



西安电子科技大学

通信工程学院

# 通信原理

任光亮

[glren@mail.xidian.edu.cn](mailto:glren@mail.xidian.edu.cn)

本文件仅供西安电子科技大学通信原理课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

西安电子科技大学 通信工程学院  
2020年11月





# 第8章 数字信号的最佳接收

西安电子科技大学

通信工程学院

## 本章主要内容:

- ★ 数字信号的最佳接收准则
- ★ 匹配滤波器的原理
- ★ 确知信号的最佳接收机结构及误码性能
- ★ 随相信号的最佳接收机结构及误码性能
- ★ 实际接收机与最佳接收机的性能比较

本章作业：1，3，4，8，9，10，11，14



# 第8章 数字信号的最佳接收

西安电子科技大学

通信工程学院

**最佳接收：**以**接收**问题作为研究对象，研究从噪声中如何**最好**地提取有用信号。

最佳接收  $\Rightarrow$  相对的概念

数字通信中常用的最佳接收准则：

- ①最大输出信噪比准则
- ②最小差错概率准则

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

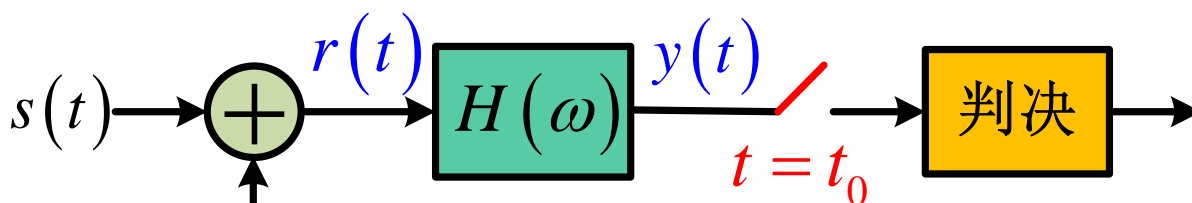


# 8.1 匹配滤波器

西安电子科技大学

通信工程学院

## 一、接收过程的等效原理图



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

**分析：**滤波器应具有什么样的特性才能使输出信噪比达到最大。



# 8.1 匹配滤波器

西安电子科技大学

通信工程学院

## 二、匹配滤波器的传输函数

入:  $r(t) = s(t) + n(t)$

出:  $y(t) = [s(t) + n(t)] * h(t) = s_o(t) + n_o(t)$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$s_o(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) S(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

$$\therefore P_{n_o}(\omega) = \frac{n_0}{2} |H(\omega)|^2$$

$$\therefore N_o = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P_{n_o}(\omega) d\omega = \frac{n_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H(\omega)|^2 d\omega$$



## 8.1 匹配滤波器

西安电子科技大学

通信工程学院

抽样时刻  $t_0$

$$r_o = \frac{|s_o(t_0)|^2}{N_o} = \frac{\left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) S(\omega) e^{j\omega t_0} d\omega \right|^2}{\frac{n_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H(\omega)|^2 d\omega}$$

施瓦兹不等式:

$$\left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) Y(\omega) d\omega \right|^2 \leq \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} |X(\omega)|^2 d\omega \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |Y(\omega)|^2 d\omega$$

当  $X(\omega) = KY^*(\omega)$  时, 等号成立



# 8.1 匹配滤波器

西安电子科技大学

通信工程学院

$$\text{令 } X(\omega) = H(\omega), Y(\omega) = S(\omega)e^{j\omega t_0}$$

$$r_o \leq \frac{\frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} |H(\omega)|^2 d\omega \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)e^{j\omega t_0}|^2 d\omega}{\frac{n_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H(\omega)|^2 d\omega}$$

$$\frac{n_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H(\omega)|^2 d\omega$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$= \frac{\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega}{n_0} = \frac{2E}{n_0}$$

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt \quad \text{总能量}$$



# 8.1 匹配滤波器

西安电子科技大学

通信工程学院

等号成立的条件:

$$H(\omega) = KS^*(\omega)e^{-j\omega t_0}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于

$$r_{o\max} = \frac{2E}{n_0}$$





# 8.1 匹配滤波器

西安电子科技大学

通信工程学院

## 三、匹配滤波器的单位冲激响应

实信号:  $S^*(\omega) = S(-\omega)$

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

本文件仅供西安电子科技大学通信工程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} KS(-\omega) e^{-j\omega t_0} e^{j\omega t} d\omega$$

$$= \frac{K}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(-\omega) e^{-j\omega(t_0-t)} d\omega$$

$$= \frac{K}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega') e^{j\omega'(t_0-t)} d\omega'$$

$$= Ks(t_0 - t)$$

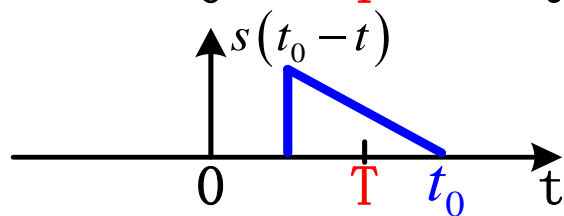
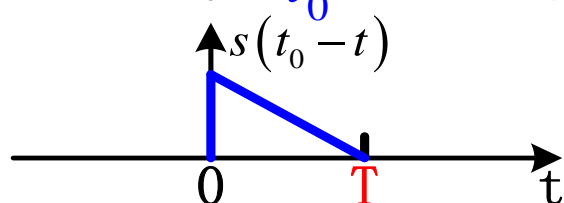
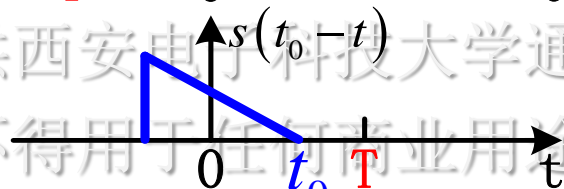
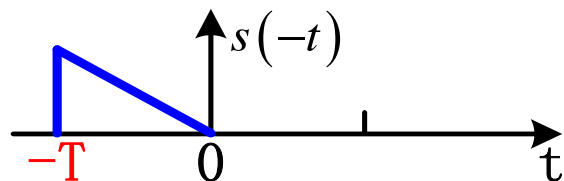
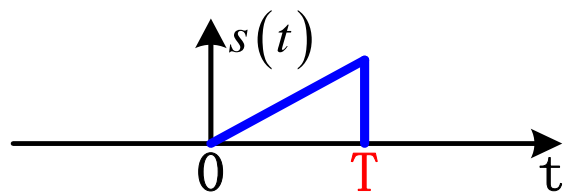
镜像加平移



# 8.1 匹配滤波器

西安电子科技大学

通信工程学院



对于因果系统，若 $s(t)$ 在 $T$ 时刻结束，则

$$t_0 \geq T$$

一般取 $t_0 = T$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



# 8.1 匹配滤波器

西安电子科技大学

通信工程学院

## 四、匹配滤波器的输出信号

$$s_o(t) = s(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t-\tau) h(\tau) d\tau$$

$$= K \int_{-\infty}^{\infty} s(t-\tau) s(t_0 - \tau) d\tau$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$= K \int_{-\infty}^{\infty} s(x) s(x+t-t_0) dx$$

$$= KR(t-t_0)$$

相关器

若K=1

$$s_o(t) = R(t-t_0)$$

$$s_o(t_0) = R(0) = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt = E$$



# 8.1 匹配滤波器

西安电子科技大学

通信工程学院

小结:  $H(\omega) = KS^*(\omega)e^{-j\omega t_0}$

$$h(t) = Ks(t_0 - t) \quad \text{镜像加平移}$$

$$r_{o\max} = \frac{2E}{n_0}$$

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt$$

$$s_o(t) = KR(t - t_0) \quad \text{相关器}$$

一般取  $K = 1$

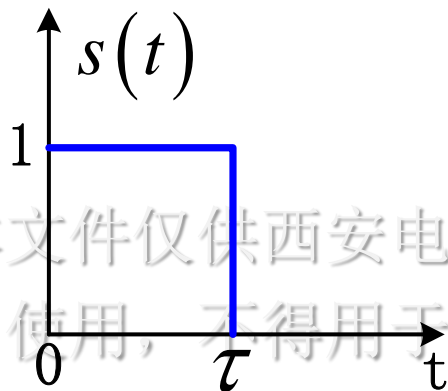


## 8.1 匹配滤波器

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】输入信号如图所示，求该信号的匹配滤波器的传输函数、输出信号波形和最大输出信噪比。



解:  $s(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq \tau \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$

$$S(\omega) = \int_0^{\tau} e^{-j\omega t} dt = \frac{1}{j\omega} (1 - e^{-j\omega\tau})$$

$$H(\omega) = S^*(\omega) e^{-j\omega t_0} = \frac{1}{j\omega} (e^{j\omega\tau} - 1) e^{-j\omega t_0}$$

$$h(t) = s(t_0 - t)$$



# 8.1 匹配滤波器

西安电子科技大学

通信工程学院

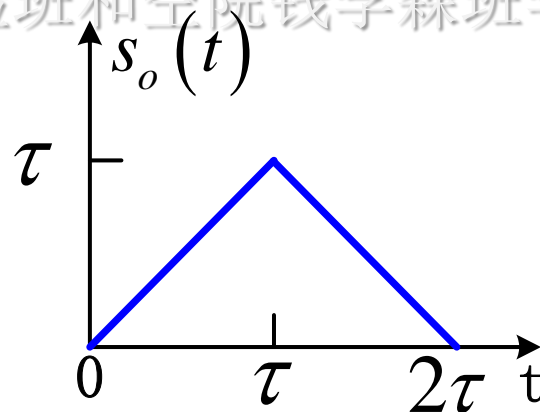
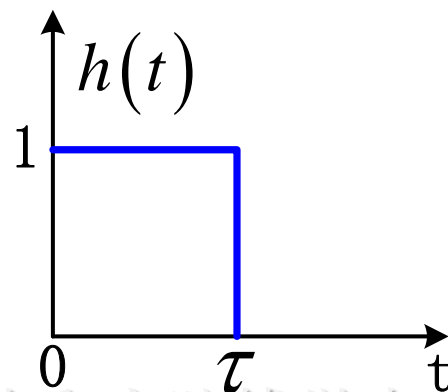
$$\text{令 } t_0 = \tau \quad H(\omega) = \frac{1}{j\omega} (1 - e^{-j\omega\tau})$$

$$h(t) = s(\tau - t)$$

$$s_o(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(x)h(t-x)dx$$

$$= \begin{cases} t, & 0 \leq t \leq \tau \\ 2\tau - t, & \tau \leq t \leq 2\tau \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$\because E = \tau \quad \therefore r_{o\max} = \frac{2E}{n_0} = \frac{2\tau}{n_0}$$



