第八章　数字信号最佳接收原理

思考题

8-1 在数字通信中，为什么说“最小差错概率准则”是最直观和最合理的准则？

8-2 什么是似然比准则？什么是最大似然准则？

8-3 什么是确知信号？什么是随相信号？什么是起伏信号？

8-4 二进制确知信号的最佳接收机结构如何？它是怎样得到的？

8-5 什么是二进制确知信号的最佳形式？

8-6 试述确知的二进制 PSF、FSK 及 ASK 信号的最佳接收机的误码性能有何不同？并加以解释。

8-7 验证课本图 8-6 中的 P_e 与 A 关系曲线的正确性（任取合适的三组数据来证明），并讨论 P_e 与先验概率 $P(s_1)$、$P(s_2)$ 之间的关系。

8-8 试述对于二进制随相信号最佳接收机结构的确定与二进制确知信号有何相同与不同？

8-9 如何才能使实际接收机的误码性能达到最佳接收机的水平？

8-10 什么是匹配滤波器？对于与矩形包络调制信号相匹配的滤波器的实现方法有哪些？它们各有什么特点？

8-11 声表面波匹配滤波器的原理如何？

8-12 相关器和匹配滤波器如何才能等效？

8-13 什么是最佳基带传输系统？

8-14 什么是理想信道？在理想信道下的最佳基带传输系统的结构具有什么特点？

8-15 什么是非理想信道？在该信道下的最佳基带传输系统的结构具有什么特点？

习题

8-1 试构成先验等概的二进制确知 ASK(OOK)信号的最佳接收机结构。若非零信号的码元能量为 E_b 时，试求该系统的抗高斯白噪声的性能。

8-2 设二进制 FSK 信号为

$$\begin{cases} s_1(t) = A\sin\omega_1 t, & 0 \le t \le T_s \\ s_2(t) = A\sin\omega_1 t, & 0 \le t \le T_s \end{cases} \qquad \text{（公式 T8-2）}$$

且 $\omega_1 = 4\pi / T_s$、$\omega_1 = \omega_2$、$s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 等可能出现：

（1）构成相关检测器形式的最佳接收机结构；

（2）画出各点可能的工作波形；

（3）若接收机输入高斯噪声功率谱密度为 $n_0 / 2(W / Hz)$，试求系统的误码率。

8-3 在功率谱密度为 $n_0 / 2$ 的高斯白噪声下，设计一个对图 T8-3 所示 $f(t)$ 的匹配滤波器：

（1）如何确定最大输出信噪比的时刻；

（2）求匹配滤波器的冲激响应和输出波形，并绘出图形；

（3）求最大输出信噪比的值。

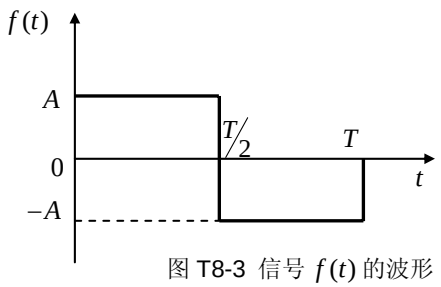

图 T8-3 信号 $f(t)$ 的波形

8-4 在图 T8-4(a)中，设系统输入 $s(t)$ 及 $h_1(t)$、$h_2(t)$ 分别如图 T8-4(b)所示，试绘图解出 $h_1(t)$ 及 $h_2(t)$ 的输出波形，并说明 $h_1(t)$ 及 $h_2(t)$ 是否是 $s(t)$ 的匹配滤波器。

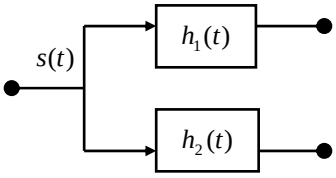

图 T8-4(a) 系统框图

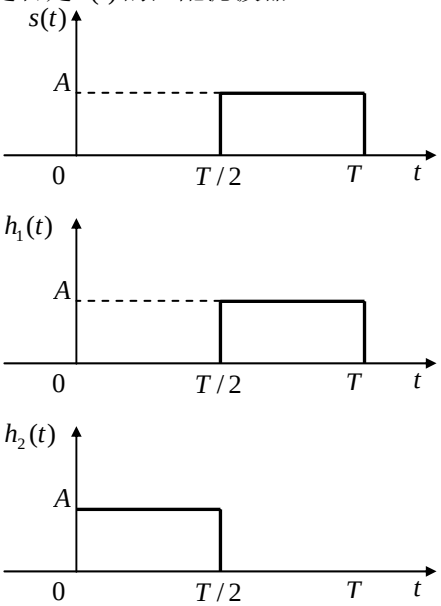

图 T8-4(b) 输入及输出波形

8-5 设 2PSK 方式的最佳接收机与实际接收机有相同的输入信噪比 E_b/n_0，如果 $E_b/n_0=10dB$，普通接收机的带通滤波器带宽为 $6/T(Hz)$，T 是码元宽度，则两种接收机的误码性能相差多少？

8-6 设到达接收机输入端的二进制信号码元 $s_1(t)$ 及 $s_2(t)$ 的波形如图 T8-6 所示，输入高斯噪声功率谱密度为 $n_0/2(W/Hz)$：

