (1) 尽量使用双频路由器，能使用**5G**频段尽量使用**5G**！**2.4G**频段非常拥堵，自然受到的干扰也更多。而**5G**频段相对来说干净得多。
- (2) 把路由器尽量远离微波炉、蓝牙、无线鼠标键盘等这些在**2.4G**上工作的设备，不然造成干扰指数增加。
- (3) 更改路由器的信道配置！**2.4G**频段上只有3个独立不交叠的信道，一般来说就是**1**, **6**和**11**。试着改改看，哪个信道好就用哪个。

方案四：使用无线扩展器扩展放大无线信号

方案五：使用无线路由器桥接扩大信号

方案六：使用网线把两台（或者多台）路由器连接起来

方案七：使用HyFi套装（子母路由器）组建全覆盖无线网络

方案八：使用AP/AC扩展无线信号

## — 课程介绍

- 性质：专业限选课

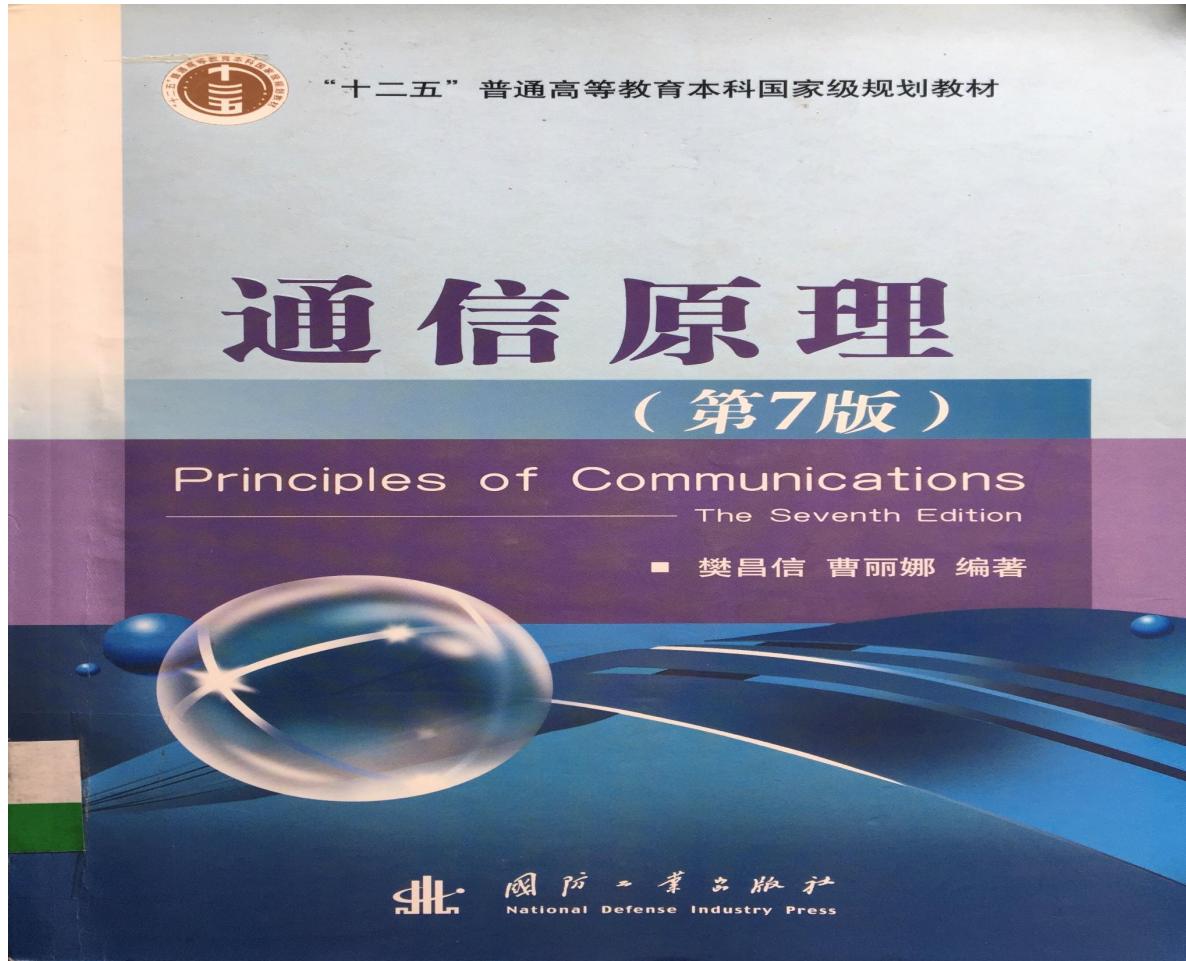
主要讲授信息传输的基本概念、基础理论和典型技术。通过对通信系统的工作原理、噪声对通信系统的影响、有线及无线通信系统分析，使学生系统地了解和掌握现代通信的相关理论、实现技术和设计思想。

- 课时：共48学时（实验8学时），4学时/周
- 特点：学时少，教学内容多，学习难度大。

## — 课程资源

- 教材：

通信原理（第7版） 樊昌信 国防工业出版社



- 参考书:

1. 《现代通信原理》 曹志刚, 清华大学出版社
2. 《数字与模拟通信系统》 (第六版)  
Leon W. Couch. U.S., 电子工业出版社



## – 先修课程

- 信号与系统 (复习原书CH2)

- 随机信号分析

## – 后续课程

- 信息论、信息与传输、编码原理、同步技术、通信系统、移动通信技术、宽带通信技术、卫星通信、射频通信电路.....

## – 考核方式

- 平时：课堂练习+作业 15分
- 期中考试：全开卷，随堂测试 20分
- 实验：2个 15分
- 期末测试：一页纸开卷 50分

# 课堂讲授内容

**第1章** 绪论

**第2、3章** 基础知识

**第4章** 信道

**第5章** 模拟调制系统

**第6章** 数字基带传输系统

**第7章** 数字带通传输系统

**第8章** 模拟信号的数字传输

# 第1章 绪论



1.2 通信系统的组成

1.3 通信系统分类与通信方式

1.4 信息及其度量

1.5 通信系统主要性能指标

# 1. 1 通信的基本概念

何谓“通信” ???

- 通信的目的：传递消息中所包含的信息。
- 消息：是物质或精神状态的一种反映，例如语音、文字、音乐、数据、图片或活动图像等。
- 信息：是消息中包含的有效内容。

实现“通信”的方式和手段 ???