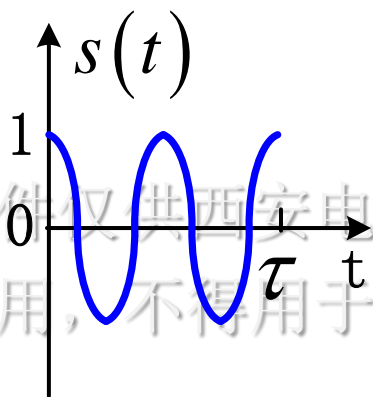


# 8.1 匹配滤波器

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】输入信号如图所示，求该信号的匹配滤波器的传输函数、输出信号波形和最大输出信噪比。



$$s(t) = \begin{cases} \cos \omega_0 t, & 0 \leq t \leq \tau \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$\tau = KT_0 = \frac{2K\pi}{\omega_0}$$



## 8.1 匹配滤波器

西安电子科技大学

通信工程学院

解：令  $t_0 = \tau$

$$h(t) = s(\tau - t) = \cos \omega_0 (\tau - t) = \cos \omega_0 t = s(t)$$

$$H(\omega) = S(\omega)$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$\begin{aligned} H(\omega) &= \int_0^\tau \cos \omega_0 t e^{-j\omega t} dt \\ &= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{j(\omega - \omega_0)} + \frac{1}{j(\omega + \omega_0)} \right] (1 - e^{-j\omega\tau}) \end{aligned}$$





# 8.1 匹配滤波器

西安电子科技大学

通信工程学院

$$s_o(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(x) h(t-x) dx = \begin{cases} \frac{t}{2} \cos \omega_0 t + \frac{1}{2\omega_0} \sin \omega_0 t, & 0 \leq t \leq \tau \\ \frac{2\tau - t}{2} \cos \omega_0 t - \frac{1}{2\omega_0} \sin \omega_0 t, & \tau \leq t \leq 2\tau \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$\text{当 } \omega_0 \gg 1 \quad s_o(t) \approx \begin{cases} \frac{t}{2} \cos \omega_0 t, & 0 \leq t \leq \tau \\ \frac{2\tau - t}{2} \cos \omega_0 t, & \tau \leq t \leq 2\tau \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$



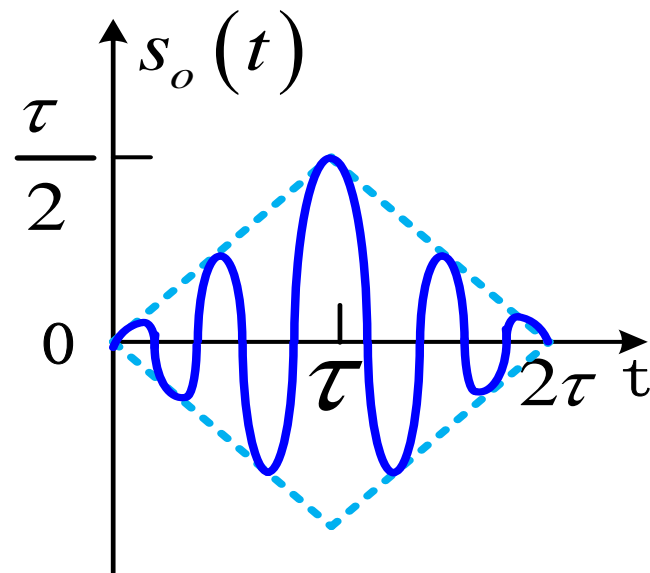
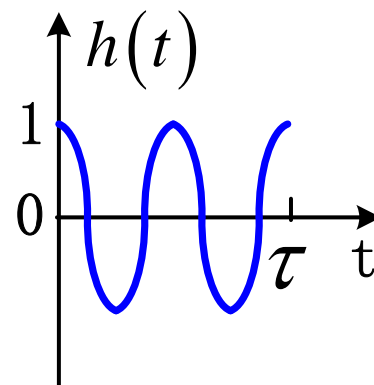
# 8.1 匹配滤波器

西安电子科技大学

通信工程学院

$$\therefore E = \frac{\tau}{2}$$

$$\therefore r_{o\max} = \frac{2E}{n_0} = \frac{\tau}{n_0}$$



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



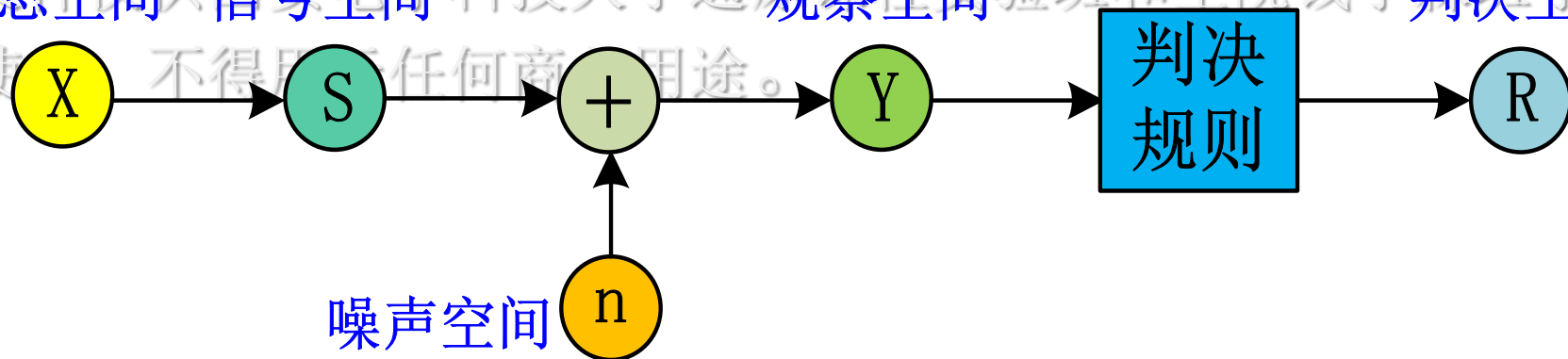
## 8.2 最小差错概率接收准则

西安电子科技大学

通信工程学院

在噪声背景下数字信号的接收过程是一个统计判决过程。

### 一、数字信号接收的统计模型





## 8.2 最小差错概率接收准则

西安电子科技大学

通信工程学院

### 1、消息空间X

设消息的状态集合为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_m \\ P(x_1) & P(x_2) & \dots & P(x_m) \end{bmatrix}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$\sum_{i=1}^m P(x_i) = 1$$

### 2、信号空间S

$$x_i \rightarrow s_i$$

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$$

$$P(s_i) = P(x_i) \quad (i = 1 \sim m) \quad P(s_i): \text{先验概率}$$

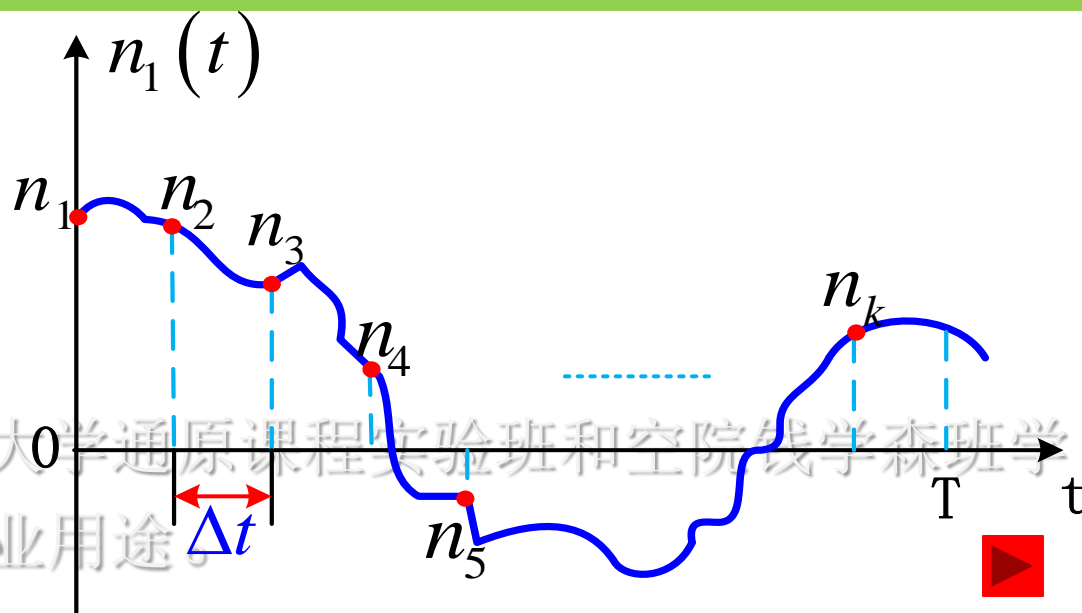


## 8.2 最小差错概率接收准则

西安电子科技大学

通信工程学院

### 3、噪声空间n



$$f(n) = f(n_1, n_2, \dots, n_k) = f(n_1) f(n_2) \cdots f(n_k)$$

$$= \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{i=1}^k n_i^2\right]$$



## 8.2 最小差错概率接收准则

西安电子科技大学

通信工程学院

若带限信道的截止频率为  $f_H$ ，则  $f_s = 2f_H$

$$\Delta t = \frac{1}{2f_H}$$

$$\therefore \frac{1}{2f_H T} \sum_{i=1}^k n_i^2 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^k n_i^2 \Delta t = \frac{1}{T} \int_0^T n^2(t) dt$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$f(n) = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi}\sigma_n\right)^k} \exp\left[-\frac{f_H}{\sigma_n^2} \int_0^T n^2(t) dt\right]$$

$$n_0 = \frac{\sigma_n^2}{f_H}$$

$$f(n) = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi}\sigma_n\right)^k} \exp\left\{-\frac{1}{n_0} \int_0^T n^2(t) dt\right\}$$



