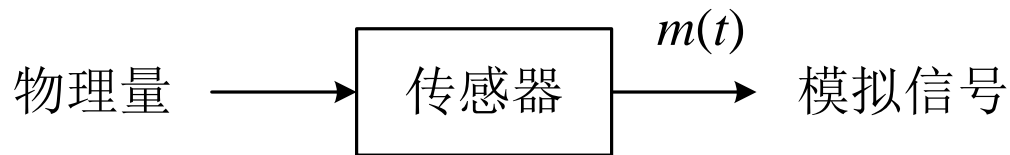


# 第5章 模拟调制系统 (背景知识介绍)

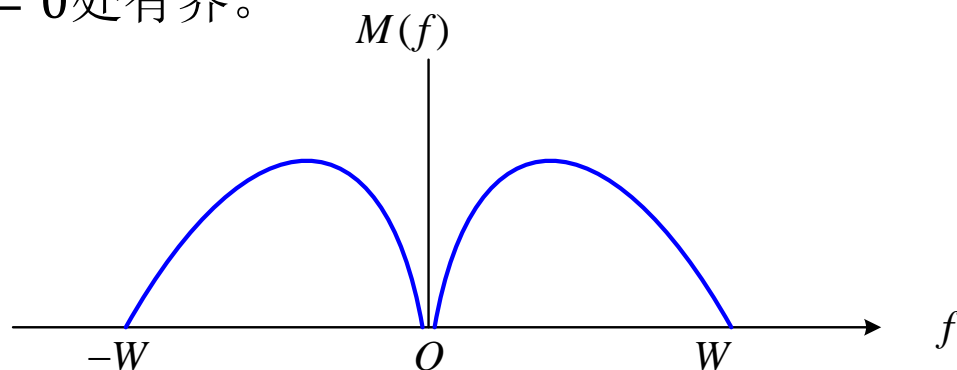
- 目的：把模拟信号 $m(t)$ 从一个地点传送到另一地点
- 所谓**模拟信号**（analog signal），是说 $m(t)$ 在模拟某个物理量的变化。例如麦克风输出的电信号在模拟声波振动。各类传感器输出的电信号都是模拟信号，它们在模拟各种物理量。麦克风、摄像头等都属于传感器。



- $m(t)$ 通常是 $t$ 的连续函数，其特征可以表述为：**时间连续、取值连续**

- “取值连续”是指电压 $m$ 取值于某个连续区间，例如 $m \in (-\infty, +\infty)$  或者 $m \in [-A_m, +A_m]$ 。与连续相对的是离散，例如 $m$ 只取值于 $\{-3, -1, +1, +3\}$ 就属于取值离散。
- “时间连续”是指 $t$ 取值于连续区间，例如 $t \in (-\infty, \infty)$ 。或者 $t \in \left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right]$ 。在该连续区间内的任何时刻 $t$ ，函数 $m(t)$ 都有定义。与此对应的是时间离散，例如对 $m(t)$ 采样后的序列 $\{m_k\}$ 仅在采样时刻 $t \in \{0, \pm T_s, \pm 2T_s, \dots\}$ 有值。
- Remark: 与模拟信号相对的是数字信号（digital signal）。在不同的语境中，“数字信号”所指不同。在数字电路中，数字信号指TTL、ECL等逻辑信号；在数字信号处理中，数字信号指离散时间序列，其取值可以是量化值（离散）或未量化的值（连续）；在通信中，数字信号指表达数字信息的波形，就波形本身来说，时间是连续的，信号取值可能连续也可能离散。但所携带的数字信息是时间离散、取值离散的。

- 传感器输出的模拟信号 $m(t)$ 通常是基带信号。本章假设 $m(t)$ 是零均值的实基带信号，其绝对带宽是 $W$ 。
- 本章中的模拟基带信号 $m(t)$ 可以是能量信号也可以是确定信号，可以是确定信号也可以是随机信号。
  - **实信号**意味着 $m(t)$ 的频谱密度共轭对称： $M(f) = M^*(-f)$ 。对于功率信号，功率谱密度是偶函数： $P_m(f) = P_m(-f)$ 。
  - **基带信号**意味着 $m(t)$ 的频谱主要集中在 $f = 0$ 附近。 $M(f)$ 或 $P_m(f)$ 在区间 $[-W, W]$ 之外为零。
  - **零均值**意味着 $\overline{m(t)} = 0$ ，即 $m(t)$ 没有直流分量，其频谱（傅氏变换或功率谱密度）在 $f = 0$ 处有界。