- 非电的：如旌旗、消息树、烽火台...
- 电的：如电报、电话、广播、电视、遥控、遥测、因特网和计算机通信等。

# 第1章 绪论

1.1 通信的基本概念

1.2 通信系统的组成

1.3 通信系统分类与通信方式

1.4 信息及其度量

1.5 通信系统主要性能指标

# 什么是一个通信系统???

**定义：**实现通信的系统，将信息从发信者通过信息通道传送到收信者。

**电子通信系统**——通过**电信号**来实现信息的传递。

一些例子：

1. 电话
2. 计算机网络
3. 电台和电视

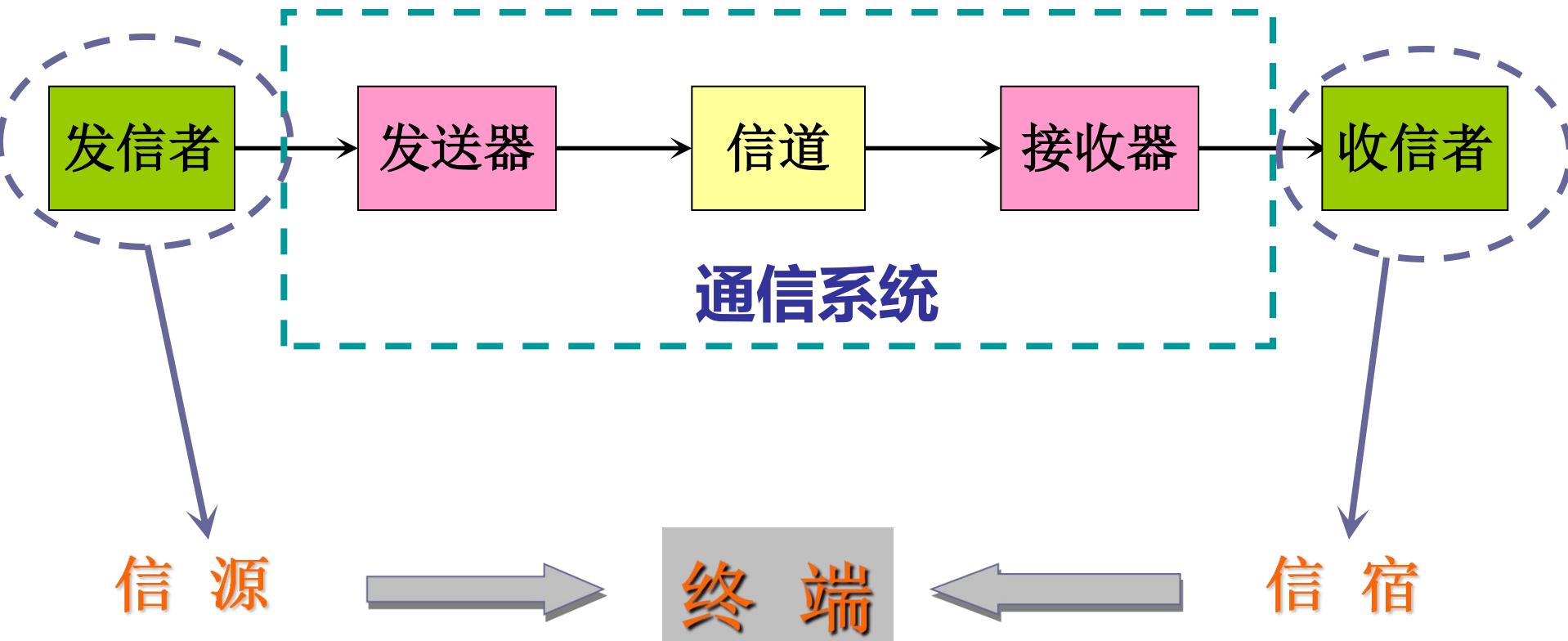
## — 电信发明史

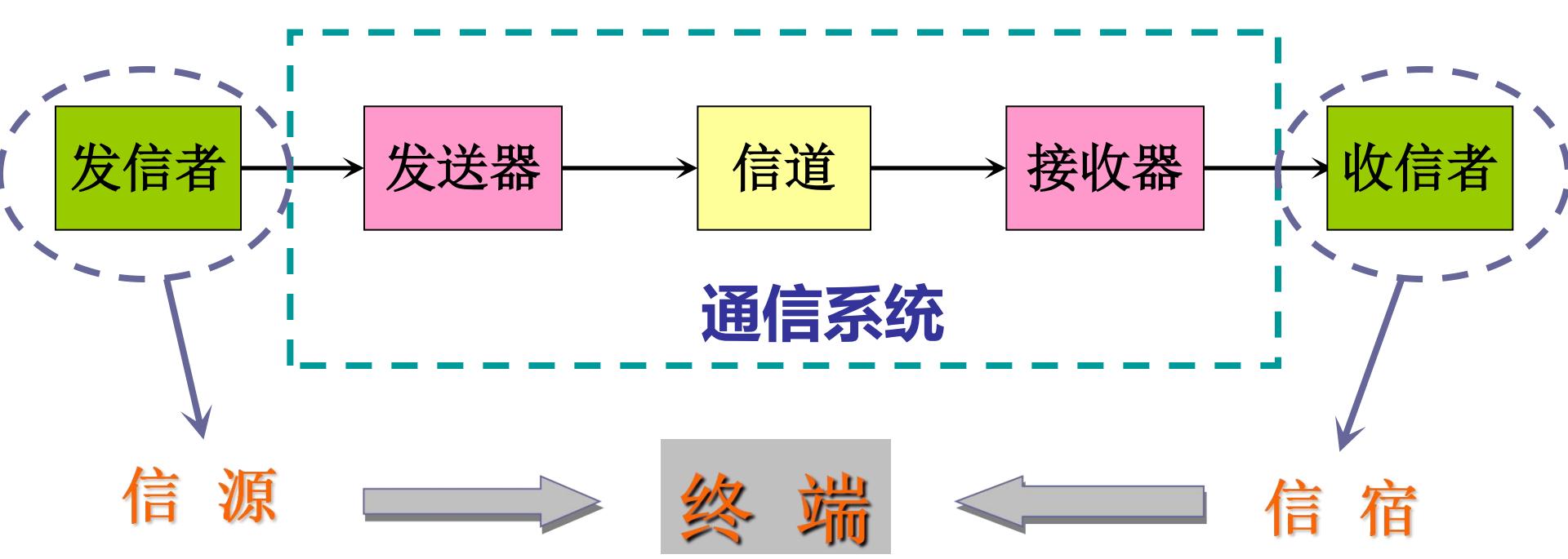
- 1837年：莫尔斯发明有线电报
- 1876年：贝尔发明有线电话
- 1918年：调幅无线电广播、超外差接收机问世
- 1936年：商业电视广播开播

# 1. 2 通信系统的组成

## 1.2.1 通信系统一般模型

### 1. 系统模型





**发送器**: 基本功能是将信源和信道匹配起来，即将信源产生的信号变换成适合在信道中传输的信号。

**信 道**: 指传输信号的物理媒质。

**接收器**: 基本功能是完成发送器的反变换，从带有干扰的接收信号中正确恢复出相应的原始信息。

## 2. 关于信源

### (1) 信源、消息、信号与信息

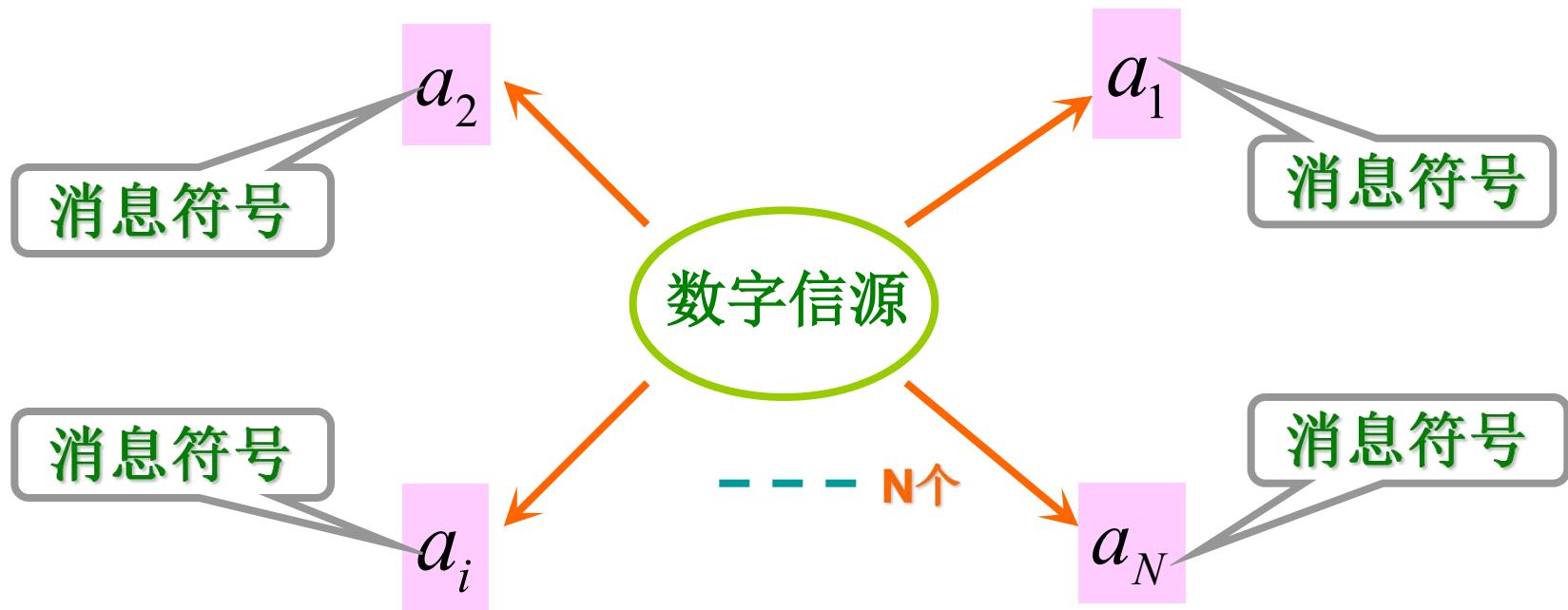
- a. **信源**: 消息的发源地，有语音信源、音乐信源、图像信源、文字信源及计算机数据信源等。
- b. **消息**: 由信源产生、通信系统要传送的具体内容。
- c. **信号**: 是消息的载体，即消息的具体表现形式。在通信中表现为电或光的形式。
- d. **信息**: 是消息中抽象出来的、有意义的且可被理解的东西，是内在的与基本的。

联系:

信源产生消息，消息提供信息，  
消息通过信号表现并传输。

## (2) 数字信源与模拟信源

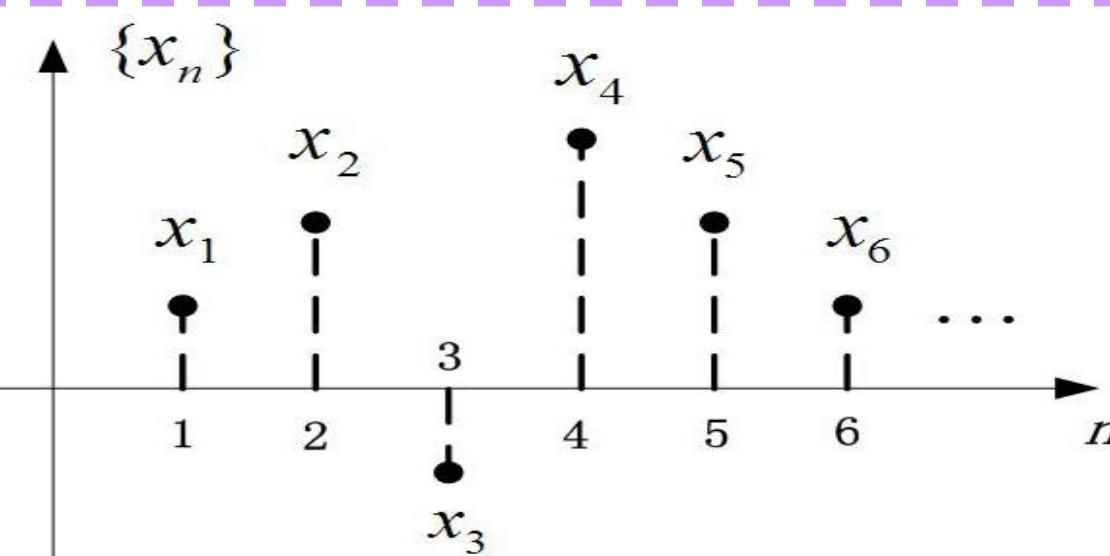
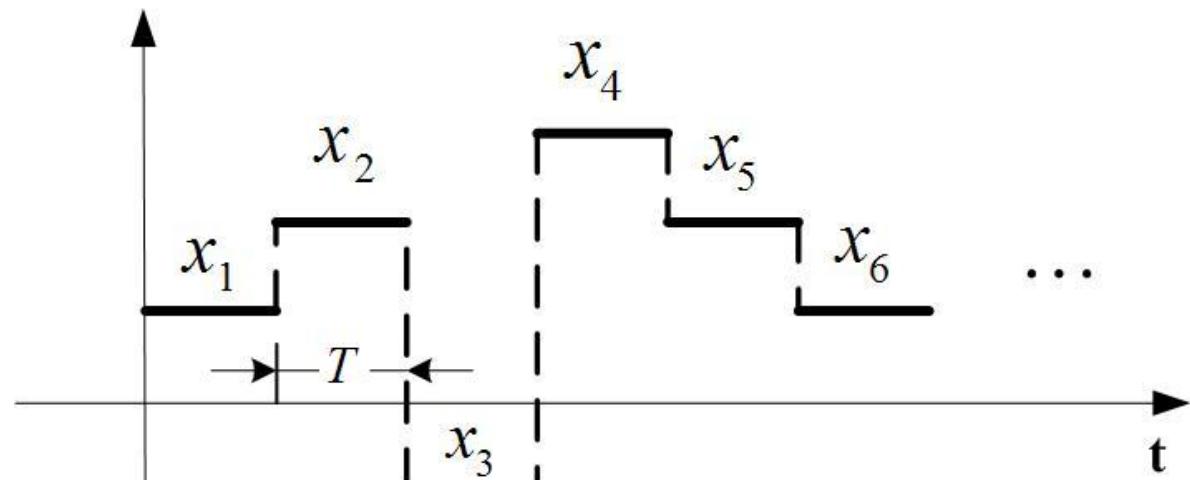
a. 数字信源：消息只有有限种取值。如，键盘。