## 8.2 最小差错概率接收准则

西安电子科技大学

通信工程学院

### 4、观察空间Y

$$y(t) = s_i(t) + n(t) \quad (i = 1 \sim m)$$

$$f_{s_i}(y) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp \left\{ -\frac{1}{n_0} \int_0^T [y(t) - s_i(t)]^2 dt \right\} \quad (i = 1 \sim m)$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$f_{s_i}(y)$ : 似然函数

### 5、判决空间R

$$r_i \rightarrow s_i$$



## 8.2 最小差错概率接收准则

西安电子科技大学

通信工程学院

### 二、最小差错概率准则

数字通信中最直观、最合理、最常用的最佳接收准则

#### 1、二进制信号的最佳接收

设可能发送的两个信号为  $s_1(t)$  和  $s_2(t)$ ，先验概率分别为  $P(s_1)$  和  $P(s_2)$ ，在观察时刻的取值分别为  $a_1$  和  $a_2$ ，

$$f_{s_1}(y) = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi}\sigma_n\right)^k} \exp\left\{-\frac{1}{n_0} \int_0^T [y(t) - a_1]^2 dt\right\}$$

$$f_{s_2}(y) = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi}\sigma_n\right)^k} \exp\left\{-\frac{1}{n_0} \int_0^T [y(t) - a_2]^2 dt\right\}$$



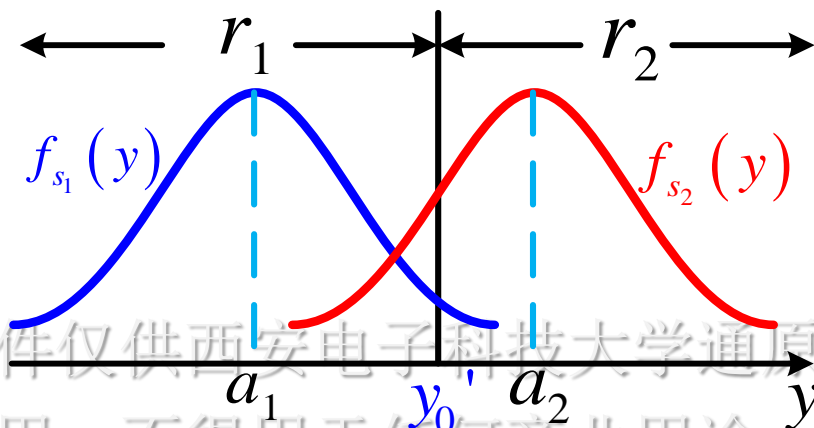


## 8.2 最小差错概率接收准则

西安电子科技大学

通信工程学院

判决过程示意图：



$$P_{s_1}(s_2) = \int_{y_0'}^{\infty} f_{s_1}(y) dy$$

$$P_{s_2}(s_1) = \int_{-\infty}^{y_0'} f_{s_2}(y) dy$$

$$P_e = P(s_1) \int_{y_0'}^{\infty} f_{s_1}(y) dy + P(s_2) \int_{-\infty}^{y_0'} f_{s_2}(y) dy$$

$$\frac{\partial P_e}{\partial y_0'} = 0 \iff -P(s_1) f_{s_1}(y_0^*) + P(s_2) f_{s_2}(y_0^*) = 0$$

最佳划分点  $y_0^*$  满足：

$$\frac{f_{s_1}(y_0^*)}{f_{s_2}(y_0^*)} = \frac{P(s_2)}{P(s_1)}$$



## 8.2 最小差错概率接收准则

西安电子科技大学

通信工程学院

似然比准则：

$$\begin{cases} \frac{f_{s_1}(y)}{f_{s_2}(y)} > \frac{P(s_2)}{P(s_1)}, & \Rightarrow r_1 (\text{即 } s_1) \\ \frac{f_{s_1}(y)}{f_{s_2}(y)} < \frac{P(s_2)}{P(s_1)}, & \Rightarrow r_2 (\text{即 } s_2) \end{cases}$$

**注：**在加性高斯白噪声条件下，似然比准则与最小差错概率准则等价。



## 8.2 最小差错概率接收准则

西安电子科技大学

通信工程学院

若 $P(s_1) = P(s_2)$ , 则

最大似然准则: 
$$\begin{cases} f_{s_1}(y) > f_{s_2}(y), & \Rightarrow r_1 \text{ (即 } s_1 \text{)} \\ f_{s_1}(y) < f_{s_2}(y), & \Rightarrow r_2 \text{ (即 } s_2 \text{)} \end{cases}$$

班学

本文件

习使用, 不得用于任何商业用途。

### 2、多进制数字信号的最佳接收

设 $m$ 个可能发送的信号等概出现, 则

$f_{s_i}(y) > f_{s_j}(y)$ , 判为 $r_i(s_i)$  ( $i = 1 \sim m, j = 1 \sim m, i \neq j$ )



## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

数字通信中，经信道传输到达接收机输入端的信号可分为两大类：

确知信号

随参信号

随机相位信号

随机振幅信号

随机振幅相位信号(起伏信号)

所采用的最佳准则是最小差错概率准则

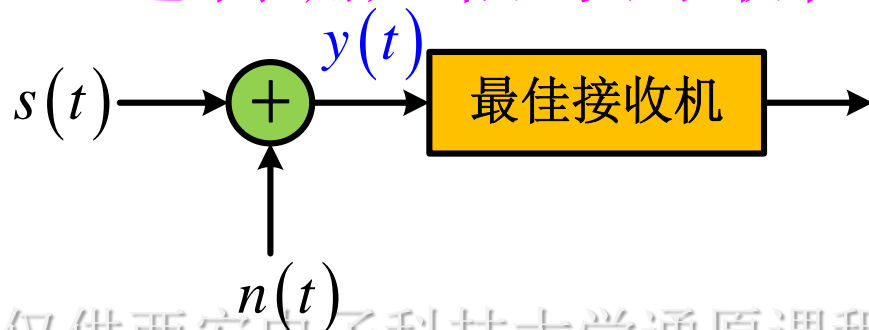


## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

### 一、二进制确知信号的最佳接收机结构



设到达接收机的两个确知信号为  $s_1(t)$  和  $s_2(t)$ ，持续时间  $(0, T)$ ，且等能量，即

$$E_b = \int_0^T s_1^2(t) dt = \int_0^T s_2^2(t) dt$$

$n(t)$ : 高斯白噪声，均值为0，单边功率谱密度为  $n_0$



## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

### 1、相关器形式的最佳接收机

$$y(t) = \begin{cases} s_1(t) + n(t), & \text{发 } s_1(t) \\ s_2(t) + n(t), & \text{发 } s_2(t) \end{cases}$$

$$f_{s_1}(y) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp \left\{ -\frac{1}{n_0} \int_0^T [y(t) - s_1(t)]^2 dt \right\}$$

$$f_{s_2}(y) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp \left\{ -\frac{1}{n_0} \int_0^T [y(t) - s_2(t)]^2 dt \right\}$$

$$\frac{f_{s_1}(y)}{f_{s_2}(y)} \underset{s_2}{\overset{s_1}{>}} \frac{P(s_2)}{P(s_1)}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

$$\frac{\frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp\left\{-\frac{1}{n_0} \int_0^T [y(t) - s_1(t)]^2 dt\right\}}{\frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp\left\{-\frac{1}{n_0} \int_0^T [y(t) - s_2(t)]^2 dt\right\}} > \frac{P(s_2)}{P(s_1)} \Rightarrow s_1$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$P(s_1) \exp\left\{-\frac{1}{n_0} \int_0^T [y(t) - s_1(t)]^2 dt\right\} > P(s_2) \exp\left\{-\frac{1}{n_0} \int_0^T [y(t) - s_2(t)]^2 dt\right\}$$
$$\Rightarrow s_1$$

$$n_0 \ln \frac{1}{P(s_1)} + \int_0^T [y(t) - s_1(t)]^2 dt < n_0 \ln \frac{1}{P(s_2)} + \int_0^T [y(t) - s_2(t)]^2 dt$$
$$\Rightarrow s_1$$



## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

判决规则：

$$U_1 + \int_0^T y(t) s_1(t) dt > U_2 + \int_0^T y(t) s_2(t) dt \quad \Rightarrow s_1$$

$$U_1 + \int_0^T y(t) s_1(t) dt < U_2 + \int_0^T y(t) s_2(t) dt \quad \Rightarrow s_2$$

本  
习使用，不得用于任何商业用途。

$$\begin{cases} U_1 = \frac{n_0}{2} \ln P(s_1) \\ U_2 = \frac{n_0}{2} \ln P(s_2) \end{cases}$$