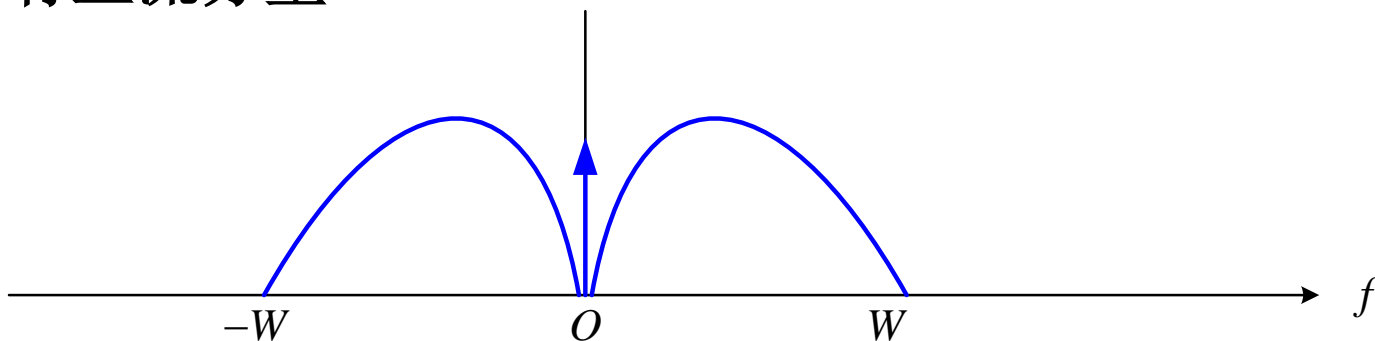
Remark: 表述“信号 $s(t)$ 包含xx分量”可以有多种理解。在多数情况下，“信号 $s(t)$ 包含xx分量”表示“该信号中可以分离出一个单独的xx分量。”在这些情形中，单独存在的xx分量可能有特别的意义，或者可能是我们想要提取的分量

例如：

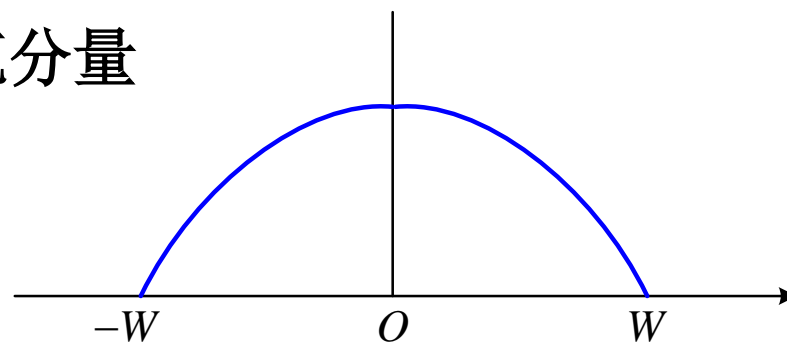
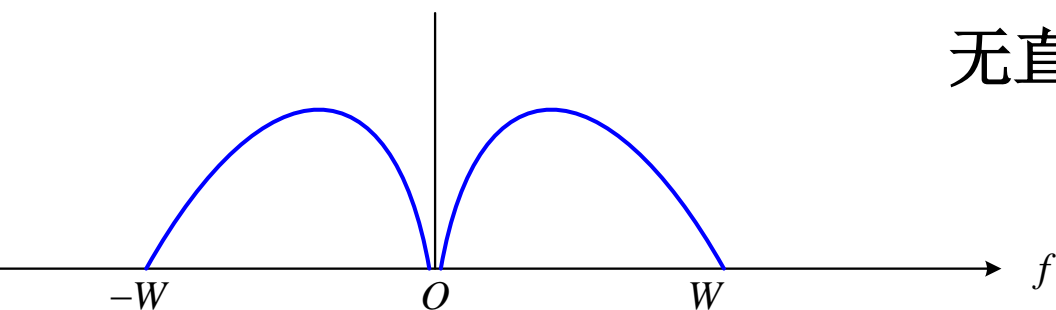
- $s(t) = A + \text{rect}(t)\cos(200\pi t)$ 包含直流分量 $A$
- $s(t) = [3 + \text{rect}(t)]\cos(2\pi f_c t)$ 包含载波分量 $\cos(2\pi f_c t)$ ，  
因为 $s(t) = 3\cos(2\pi f_c t) + \text{rect}(t)\cos(2\pi f_c t)$
- $s(t) = \text{rect}(t)\cos(200\pi t)$ 不包含直流分量
- $s(t) = \text{rect}(t)\cos(2\pi f_c t)$ 不包含载波分量 $\cos(2\pi f_c t)$