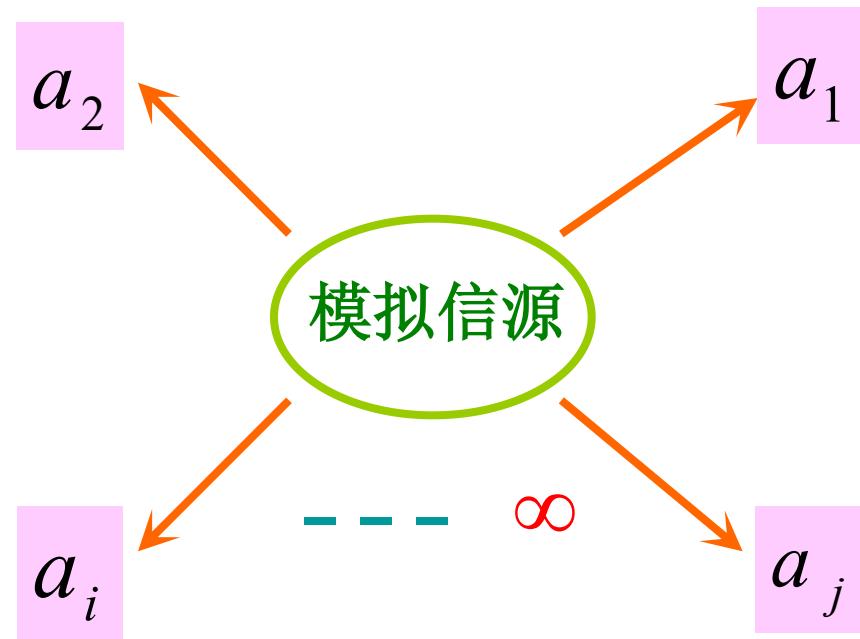
消息符号集： $\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$

数字信源按某个固定时间间隔 $T$ , 不断地产生出消息,  
形成消息符号序列, 形如  $\{x_1, x_2, x_3, \dots\}$

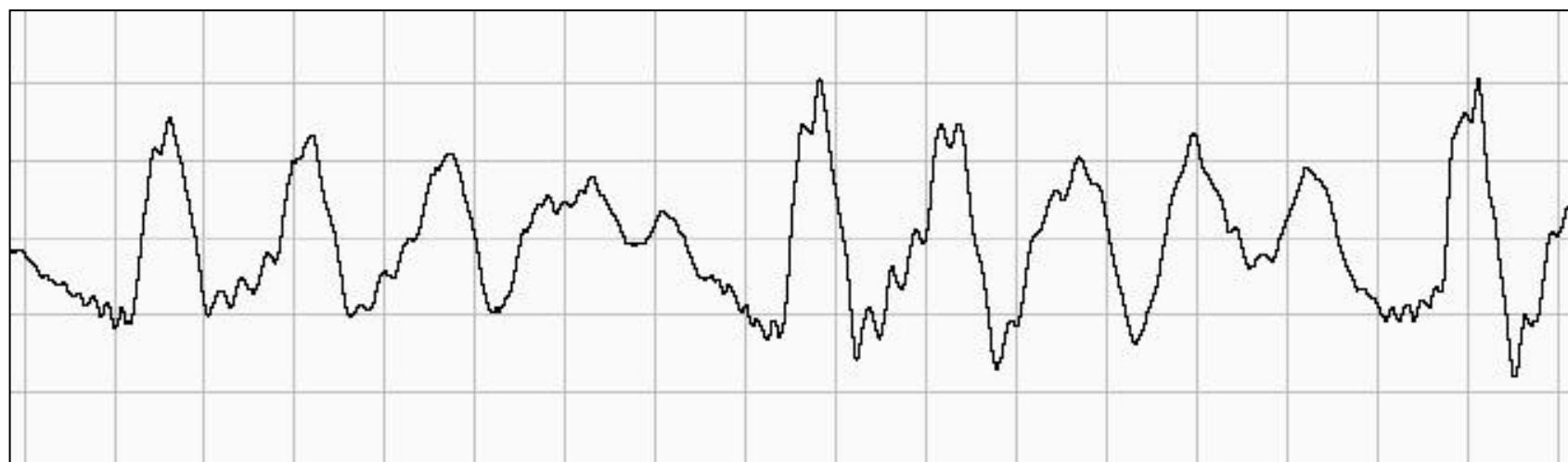
例:



**b. 模拟信源:** 消息是有无限多种取值的连续量。  
如, 语音源。



例:



### (3) 常见的消息类型

#### a. 文字消息——(数字消息)

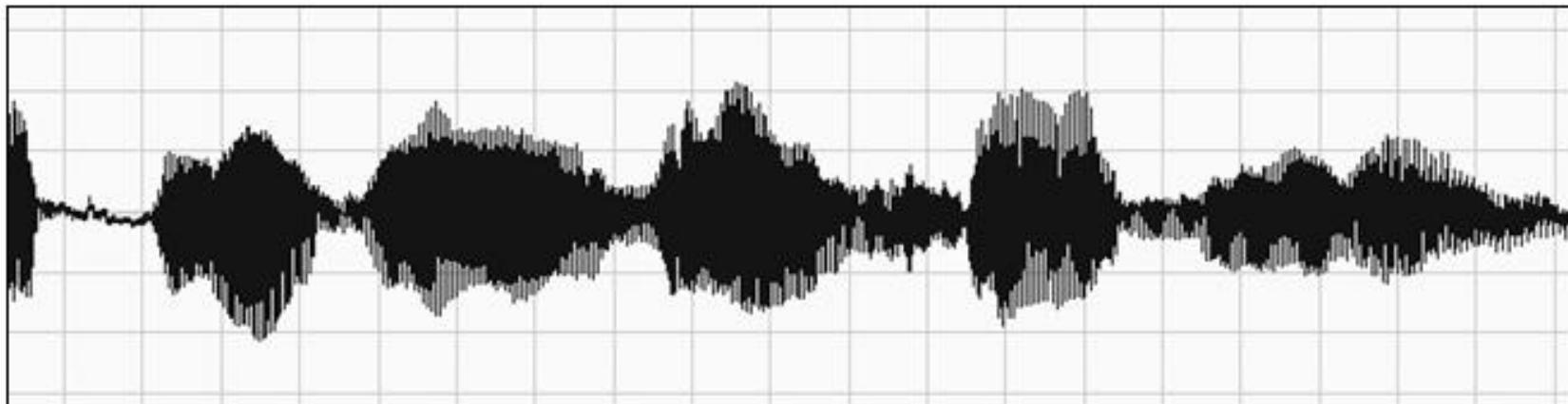
如：手机短消息，电子邮件，最早的 Morse 电报等

Morse 电报编码方法举例：利用点(“·”)与划(“—”)代表长短不同的两种电脉冲信号，相当于二进制符号 0 与 1。

H	E	L	L	O	或	H	E	L	L	O
· · · ·	· — ·	· — ·	— — —			000	0	010	010	111

## b. 语音（或话音）——模拟消息

**模拟语音信号**——利用麦克风把声波转换为电压或电流波形，主要频率成份在（300~3400）Hz 左右。



### c. 音乐 —— 模拟消息

具有更为宽广的频率范围。**立体声音乐信源**：两路模拟信号，频率范围约为 20Hz~15kHz（或 20kHz）。

常常转换为数字形式，如 CD 数码音频与 MP3 数码音频，典型速率分别为 1411.2kbps 与 128~256kbps。

#### d. 图像 —— 模拟消息

图像——人类视觉系统对场景的感知。

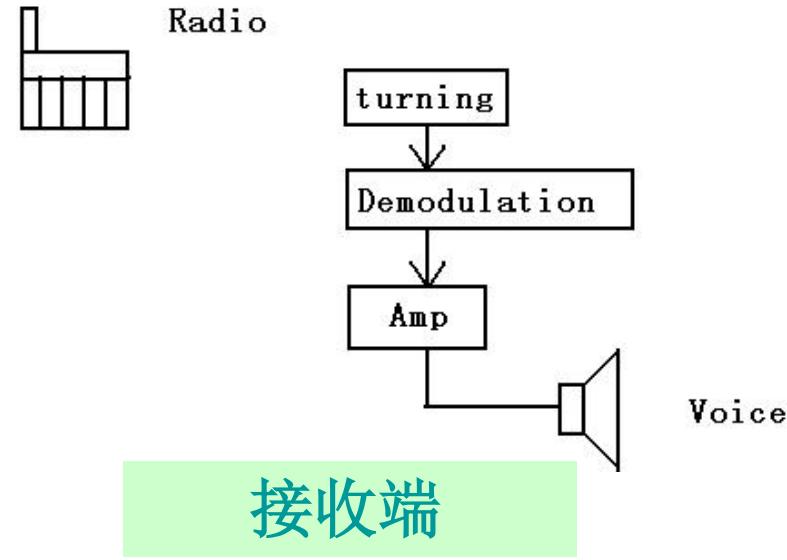
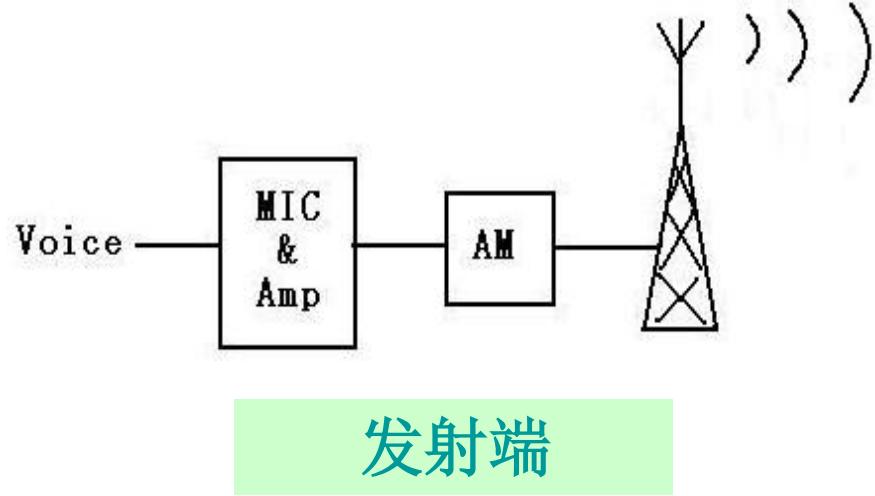
- **模拟电视（或视频）信号**——频带通常在 0~6MHz。
- **数字电视信号**——采用压缩编码，速率通常为几百 kbps 至几 Mbps，与场景内容和拍摄尺寸有关。
- **数码图片**——大都采用 JPEG 压缩编码，数据量与图片的大小、分辨率、图片内容有关。

### e. 计算机的数据 —— 数字消息

计算机的各种信息大都呈现为以字节（8bit）为单位的数字形式，统称为数据。如，电子邮件、软件与资料。

计算机数据通信常常具有突发性的特征。即，需要传输的数据时有时无、时多时少。

### 3. 典型通信系统



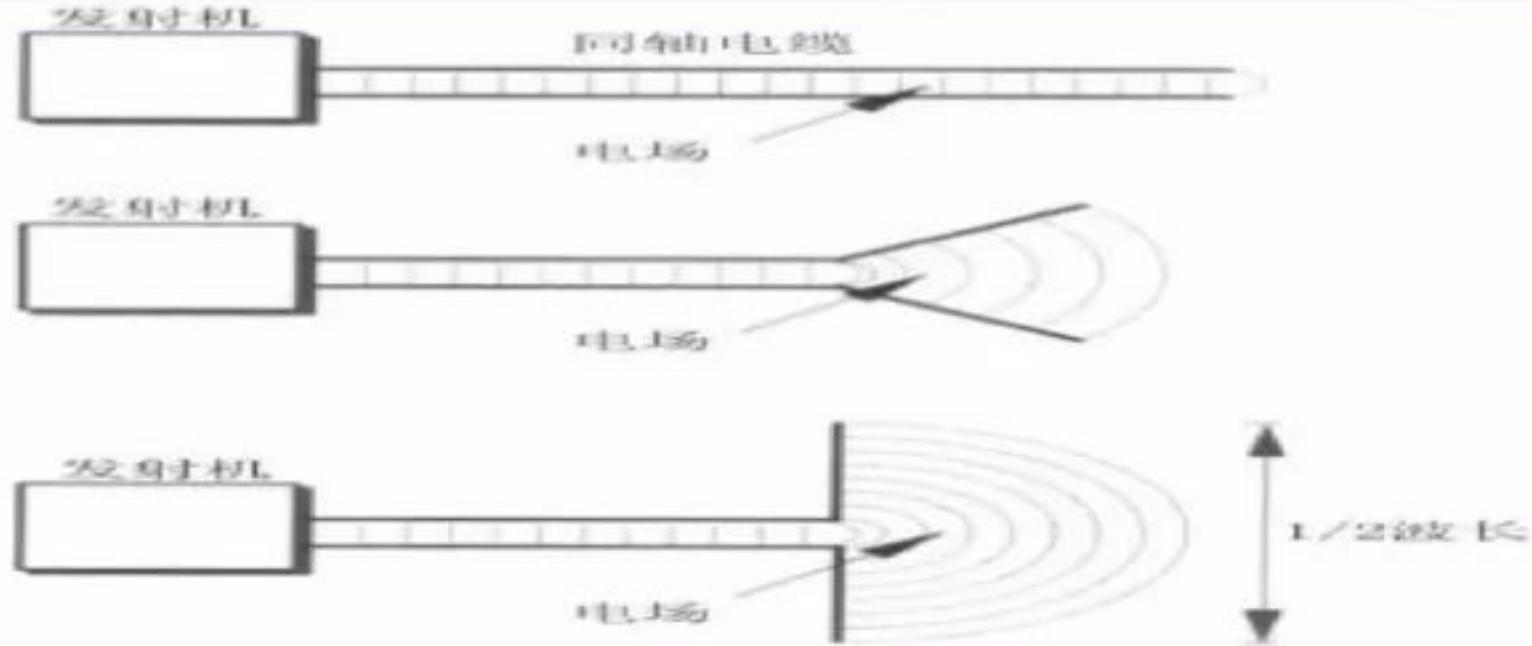
- ◆ 功能 传输信息
- ◆ 消息 事物的状态
- ◆ 信息 消息中的有用部分
- ◆ 信号 信息的载体

# 天线antenna

天线是电波的换能器件，用以发射和接收电磁波。

1. 它把在电路里流动的高频电流通过电磁感应转换成高频电磁波向外辐射；
2. 它也把在空间的电磁波通过感应转换成高频电流。





**波束:** 由天线发射出来的电磁波在地球表面上形成的形状。

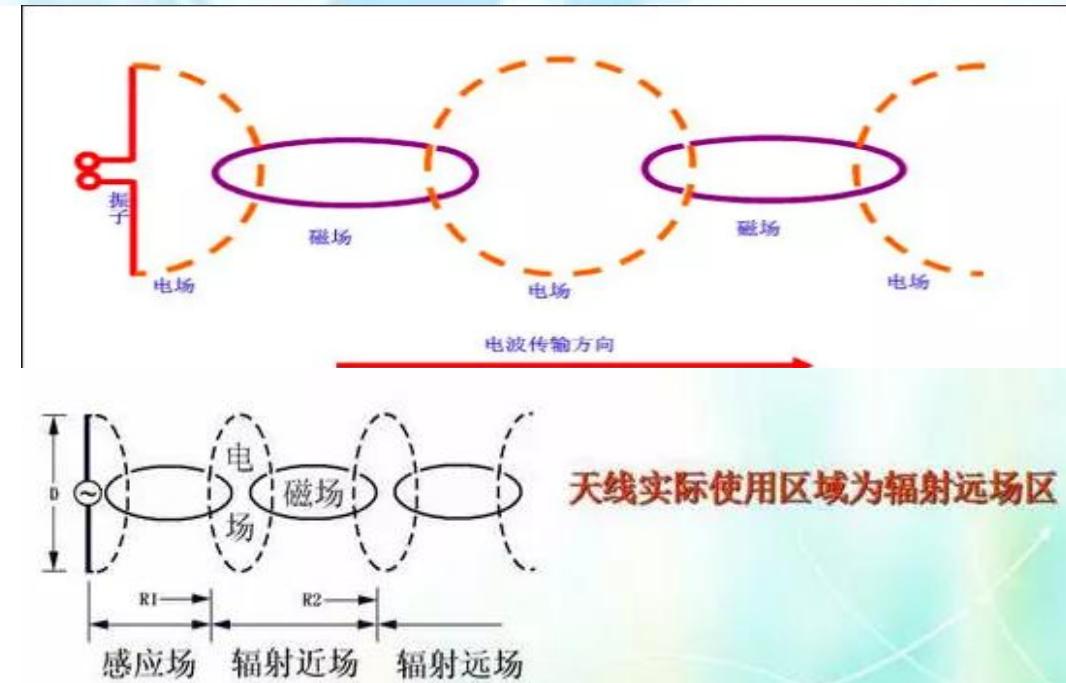
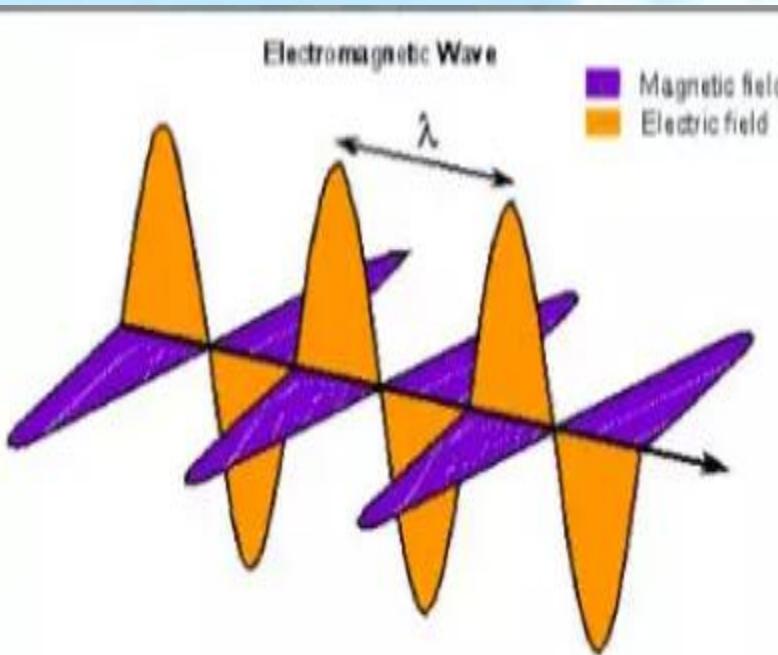
天线波束在空间的扫描形式:

1. 机械转动

2. 电子扫描

## ■ 无线电波的定义

无线电波是一种信号和能量的传播形式，在传播过程中，电场和磁场在空间中相互垂直，且都垂直于传播方向。



无线信号的发射：天线把电场转换为磁场，形成电磁波来传送信号。

无线信号的接收：天线把磁场转换为电场，然后通过线路传送给设备。



如果电磁波能够看见的话那么就是这样的  
(美国摄影师的作品)