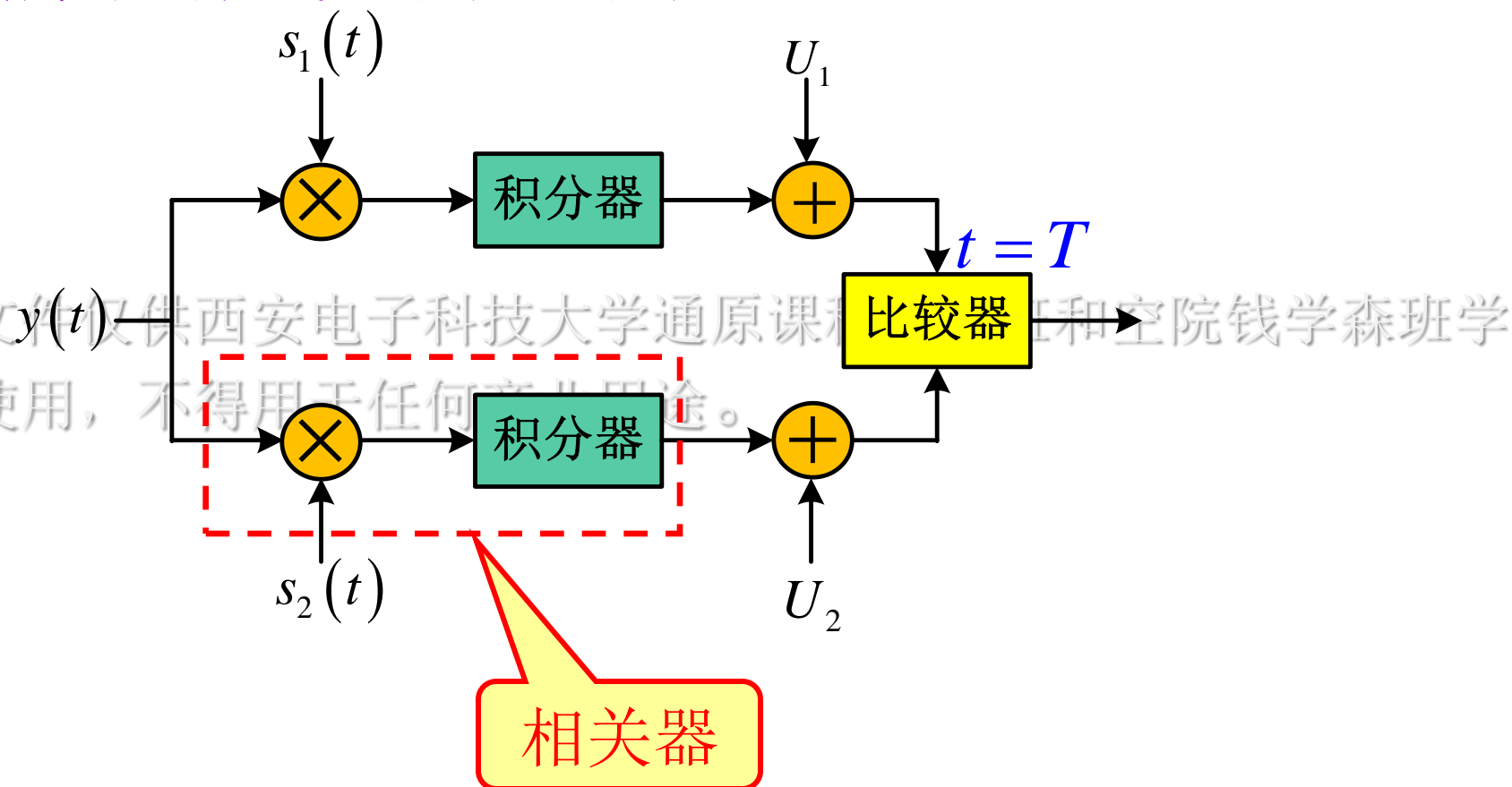


## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

相关器形式的最佳接收机：



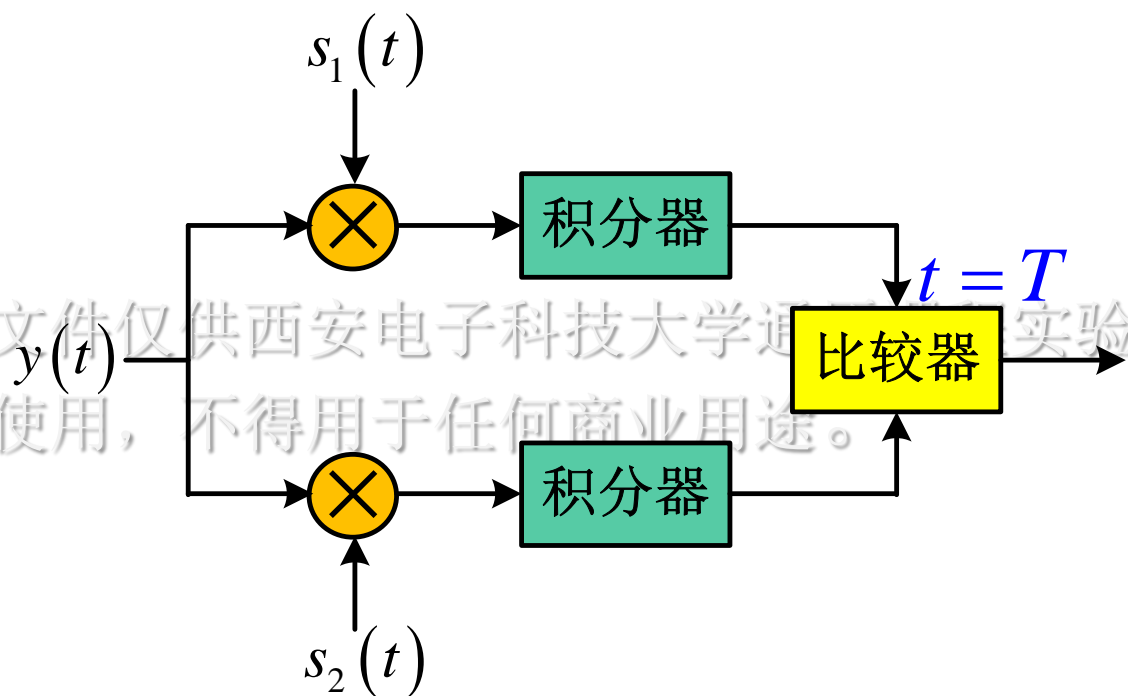


## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

若  $P(s_1) = P(s_2)$ ，则  $U_1 = U_2$ ，可简化如下：



关键部件：相关器



## 8.3 确知信号的最佳接收机

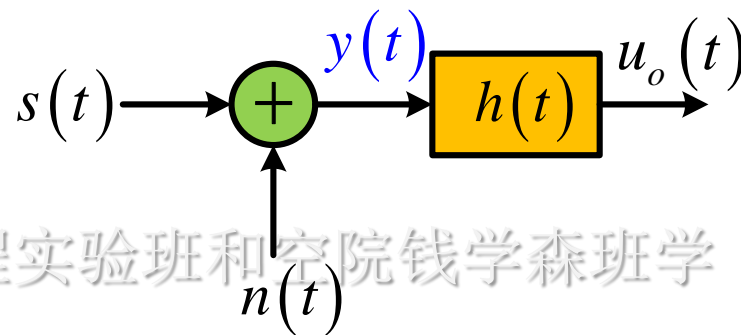
西安电子科技大学

通信工程学院

### 2、匹配滤波器形式的最佳接收机

与信号  $s(t)$  匹配的滤波器：

$$h(t) = s(T-t) \quad 0 < t < T$$



当  $0 \leq t \leq T$  时：

$$u_o(t) = \int_0^t y(\tau) h(t-\tau) d\tau = \int_0^t y(\tau) s(T-t+\tau) d\tau$$

$$u_o(T) = \int_0^T y(\tau) s(\tau) d\tau$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

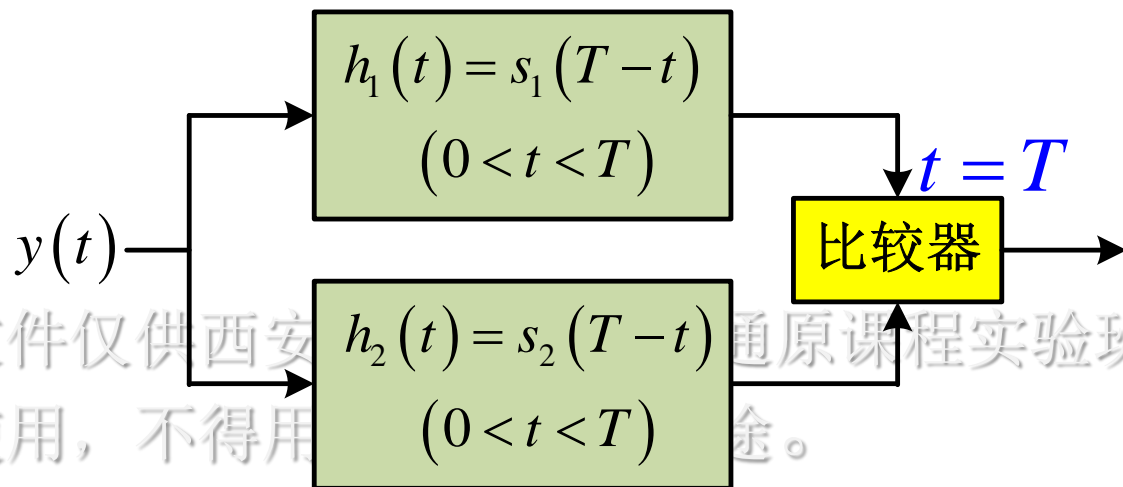


## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

匹配滤波器形式的最佳接收机：



注：①在最小差错概率准则下，两种形式的最佳接收机等价。

②判决时刻： $t=T$  码元结束时刻



## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

**思考：** 如果  $E_1 = 0$ ,  $E_2 = E_b \neq 0$ , 如何设计最佳接收机？

**分析：**  $\because E_1 = 0, \therefore s_1(t) = 0$



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$n_0 \ln \frac{1}{P(s_1)} + \int_0^T y^2(t) dt < n_0 \ln \frac{1}{P(s_2)} + \int_0^T [y(t) - s_2(t)]^2 dt$$
$$\Rightarrow s_1$$