下面示出了三个信号的频谱图（傅氏变换的幅度谱，或者是功率信号的功率谱密度），第一个有直流分量，后两个无直流分量

有直流分量



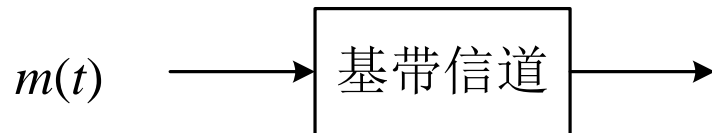
无直流分量



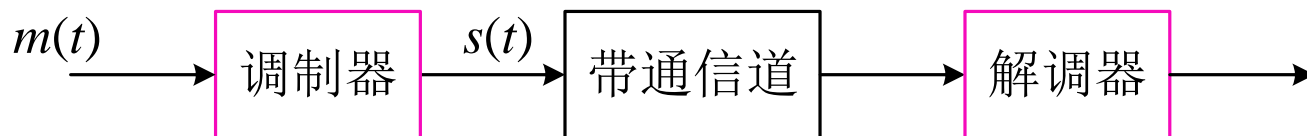
# 模拟基带信号的传输

模拟基带信号 $m(t)$ 的传输可以有以下几种情形。

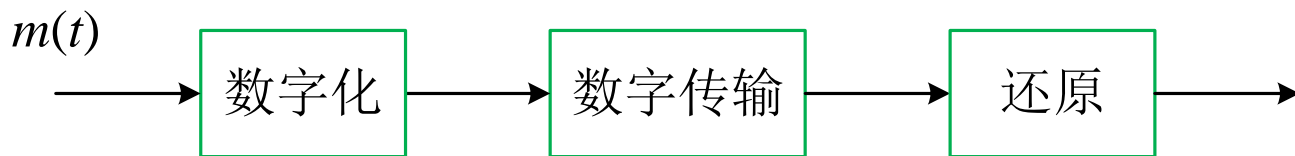
- 模拟信号基带传输



- 模拟信号频带传输（本章内容）

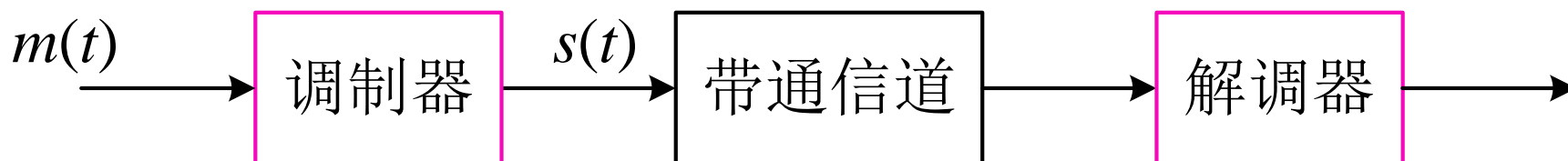


- 模拟信号数字化传输：数字化之后用数字通信来传输



注：本课所用词语中，“频带信道” = “带通信道”，“基带信道” = “低通信道”

# 模拟基带信号的频带传输

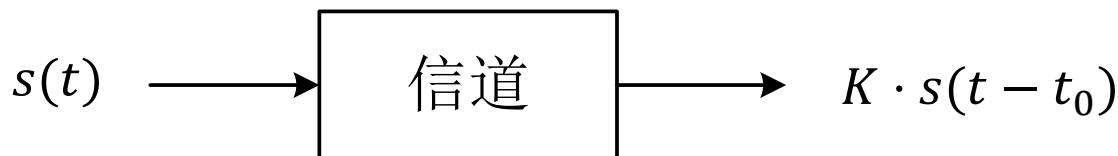


能够通过带通信道的只能是带通信号，我们想传的 $m(t)$ 是基带信号，为此在发送端需要把基带信号 $m(t)$ 变成带通信号 $s(t)$ 。这个操作称为**调制**（modulation）。称 $m(t)$ 为**调制信号**（modulating signal），称携带 $m(t)$ 的 $s(t)$ 为**已调信号**（modulated signal）。