## 4. 通信系统的设计

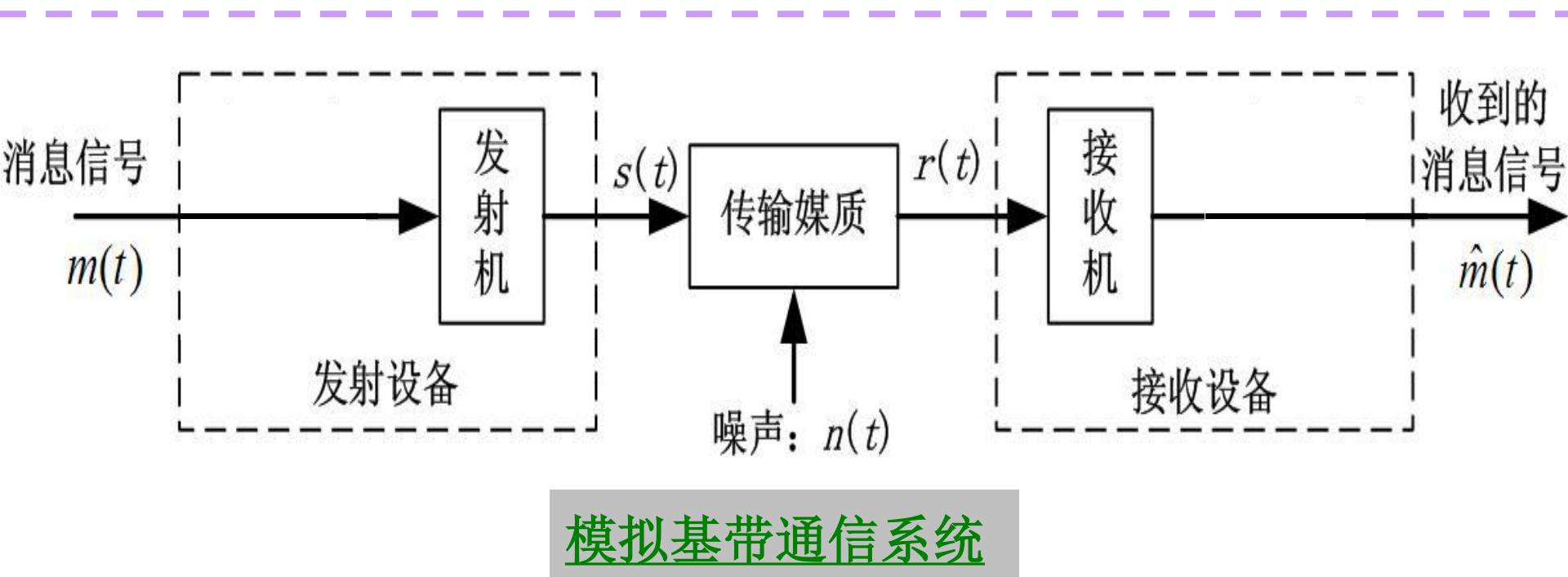
### 设计一个通信系统要考虑的因素

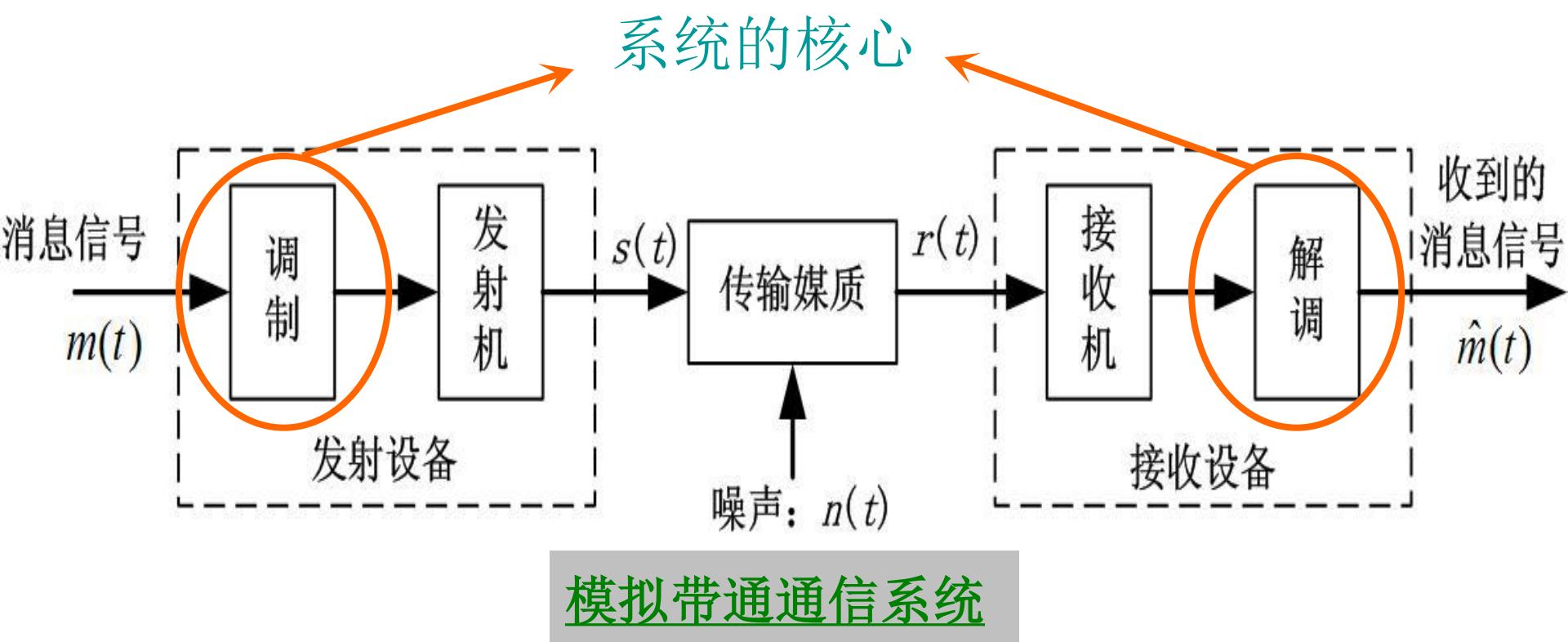
- (1) 能够高效地**携带信息的信号形式**;
- (2) 适合特定传输的**信号波形**，如波形的中心频率、带宽、以及功率与能量等；
- (3) 有效**抑制噪声与干扰**以保障传输质量；
- (4) 系统的**成本**。

## 1.2.2 模拟通信系统模型和数字通信系统模型

1. 模拟通信系统 — 传输模拟消息的通信系统。

分为：模拟基带通信系统和模拟带通通信系统





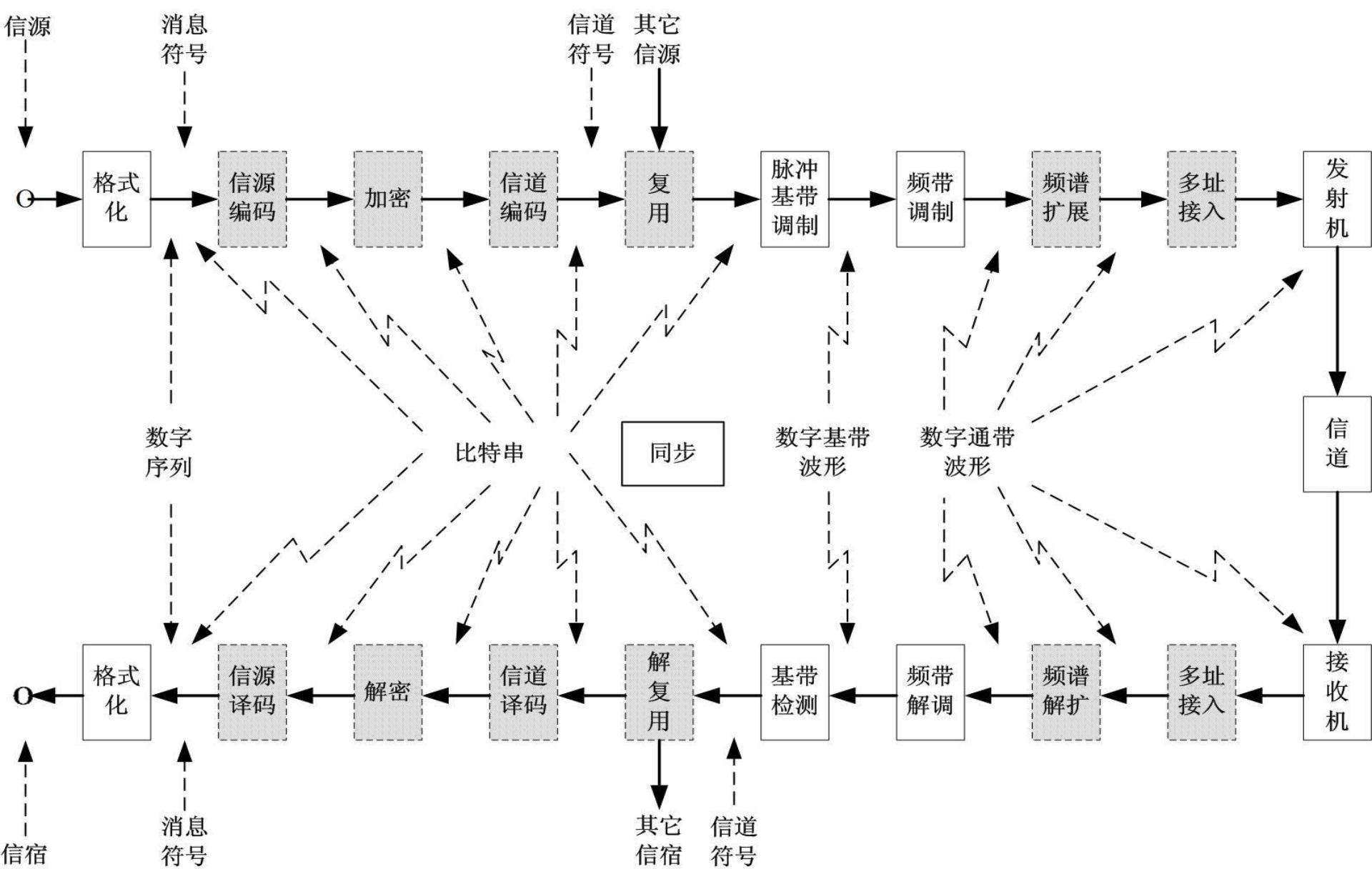
**调制** — 借助于正弦载波形成频带信号:

$$s(t) = R(t) \cos[2\pi f_c t + \theta(t)]$$

$R(t)$ 和 $\theta(t)$ 随信息变化，对应不同的制式。

**解调** — 调制的逆过程。

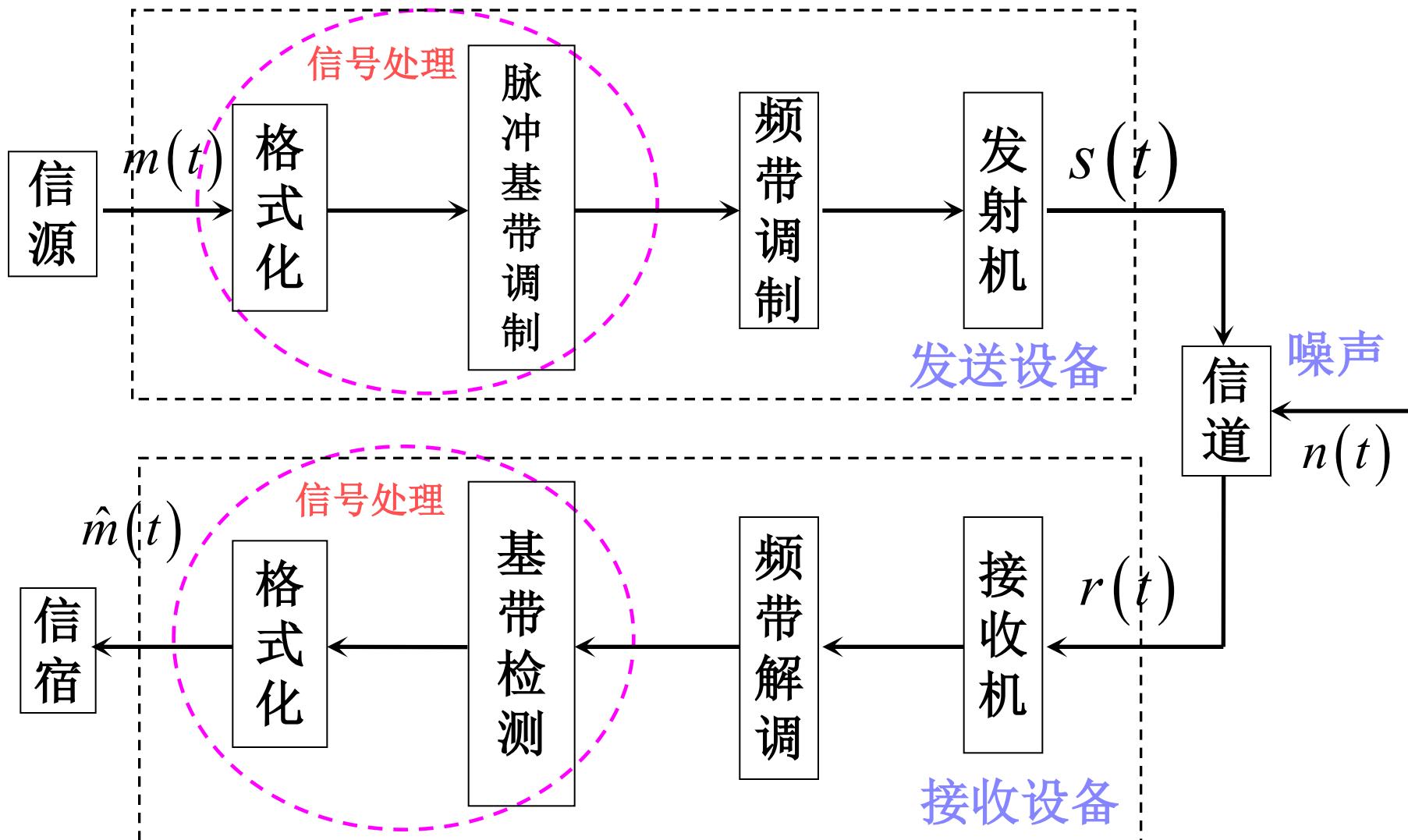
## 2.数字通信系统 — 传输数字消息的通信系统。

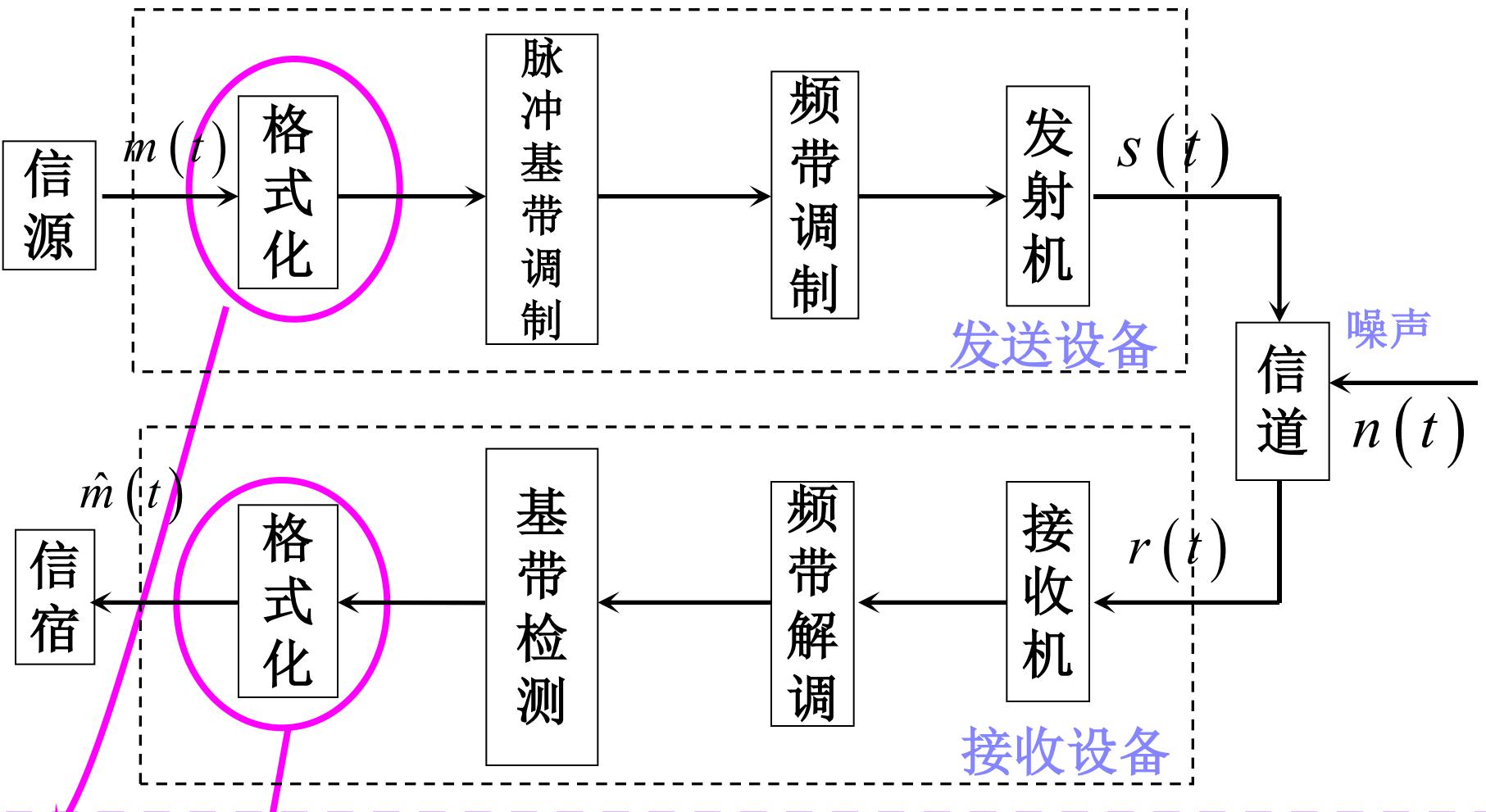


# 简化模型

分为：数字基带通信系统和数字带通通信系统

其中有频带调制和解调单元的为带通系统。没有则为基带系统。

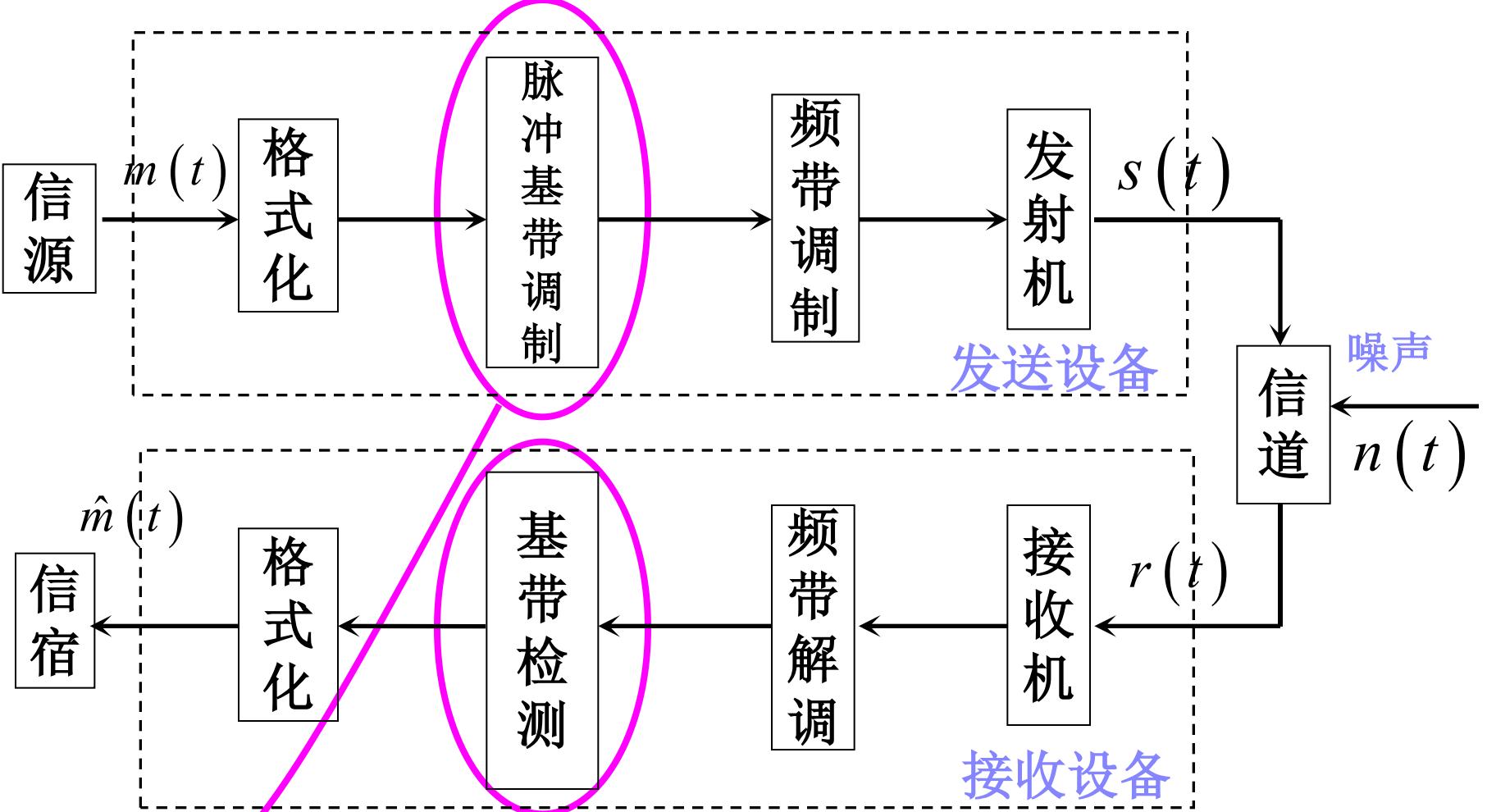




**发格式化**: 把来自信源的消息整理为二进制序列

**收格式化**: 把收到的二进制序列还原为原始消息

对于模拟信源，格式化还包括**A/D**和**D/A**变换。



**脉冲基带调制**: 把二进制序列变换成二元或多元传输波形。

**基带检测**: 把二元或多元传输波形还原为二进制序列。

通过对基带波形进行抽样和判决实现。

### 3.数字通信的特点

#### 优点：

1. 容易再生以避免噪声积累，利于长距离传输；
2. 信号易于分辨，可实现低误码率；
3. 成本低，易调试；
4. 易于进行差错控制、压缩与加密处理；
5. 易于不同种类的信源数据，共用数字通信系统；
6. 便于计算机与网络通信。

#### 缺点：

1. 通常需要更多的带宽；
2. 复杂的同步系统。

# 第1章 绪论

1.1 通信的基本概念

1.2 通信系统的组成

1.3 通信系统分类与通信方式