## 8.3 确知信号的最佳接收机

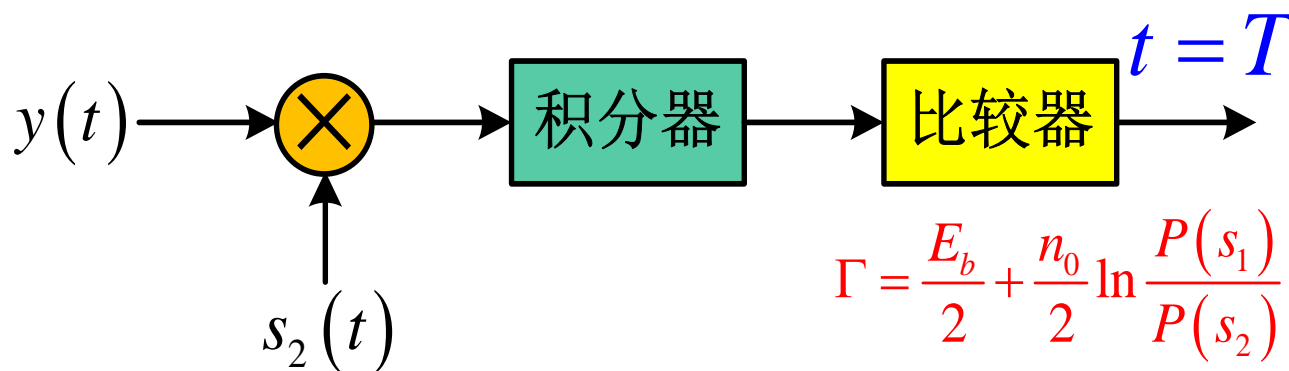
西安电子科技大学

通信工程学院

判决规则：

$$\int_0^T y(t) s_2(t) dt < \frac{E_b}{2} + \frac{n_0}{2} \ln \frac{P(s_1)}{P(s_2)} \Rightarrow s_1$$

$$\int_0^T y(t) s_2(t) dt > \frac{E_b}{2} + \frac{n_0}{2} \ln \frac{P(s_1)}{P(s_2)} \Rightarrow s_2$$





## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

### 二、二进制确知信号最佳接收机的误码性能

$$P_e = P(s_1)P_{s_1}(s_2) + P(s_2)P_{s_2}(s_1)$$

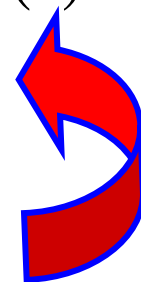
设发送信号为  $s_1(t)$ ，则  $y(t) = s_1(t) + n(t)$

本文件仅供西安电子科技大学通信工程学院课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$U_1 + \int_0^T [s_1(t) + n(t)] s_1(t) dt < U_2 + \int_0^T [s_1(t) + n(t)] s_2(t) dt \Rightarrow s_2 \text{ (错判)}$$

$$E_b = \int_0^T s_1^2(t) dt = \int_0^T s_2^2(t) dt$$

$$\begin{cases} U_1 = \frac{n_0}{2} \ln P(s_1) \\ U_2 = \frac{n_0}{2} \ln P(s_2) \end{cases}$$





## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

$$\int_0^T n(t) [s_1(t) - s_2(t)] dt < \frac{n_0}{2} \ln \frac{P(s_2)}{P(s_1)} - \frac{1}{2} \int_0^T [s_1(t) - s_2(t)]^2 dt$$

$\xi$

$a$

本文档仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$\begin{aligned} E[\xi] &= E \left\{ \int_0^T n(t) [s_1(t) - s_2(t)] dt \right\} \\ &= \int_0^T E[n(t)] [s_1(t) - s_2(t)] dt = 0 \end{aligned}$$





## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

$$\begin{aligned}\sigma_{\xi}^2 &= E[\xi^2] \\&= E\left\{\int_0^T \int_0^T n(t)[s_1(t) - s_2(t)]n(t')[s_1(t') - s_2(t')]dtdt'\right\} \\&= \int_0^T \int_0^T E[n(t)n(t')][s_1(t) - s_2(t)][s_1(t') - s_2(t')]dtdt' \\&= \int_0^T \int_0^T E[n(t)n(t')]dtdt' \\&= \int_0^T \int_0^T \frac{n_0}{2} \delta(t - t')dtdt' = \begin{cases} \frac{n_0}{2} \delta(0), & t = t' \\ 0, & t \neq t' \end{cases}\end{aligned}$$

$$\sigma_{\xi}^2 = \frac{n_0}{2} \int_0^T [s_1(t) - s_2(t)]^2 dt \quad \therefore \xi \sim N(0, \sigma_{\xi}^2)$$



## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

$$f(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\xi} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_\xi^2}\right)$$

$$P_{s_1}(s_2) = P(\xi < a)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\xi} \int_{-\infty}^a \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_\xi^2}\right) dx$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_b^\infty e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

同理：

$$P_{s_2}(s_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{b'}^\infty e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$



## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

$$P_e = P(s_1) \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_b^\infty e^{-\frac{z^2}{2}} dz \right] + P(s_2) \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{b'}^\infty e^{-\frac{z^2}{2}} dz \right]$$

其中

$$b = \sqrt{\frac{1}{2n_0} \int_0^T [s_1(t) - s_2(t)]^2 dt} + \frac{\ln \frac{P(s_1)}{P(s_2)}}{2 \sqrt{\frac{1}{2n_0} \int_0^T [s_1(t) - s_2(t)]^2 dt}}$$
$$b' = \sqrt{\frac{1}{2n_0} \int_0^T [s_1(t) - s_2(t)]^2 dt} - \frac{\ln \frac{P(s_1)}{P(s_2)}}{2 \sqrt{\frac{1}{2n_0} \int_0^T [s_1(t) - s_2(t)]^2 dt}}$$



## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

### 三、二进制确知信号的最佳形式

$$\text{令 } A = \sqrt{\frac{1}{2n_0} \int_0^T [s_1(t) - s_2(t)]^2 dt}$$

若  $P(s_1) = P(s_2)$  , 则  $b = b' = A$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用, 不得用于任何商业用途。

$$\therefore P_e = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_A^\infty e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{A}{\sqrt{2}}\right)$$

$$\text{互相关系数 } \rho = \frac{\int_0^T s_1(t) s_2(t) dt}{\sqrt{E_1 E_2}} \quad (E_1 \neq 0, E_2 \neq 0)$$

$$E_1 = \int_0^T s_1^2(t) dt$$

$$E_2 = \int_0^T s_2^2(t) dt$$



## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

根据施瓦兹不等式

$$\left| \int_0^T s_1(t) s_2(t) dt \right|^2 \leq \int_0^T s_1^2(t) dt \cdot \int_0^T s_2^2(t) dt$$

$$-1 \leq \rho \leq 1$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学

习使用，不得用于任何商业用途。

(1) 若  $E_1 = E_2 = E_b$  则  $A = \sqrt{\frac{E_b(1-\rho)}{n_0}}$

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{E_b(1-\rho)}{2n_0}} \right]$$



## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

当  $\rho = -1$  时，误码率达到最小

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{n_0}} \right)$$

本文件  $\rho = -1$  的波形是二进制确知信号的最佳波形 习使用，不得用于任何商业用途。

$$\rho = 0 \quad P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{2n_0}} \right) \quad \text{正交}$$

$$\rho = 1 \quad P_e = \frac{1}{2}$$



## 8.3 确知信号的最佳接收机

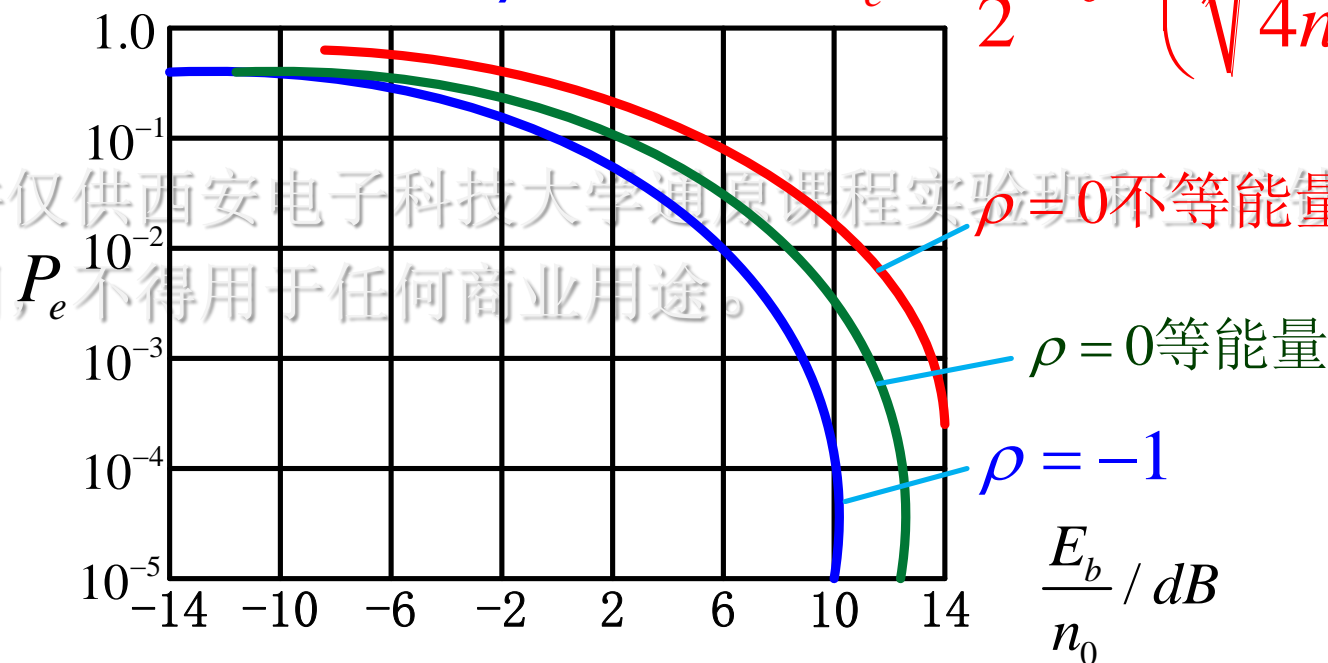
西安电子科技大学

通信工程学院

(2) 若  $E_1 = 0$ ,  $E_2 = E_b \neq 0$

可认为  $\rho = 0$

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{4n_0}} \right)$$





## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

基带传输系统:

双极性  $\rho = -1$

单极性  $\rho = 0$  (不等能量)

频带传输系统:

2PSK  $\rho = -1$

2FSK 一般  $f_i = \frac{n}{2T_s} \quad i = 1, 2$

$\rho = 0$  (等能量)