收端做相反的事情，称为**解调**（demodulation）。

# 无失真信道 (distortion less channel)

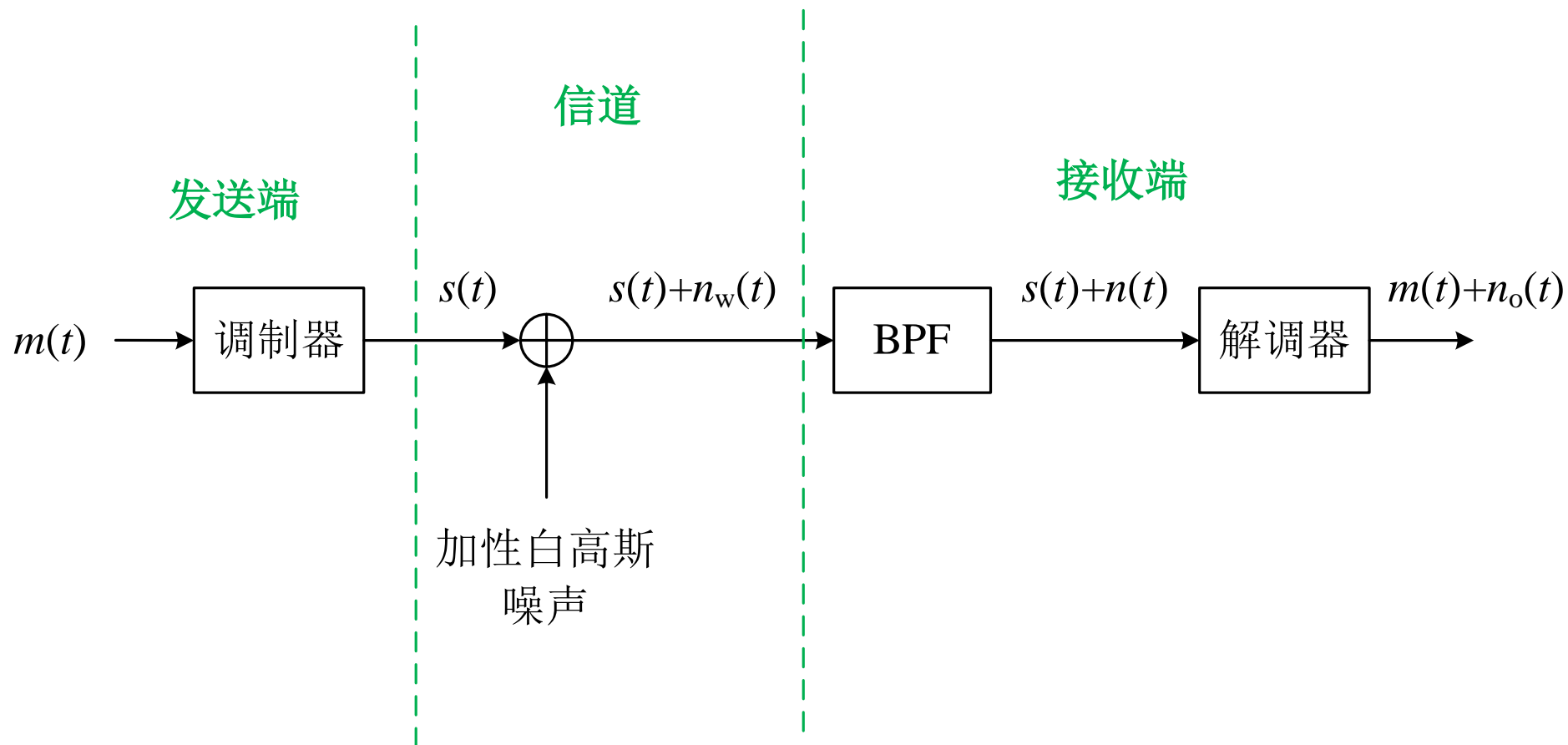
- 本章假设传输已调信号 $s(t)$ 的带通信道是理想无失真信道
- 对于接收端恢复信息来说，收到的信号大小与发送端不同不是问题，加一个放大器就好；信号到达接收端的时间稍微晚一点，比如延迟几个微秒毫秒也没关系。但如果到达接收端的波形样子与发送波形不同，就是问题。波形形状不同，就是有失真（distortion）。
- **无失真**：波形的形状不变，可以有延迟，可以幅度不同