1.4 信息及其度量

1.5 通信系统主要性能指标

# 1.3 通信系统分类与通信方式

## 1.3.1 通信系统的分类

- 按消息的**物理特征**：话音、数据、图像等。
- 按**调制方式**：详见表 1 – 1
- 按**信号特征**：模拟通信系统和数字通信系统。
- 按**传输媒质**：有线通信系统和无线通信系统。
  - 有线通信--导线、架空明线、同轴、光纤、波导
  - 无线通信--短波电离层、微波视距、卫星中继
- 按**复用方式**：频分复用、时分复用和码分复用。

表 1-1 常见调制方式及用途

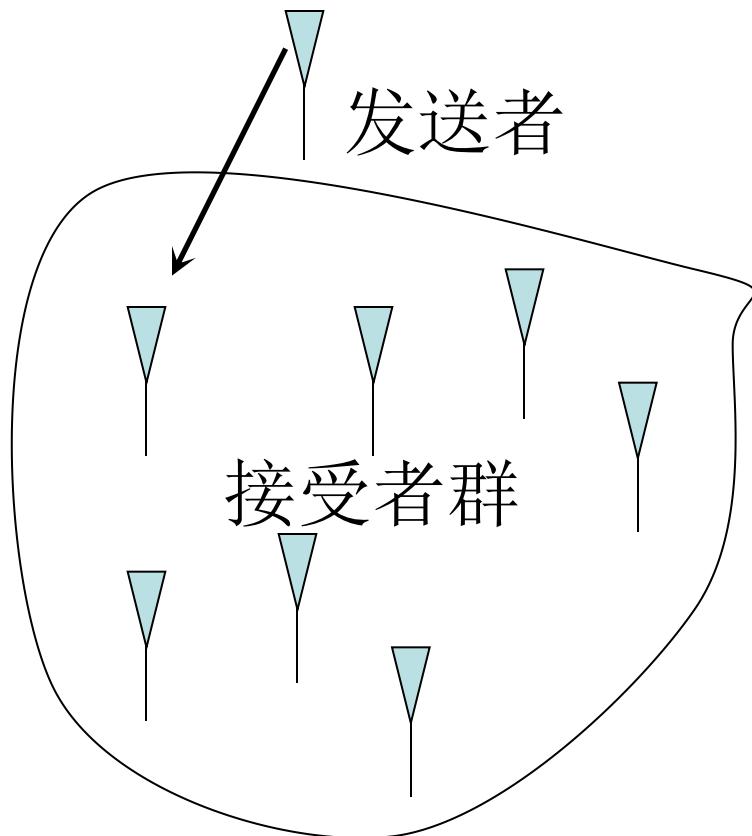
调 制 方 式		用 途 举 例
连续波调制	常规双边带调幅 AM	广播
	双边带调幅 DSB	立体声广播
	单边带调幅 SSB	载波通信、无线电台、数据传输
	残留边带调幅 VSB	电视广播、数据传输、传真
	频率调制 FM	微波中继、卫星通信、广播
	相位调制 PM	中间调制方式
	振幅键控 ASK	数据传输
	频移键控 FSK	数据传输
脉冲调制	相移键控 PSK、DPSK、QPSK	数据传输、数字微波、空间通信
	其他高效数字调制 QAM、MSK	数字微波、空间通信
	脉幅调制 PAM	中间调制方式、遥测
	脉宽调制 PDM ( PWM )	中间调制方式
脉冲数字调制	脉位调制 PPM	遥测、光纤传输
	脉码调制 PCM	市话、卫星、空间通信
	增量调制 DM ( $\Delta M$ )	军用、民用数字电话
	差分脉码调制 DPCM	电视电话、图像编码
	其他话音编码方式 ADPCM	中速数字电话