2ASK  $\rho = 0$  (不等能量)

本文档仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。





## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

**思考：**2FSK系统中， $f_1$ ， $f_2$  满足什么条件可使误码率达到最小？

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T}} \cos \omega_1 t \quad 0 < t < T$$

$$s_2(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T}} \cos \omega_2 t \quad 0 < t < T$$



## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

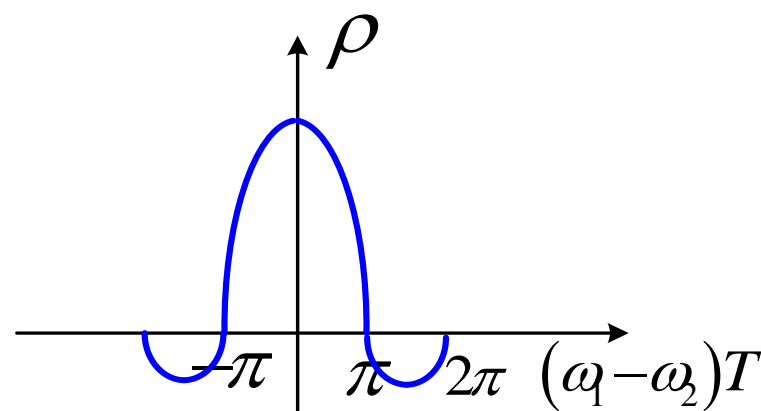
$$\begin{aligned}\rho &= \frac{1}{E_b} \int_0^T \frac{2E_b}{T} \cos \omega_1 t \cos \omega_2 t dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T [\cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t] dt\end{aligned}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$\begin{aligned}&= \frac{1}{T} \left[ \frac{\sin(\omega_1 + \omega_2)T}{\omega_1 + \omega_2} + \frac{\sin(\omega_1 - \omega_2)T}{\omega_1 - \omega_2} \right] \\ &\approx \frac{\sin(\omega_1 - \omega_2)T}{(\omega_1 - \omega_2)T}\end{aligned}$$

当 $(\omega_1 - \omega_2)T = 1.5\pi$ 时

$$\rho_{\min} = -0.22$$





## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

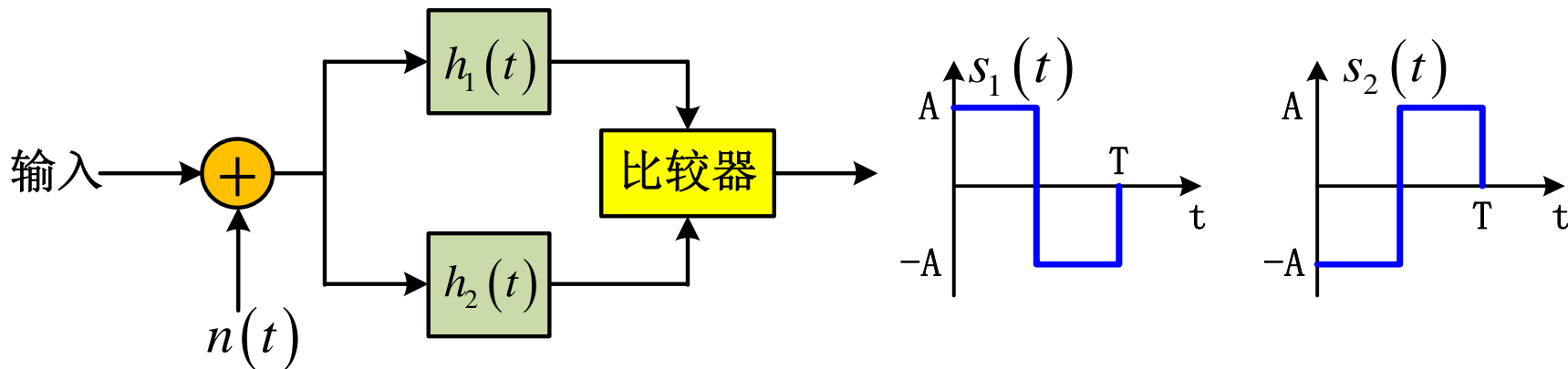
通信工程学院

【例】某二进制数字信号最佳接收机如图所示，信道加性高斯白噪声的双边功率谱密度为  $\frac{n_0}{2}$ ，发送信号  $s_1(t)$ ， $s_2(t)$  如图。

(1) 确定框图中  $h_1(t)$ ， $h_2(t)$  的时间波形；

(2) 画出  $h_1(t)$  和  $h_2(t)$  的可能输出波形；

(3) 当  $s_1(t)$ ， $s_2(t)$  等概发送时，计算误码率。



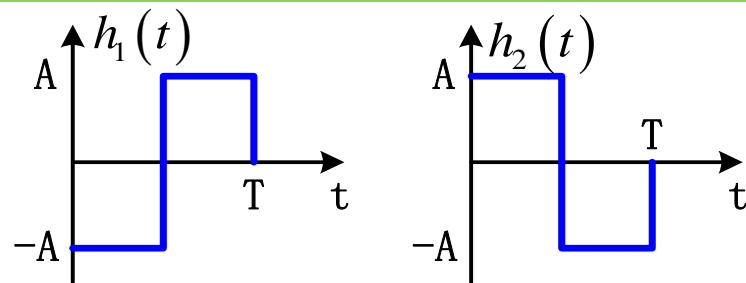


## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

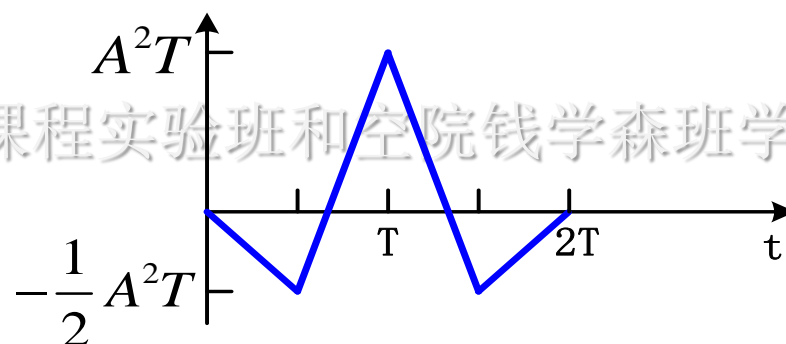
解: (1)  $h_1(t) = s_1(T-t) \quad 0 < t < T$   
 $h_2(t) = s_2(T-t) \quad 0 < t < T$



(2)  $s_1(t)$  到达时:

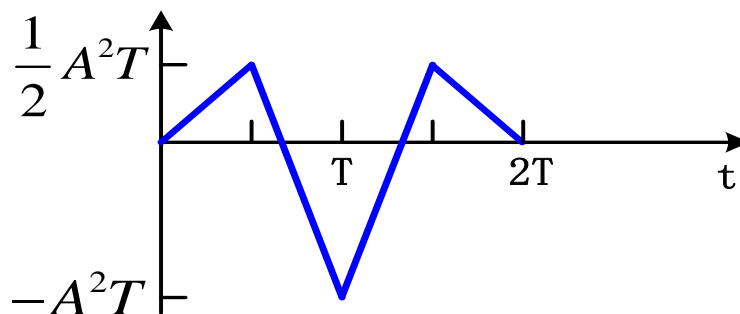
上支路

$$s_1(t) * h_1(t)$$



下支路

$$s_1(t) * h_2(t)$$



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

$s_2(t)$ 到达时，正好相反。

$$(3) E_1 = E_2 = E_b = A^2 T \quad \rho = -1$$

$$\therefore P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{n_0}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{A^2 T}{n_0}} \right)$$

本文件仅供西安电子科技大学通信工程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】 2FSK系统：

$$\begin{cases} s_1(t) = A \sin \omega_1 t & 0 < t < T_s \\ s_2(t) = A \sin \omega_2 t & 0 < t < T_s \end{cases}$$

其中  $\omega_1 = \frac{2\pi}{T_s}$ ， $\omega_2 = 2\omega_1$ ，两信号等概发送。

- (1) 画出相关器形式的最佳接收机；
- (2) 画出各点可能的工作波形；
- (3) 噪声的双边功率谱密度为  $\frac{n_0}{2}$ ，计算误码率。