- 本章默认假设 $K = 1$ 、 $t_0 = 0$



# 系统模型



因为有信道噪声，所以接收端在解调之前，先用一个带通滤波器（band-pass filter）来抑制噪声

# 模拟调制的基本思路

## ■ 目标：

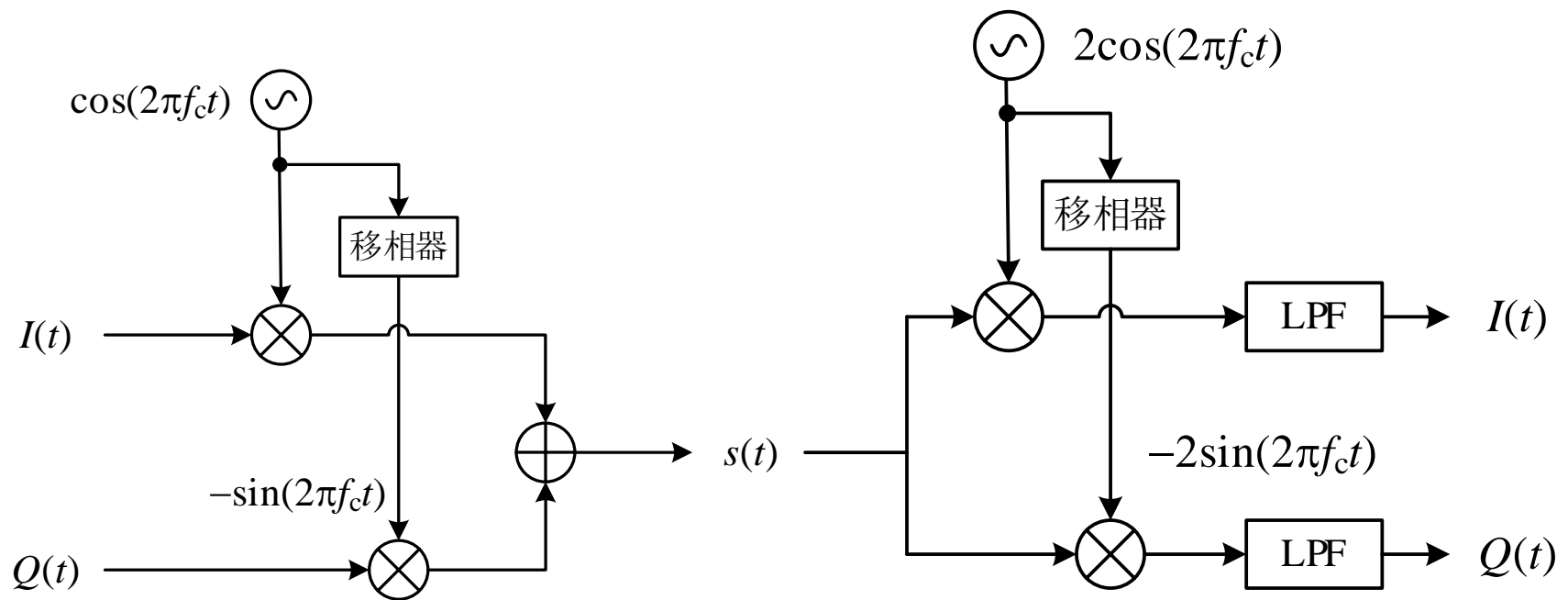
- 发送端：把基带信号 $m(t)$ 变成带通信号 $s(t)$
- 接收端：从带通信号 $s(t)$ 中恢复出 $m(t)$

## ■ 思路

- 发送端：让 $s(t)$ 的复包络 $s_L(t)$ 携带 $m(t)$
- 接收端：从复包络中获得 $m(t)$

现代通信设备（例如你的手机）中，发送端标配有I/Q调制器（或者叫正交调制器），其输入是一对实信号，分别是 $s(t)$ 的同相分量和正交分量，输出是 $s(t)$ 。也即：I/Q调制器负责把复包络变成带通信号。接收端标配有I/Q解调器，做相反的工作，其输出是接收到的带通信号的同相、正交分量。