## 1.3.2 通信方式

### 1. 两种基本通信方式：

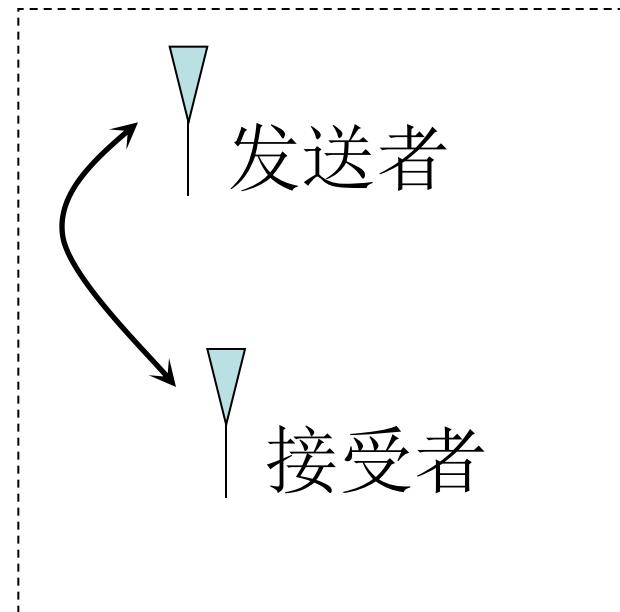
广播方式：

信息同时送到多个收信者



点一点方式：

一个信源对一个收信者

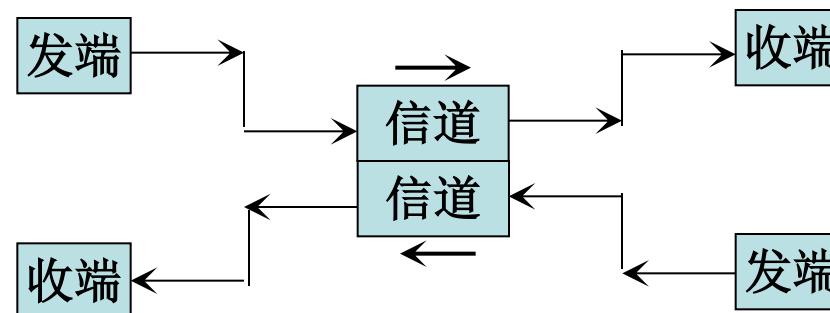


## 2. 在点-点方式中，按传输方向可划分为：

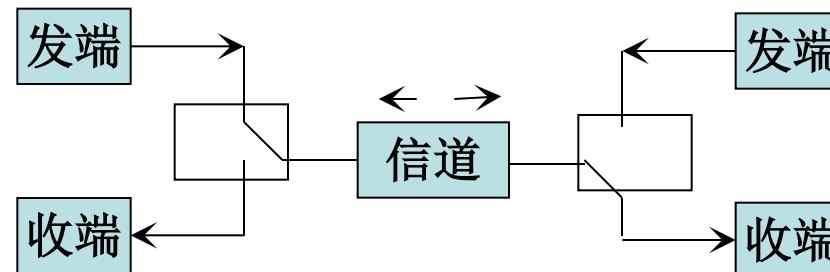
**单工系统：** 只能沿一个固定方向传输信息。如，电视广播。



**双工系统：** 能够同时沿两个方向传输信息。如，电话通信。

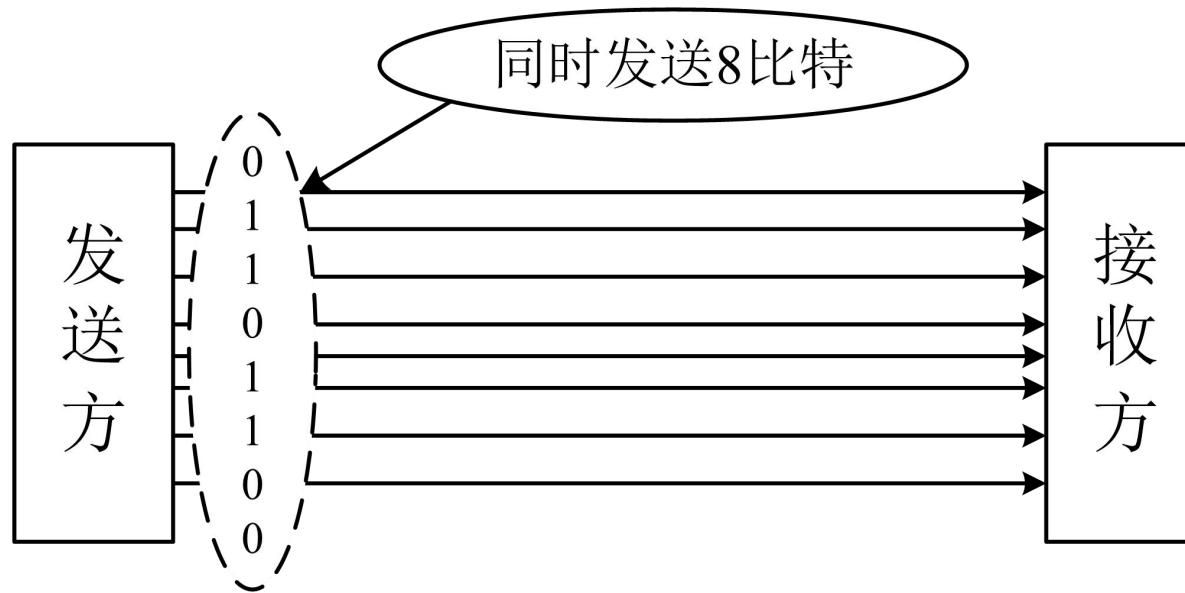


**半双工系统：** 任何时候只能沿一个方向传输信息，但可以切换传输方向。如，对讲机通信。



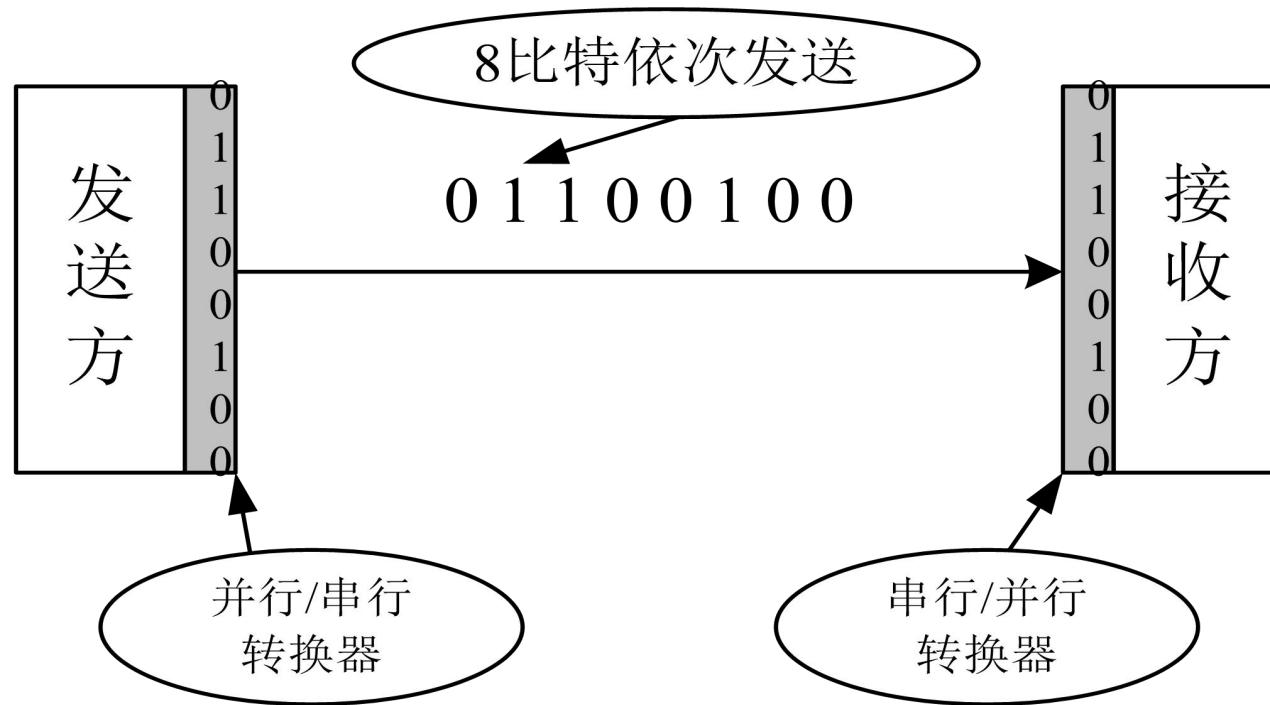
### 3. 在数据通信中，按数据代码排列方式 可分为并行传输和串行传输。

— **并行传输**：将代表信息的数字信号码元序列以成组的方式在两条或两条以上的并行信道上同时传输



**优点：**节省传输时间，速度快；不需要字符同步  
**缺点：**需要  $n$  条通信线路，成本高

**串行传输**：将数字信号码元序列以串行方式一个码元接一个码元地在一条信道上传输



**优点**：只需一条通信信道，节省线路铺设费用  
**缺点**：速度慢，需要外加码组或字符同步措施

## 4. 按同步方式的不同

可分为同步通信和异步通信。

## 5.按通信的网络形式划分

- 由于通信网的基础是点与点之间的通信，  
所以本课程的重点放在点与点之间的通信上。

# 第1章 绪论

1.1 通信的基本概念

1.2 通信系统的组成

1.3 通信系统分类与通信方式

1.4 信息及其度量

1.5 通信系统主要性能指标

# 1.5 通信系统主要性能指标

## 1. 通信系统的基木性能指标

主要性能指标 (1):

\* **有效性** 在给定信道内能传输的信息的多少

{ 模拟通信系统: 用信号的有效传输频带来度量  
数字通信系统: 用信息传输速率来衡量

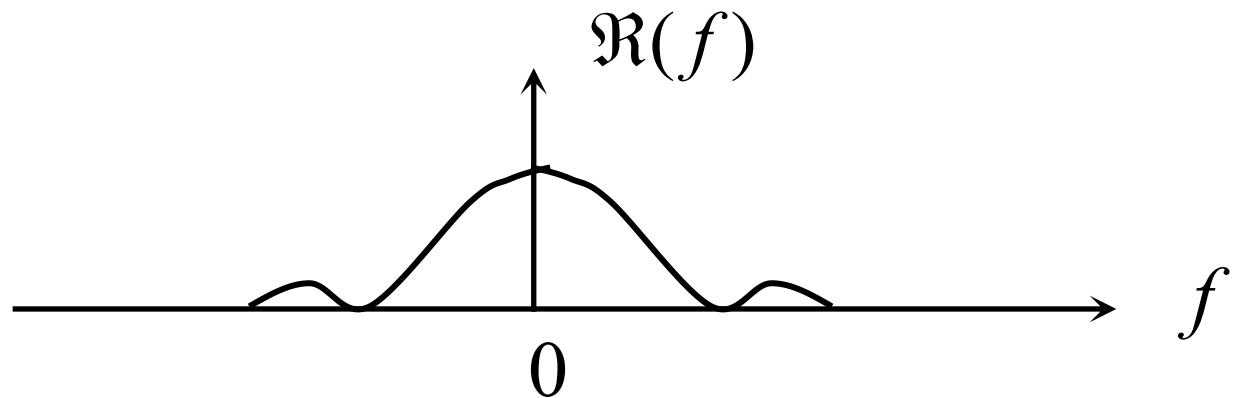
-----  
主要性能指标 (2):

\* **可靠性** 指接收信息的准确程度

{ 模拟通信系统: 用接收端最终输出信噪比来度量  
数字通信系统: 用误比特率和误符号率来衡量

## 2. 模拟通信系统的基本指标

- (1) 频带的宽度（**赫兹**, Hz）。
- (2) 模拟消息信号大多在零赫兹附近——**基带信号**。



### 3. 数字通信系统的基本指标

\* **Bit** (1)信息量单位, (2)传位比特

联系: 当二进制数字0、1取值等概率时, 传送一个二进制数字, 其信息量就等于1 bit。

\* **R<sub>b</sub>** 每秒内系统传送的**比特数**, 其单位为比特 / 秒(bit/s)

\* **R<sub>B</sub>** 每秒内系统传送的符号数, 其单位为波特 (baud)

\* **P<sub>b</sub>** 误比特率  $P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传送总比特数}}$

\* **P<sub>e</sub>** 误码率  $P_e = \frac{\text{错误符号数}}{\text{传送总符号数}}$

## • 1.6 小结

- 通信的目的、电信发明史
- 通信系统的模型
- 数字信号、模拟信号，基带信号、已调信号（带通信号、频带信号）
- 数字通信特点
- 通信系统分类
- 单工、半双工、全双工通信，并行传输和串行传输
- 信息及其度量
- 通信系统的有效性和可靠性

通信：利用电（或光）信号将消息中所包含的信息从信源传送到一个或者多个目的地