## 8.3 确知信号的最佳接收机

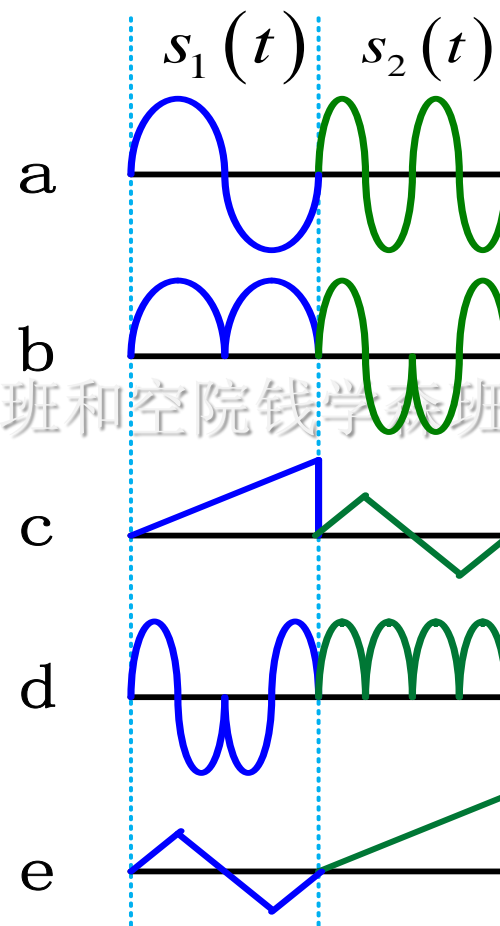
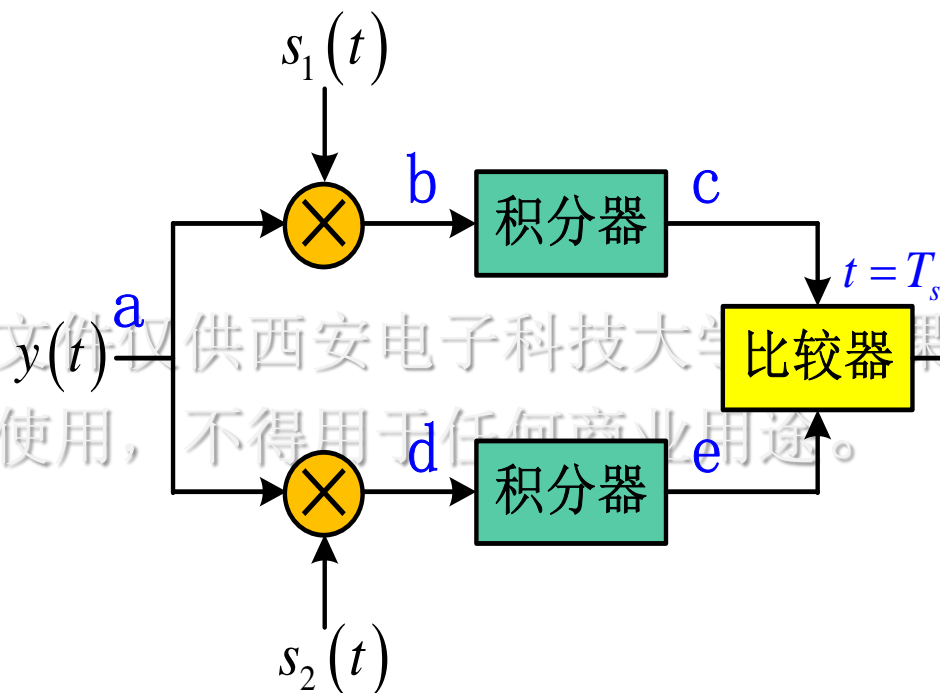
西安电子科技大学

通信工程学院

解:

(1)

(2)





## 8.3 确知信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

$$(3) E_1 = E_2 = E_b = \frac{A^2}{2} T_s \quad \rho = 0$$

$$\therefore P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{2n_0}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{A^2 T_s}{4n_0}} \right)$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。





## 8.4 随相信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

确知信号最佳接收是信号检测中的一种理想情况。

造成随参信号的原因很多：发射机振荡器频率不稳定，信号在随参信道中传输引起的畸变等。

### 一、二进制随相信号的最佳接收机结构(2FSK)

设到达接收机的两个随相信号为

$$s_1(t, \varphi_1) = A \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \quad 0 < t < T$$

$$s_2(t, \varphi_2) = A \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \quad 0 < t < T$$



## 8.4 随相信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

①  $\omega_1, \omega_2$  满足正交

$$\int_0^T s_1(t, \varphi_1) s_2(t, \varphi_2) dt = 0$$

②  $\varphi_1, \varphi_2$  是随机变量

$$f(\varphi_1) = \frac{1}{2\pi}, \quad 0 \leq \varphi_1 \leq 2\pi \quad f(\varphi_2) = \frac{1}{2\pi}, \quad 0 \leq \varphi_2 \leq 2\pi$$

③ 等能量

$$E_b = \int_0^T s_1^2(t, \varphi_1) dt = \int_0^T s_2^2(t, \varphi_2) dt$$



## 8.4 随相信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

$$y(t) = \begin{cases} s_1(t, \varphi_1) + n(t), & \text{发 } s_1(t, \varphi_1) \\ s_2(t, \varphi_2) + n(t), & \text{发 } s_2(t, \varphi_2) \end{cases}$$

$$\frac{f_{s_1}(y)}{f_{s_2}(y)} > \frac{P(s_2)}{P(s_1)} \quad \text{等概:} \quad \frac{f_{s_1}(y)}{f_{s_2}(y)} > 1$$

### 1、相关器形式

$$f_{s_1}(y / \varphi_1) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp \left\{ -\frac{1}{n_0} \int_0^T [y(t) - s_1(t, \varphi_1)]^2 dt \right\}$$
$$f_{s_2}(y / \varphi_2) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma_n)^k} \exp \left\{ -\frac{1}{n_0} \int_0^T [y(t) - s_2(t, \varphi_2)]^2 dt \right\}$$



## 8.4 随相信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

$$\left\{ \begin{aligned} f_{s_1}(y) &= \int_0^{2\pi} f_{s_1}(y, \varphi_1) d\varphi_1 = \int_0^{2\pi} f(\varphi_1) f_{s_1}(y / \varphi_1) d\varphi_1 = KI_0 \left( \frac{2A}{n_0} M_1 \right) \\ f_{s_2}(y) &= \int_0^{2\pi} f_{s_2}(y, \varphi_2) d\varphi_2 = \int_0^{2\pi} f(\varphi_2) f_{s_2}(y / \varphi_2) d\varphi_2 = KI_0 \left( \frac{2A}{n_0} M_2 \right) \end{aligned} \right.$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$\left\{ \begin{aligned} M_1 &= \sqrt{X_1^2 + Y_1^2} & X_1 &= \int_0^T y(t) \cos \omega_1 t dt & Y_1 &= \int_0^T y(t) \sin \omega_1 t dt \\ M_2 &= \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} & X_2 &= \int_0^T y(t) \cos \omega_2 t dt & Y_2 &= \int_0^T y(t) \sin \omega_2 t dt \end{aligned} \right.$$



## 8.4 随相信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

判决规则：

$$\begin{cases} M_1 > M_2 & \Rightarrow s_1 \\ M_1 < M_2 & \Rightarrow s_2 \end{cases}$$

$$M_1 = \sqrt{\left[ \int_0^T y(t) \cos \omega_1 t dt \right]^2 + \left[ \int_0^T y(t) \sin \omega_1 t dt \right]^2}$$

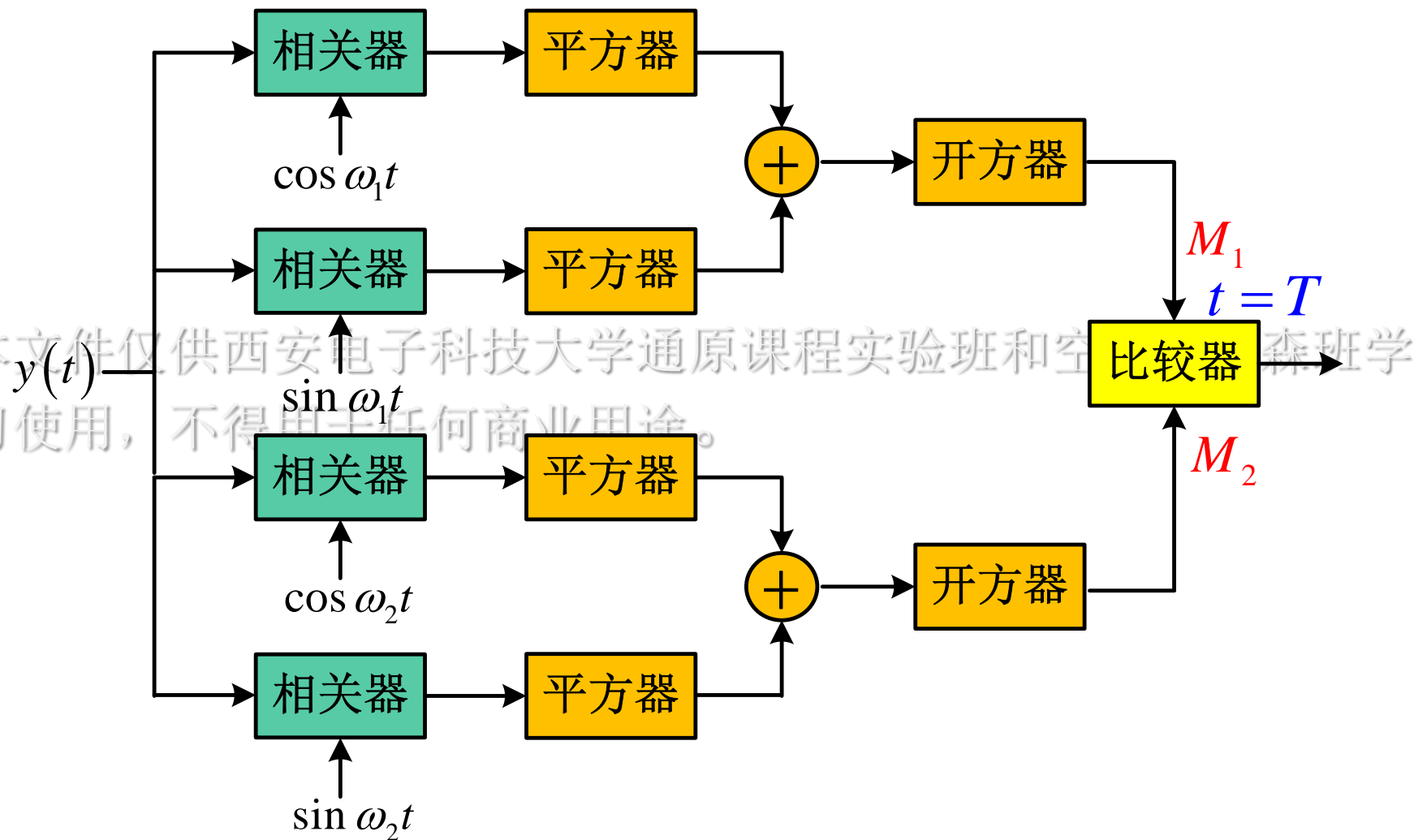
$$M_2 = \sqrt{\left[ \int_0^T y(t) \cos \omega_2 t dt \right]^2 + \left[ \int_0^T y(t) \sin \omega_2 t dt \right]^2}$$