# I/Q调制与I/Q解调

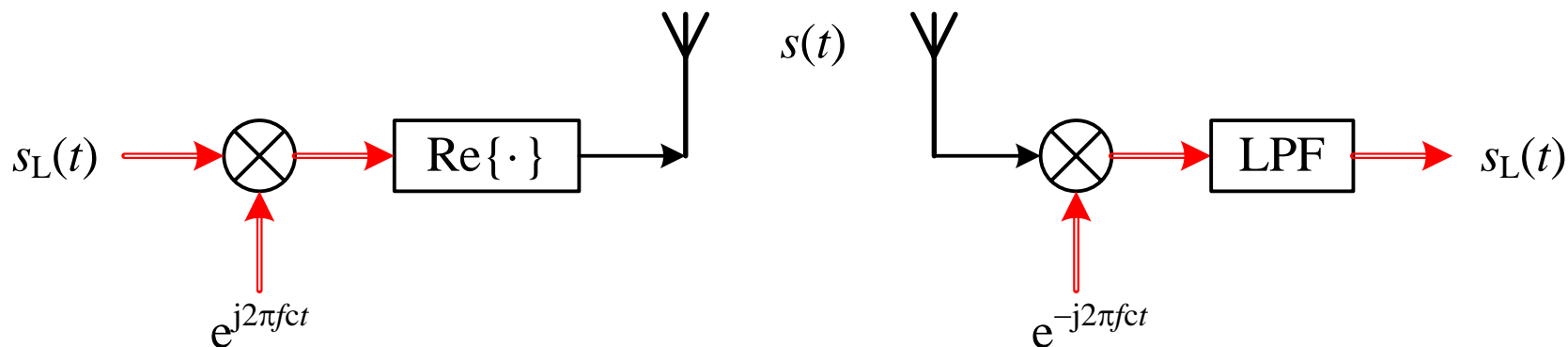


$$s(t) = I(t)\cos(2\pi f_c t) - Q(t)\sin(2\pi f_c t)$$

$I(t)$ 、 $Q(t)$ 分别是 $s(t)$ 的同相分量和正交分量

# 复调制与复解调

以上正交调制解调过程也可以用复数表示为复调制（complex modulator）和复解调（complex demodulator）



图中红线部分是复信号，是一对实信号。复载波 $e^{j2\pi f_c t}$ 表示 $\cos$ 和 $\sin$ 这一对实载波；复包络表示I路和Q路的一对实信号。实际传输的是解析信号的实部。

$$s_L(t) = I(t) + j \cdot Q(t) \quad z(t) = s_L(t) e^{j2\pi f_c t}$$

$$s(t) = \text{Re}\{z(t)\} = I(t)\cos(2\pi f_c t) - Q(t)\sin(2\pi f_c t)$$

# 模拟调制的典型方法

## ■ 幅度类调制

- 复包络直接就是 $m(t)$ ——DSB-SC
- 包络（复包络的模）携带 $m(t)$ ——AM
- 复包络是 $m(t)$ 的解析信号——SSB

## ■ 角度类调制

- 复包络的相位 $\varphi(t)$ 与 $m(t)$ 成正比——PM
- $\varphi(t)$ 的时间变化率 $\varphi'(t)$ 与 $m(t)$ 成正比——FM

# 关键性能指标

- 发送端：已调信号的带宽及频谱特征
  - 涉及频谱资源的占用情况（效率）
- 接收端：输出信噪比
  - 涉及抗噪声能力（质量）

$$\text{信噪比 } \left(\frac{S}{N}\right)_o = \frac{\overline{m^2(t)}}{E[n_o^2(t)]}$$

输出信噪比定义为输出端有用信号 $m(t)$ 的平均功率比上输出端噪声 $n_o(t)$ 的平均功率。注意是平均功率的比值，不是功率比值的平均。如果 $m(t)$ 是随机信号，分子需要代成随机过程的平均功率 $E[\overline{m^2(t)}] = \overline{E[m^2(t)]}$ 。

# 小结

- 模拟信号的特征：时间连续、取值连续
- 本章默认假设 $m(t)$ 是零均值（无直流分量）实基带信号
- 模拟基带信号通过带通信道传输时，必须要进行调制和解调
- 理想无失真信道：可以有延迟，可以有幅度变化，但波形的样子不变： $s(t) \rightarrow K \cdot s(t - t_0)$
- 模拟调制的基本思路：让复包络携带 $m(t)$
- 关键性能指标
  - 发送端：带宽、频谱特征
  - 接收端：输出信噪比
- 本章的系统模型