## 8.4 随相信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院





# 8.4 随相信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

## 2、匹配滤波器形式

与 $s_1(t, \varphi_1)$  频率相匹配的匹配滤波器:

$$h_1(t) = \cos \omega_1 (T - t) \quad 0 < t < T$$

$$u_1(t) = \int_0^t y(\tau) h_1(t - \tau) d\tau = \int_0^t y(\tau) \cos \omega_1 (T - t + \tau) d\tau$$

$$= \left[ \int_0^t y(\tau) \cos \omega_1 \tau d\tau \right] \cos \omega_1 (T - t) - \left[ \int_0^t y(\tau) \sin \omega_1 \tau d\tau \right] \sin \omega_1 (T - t)$$

$$= \sqrt{\left[ \int_0^t y(\tau) \cos \omega_1 \tau d\tau \right]^2 + \left[ \int_0^t y(\tau) \sin \omega_1 \tau d\tau \right]^2} \cos [\omega_1 (T - t) + \theta_1]$$

$$\therefore u_1(T) = M_1 \cos \theta_1$$



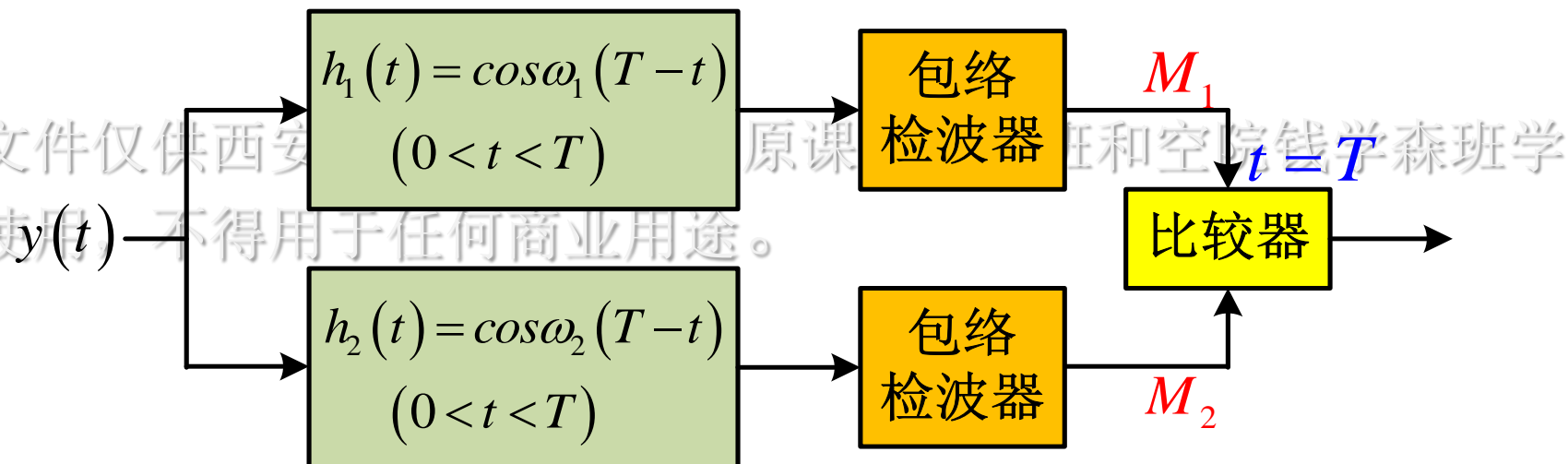
## 8.4 随相信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

$$h_2(t) = \cos \omega_2(T - t) \quad 0 < t < T$$

$$u_2(T) = M_2 \cos \theta_2$$



非相干接收机





## 8.4 随相信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

### 二、二进制随相信号最佳接收机的误码性能

$$P_e = P(s_1)P_{s_1}(s_2) + P(s_2)P_{s_2}(s_1)$$

$$\text{当 } P(s_1) = P(s_2) \text{ 时, } P_e = P_{s_1}(s_2) = P_{s_2}(s_1)$$

设发送信号为  $s_1(t, \varphi_1)$

$$y(t) = s_1(t, \varphi_1) + n(t)$$

$$= A \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + n(t)$$

$$\text{若 } M_1 < M_2 \Rightarrow s_2 \text{ (错判)}$$

$$\therefore P_{s_1}(s_2) = P(M_1 < M_2)$$



## 8.4 随相信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

$$X_1 = \int_0^T y(t) \cos \omega_1 t dt = \int_0^T n(t) \cos \omega_1 t dt + \frac{AT}{2} \cos \varphi_1$$

假定  $\varphi_1$  是确定值  $X_1 \sim N\left(\frac{AT}{2} \cos \varphi_1, \frac{n_0 T}{4}\right)$



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$Y_1 = \int_0^T y(t) \sin \omega_1 t dt = \int_0^T n(t) \sin \omega_1 t dt - \frac{AT}{2} \sin \varphi_1$$

$$Y_1 \sim N\left(-\frac{AT}{2} \sin \varphi_1, \frac{n_0 T}{4}\right)$$

$\therefore M_1$  广义瑞利  $f(M_1)$



## 8.4 随相信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

$$\therefore f(M_1) = \frac{M_1}{\sigma_M^2} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_M^2} \left[ M_1^2 + \left( \frac{AT}{2} \right)^2 \right] \right\} I_0 \left( \frac{ATM}{2\sigma_M^2} \right) \quad M_1 \geq 0$$

$$\text{其中 } \sigma_M^2 = \frac{n_0 T}{4}$$

$$X_2 = \int_0^T y(t) \cos \omega_2 t dt = \int_0^T n(t) \cos \omega_2 t dt \quad X_2 \sim N \left( 0, \frac{n_0 T}{4} \right)$$

$$Y_2 = \int_0^T y(t) \sin \omega_2 t dt = \int_0^T n(t) \sin \omega_2 t dt \quad Y_2 \sim N \left( 0, \frac{n_0 T}{4} \right)$$

$$\therefore M_2 \quad \text{瑞利} \quad f(M_2)$$



## 8.4 随相信号的最佳接收机

西安电子科技大学

通信工程学院

$$P_{s_1}(s_2) = \int_0^\infty f(M_1) \left[ \int_{M_1}^\infty f(M_2) dM_2 \right] dM_1 = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{2n_0}}$$

二进制随相信号最佳接收机的误码率为：

$$P_e = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{2n_0}}$$

适用条件：等概，等能量，正交

本文件仅供西安电子科技大学通信工程学院通信工程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于其他用途。



## 8.5 实际接收机与最佳接收机性能比较

西安电子科技大学

通信工程学院

接收方式	实际接收机 $P_e$	最佳接收机 $P_e$
相干 <b>2PSK</b>	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{r})$	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{n_0}}\right)$
相干 <b>2FSK</b>	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{r}{2}}\right)$	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{2n_0}}\right)$
相干 <b>2ASK</b>	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{r}{4}}\right)$	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{4n_0}}\right)$
非相干 <b>2FSK</b>	$\frac{1}{2} e^{-\frac{r}{2}}$	$\frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{2n_0}}$



## 8.5 实际接收机与最佳接收机性能比较

西安电子科技大学

通信工程学院

$$r = \frac{S}{N} (\text{信噪比}) \sim \frac{E_b}{n_0} (\text{信噪比})$$

$$r > \frac{E_b}{n_0} \longrightarrow P_{e\text{实}} < P_{e\text{佳}} \longrightarrow \text{实际接收机性能} \text{优于} \text{最佳接收机}$$

$$r < \frac{E_b}{n_0} \longrightarrow P_{e\text{实}} > P_{e\text{佳}} \longrightarrow \text{实际接收机性能} \text{差于} \text{最佳接收机}$$

$$r = \frac{E_b}{n_0} \longrightarrow P_{e\text{实}} = P_{e\text{佳}} \longrightarrow \text{实际接收机性能} \text{等于} \text{最佳接收机}$$



## 8.5 实际接收机与最佳接收机性能比较

西安电子科技大学

通信工程学院

设接收机输入信号功率为  $S$ ，持续时间为  $(0, T)$ ，  
噪声单边功率谱密度为  $n_0$

实际接收机：

$$r = \frac{S}{N} = \frac{S}{n_0 B}$$

最佳接收机：

$$\frac{E_b}{n_0} = \frac{ST}{n_0} = \frac{S}{n_0 \cdot \frac{1}{T}}$$

$$\because B > \frac{1}{T} \quad \therefore r < \frac{E_b}{n_0}$$

最佳接收机性能一定优于实际接收机。



## 8.5 实际接收机与最佳接收机性能比较

西安电子科技大学

通信工程学院

- 设**2PSK**信号的最佳接收机与实际接收机具有相同的信噪比  $\frac{E_b}{n_0}$
- 若  $E_b/n_0 = 10\text{dB}$ ，实际接收机带通滤波器的带宽为**6/T(Hz)**，**T**为码元宽度。
- 则两种接收机的性能相差多少？

• 解：最佳接收机

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{n_0}}\right)$$

- 在大信噪比条件下

$$P_e \approx \frac{1}{2\sqrt{\pi \frac{E_b}{n_0}}} \exp\left(-\frac{E_b}{n_0}\right) = 4.0 \times 10^{-6}$$





## 8.5 实际接收机与最佳接收机性能比较

西安电子科技大学

通信工程学院

- 实际接收机:
- 带通滤波器输出信噪比:

$$r = \frac{S}{N} = \frac{S}{n_0 B} = \frac{S}{n_0 \frac{6}{T}} = \frac{ST}{6n_0} = \frac{1}{6} \frac{E_b}{n_0}$$

本文件仅供西安电子科技大学通信工程课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{r}) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{E_b}{6n_0}\right) = 3.4 \times 10^{-2}$$



## 8.6 最佳基带传输系统

西安电子科技大学

通信工程学院

本节将发送、信道和接收作为一个整体，研究整个通信系统的最佳化。

**最佳基带传输系统：**能消除码间干扰，又具有最佳抗噪声性能的基带传输系统。

对理想信道  $C(\omega)=1$ ，最佳基带传输系统应满足

$$\begin{cases} \sum_i H\left(\omega + \frac{2\pi i}{T_s}\right) = \text{const} & |\omega| \leq \frac{\pi}{T_s} \\ G_T(\omega) = G_R(\omega) = \sqrt{H(\omega)} \end{cases}$$