（1）画出匹配滤波器形式的最佳接收机结构；

（2）确定匹配滤波器的单位冲激响应及可能的输出波形；

（3）求系统的误码率。

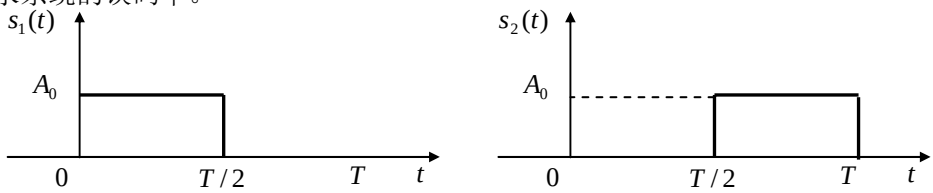

图 T8-6 输入信号 $s_1(t)$ 与 $s_2(t)$ 波形

8-7 将 8-6 题中 $s_1(t)$ 及 $s_2(t)$ 改为如图所示的波形，试重做上题。

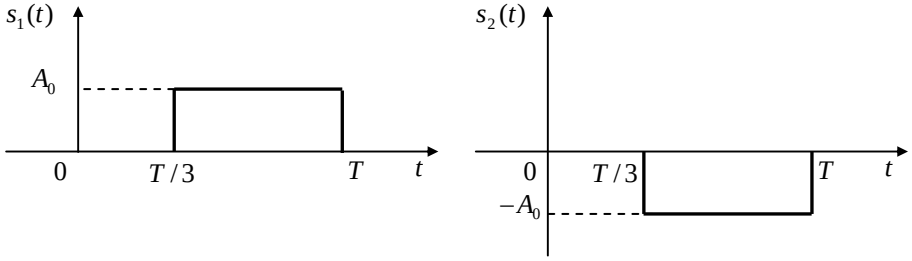

图 P8-7 输入信号 $s_1(t)$ 与 $s_2(t)$ 波形

8-8 在高斯白噪声下最佳接收二进制信号 $s_1(t)$ 及 $s_2(t)$，这里

$$\begin{cases} s_1(t) = A\sin(\omega_1 t + \varphi_1), & 0 \le t \le T \\ s_2(t) = A\sin(\omega_2 t + \varphi_2), & 0 \le t \le T \end{cases} \quad \text{（公式 T8-8）}$$

式中，在 $(0,T)$ 内 ω_1 与 ω_2 满足正交要求；ϕ_1 及 ϕ_2 分别是服从均匀分布的随机变量：

（1）试构成匹配滤波器形式的最佳接收机结构；

（2）试用两种不同方法分析上述结构中抽样判决器输入信号样值的统计特性；

（3）求系统的误码率。

8-9 试画出 8-2 题和 8-8 题的性能曲线，并作讨论。

8-10 在图 8-20 中，如果 N 改为 3，其他条件维持不变，试画出图 8-18 的工作波形。

8-11 若理想信道基带系统的总特性满足下式

$$\sum_i H(\omega + \frac{2\pi i}{T_s}) = T_s, \quad |\omega| \le \frac{\pi}{T_s} \quad \text{（公式 T8-11）}$$

信道高斯噪声的功率谱密度为 $n_0/2(W/Hz)$，信号的可能电平为 L，即 $0,2d,...,2(L-1)d$ 等概率出现：

（1）求接收滤波器输出噪声功率；

（2）求系统最小误码率。

8-12 设信息代码为 010010，载波频率为信息速率的 2 倍。

（1）画出 2DPSK 最佳相干接收机方框图；

（2）画出无噪声时最佳相干接收机各点波形。

8-13 在二进制双极性基带传输系统中，设信道输出信号是峰-峰值等于 $2A$ 的矩形脉冲，信道噪声是单边功率谱密度为 n_0 的高斯噪声。试证明，最佳接收机的误码率不大于非最佳接收机的误码率。

部分习题参考答案

8-2 解：

（1）最佳相干接收机的结构如图 J8-2(a)所示：

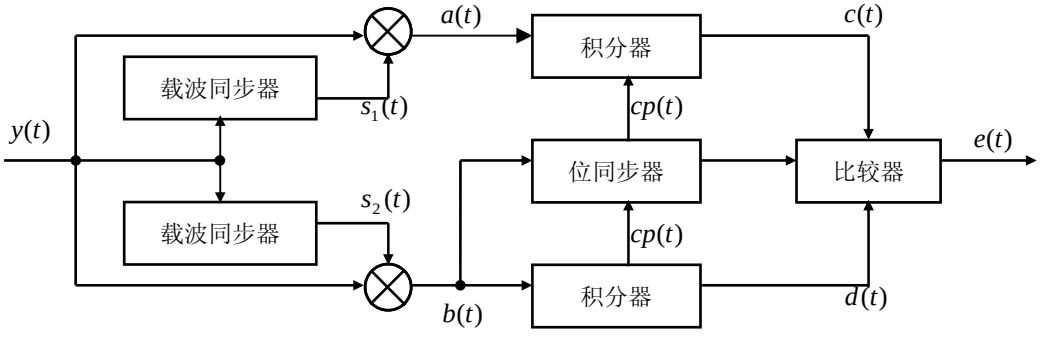

图 J8-2(a) 最佳相干接收机结构

（2）各点波形如图 J8-2(b)所示：

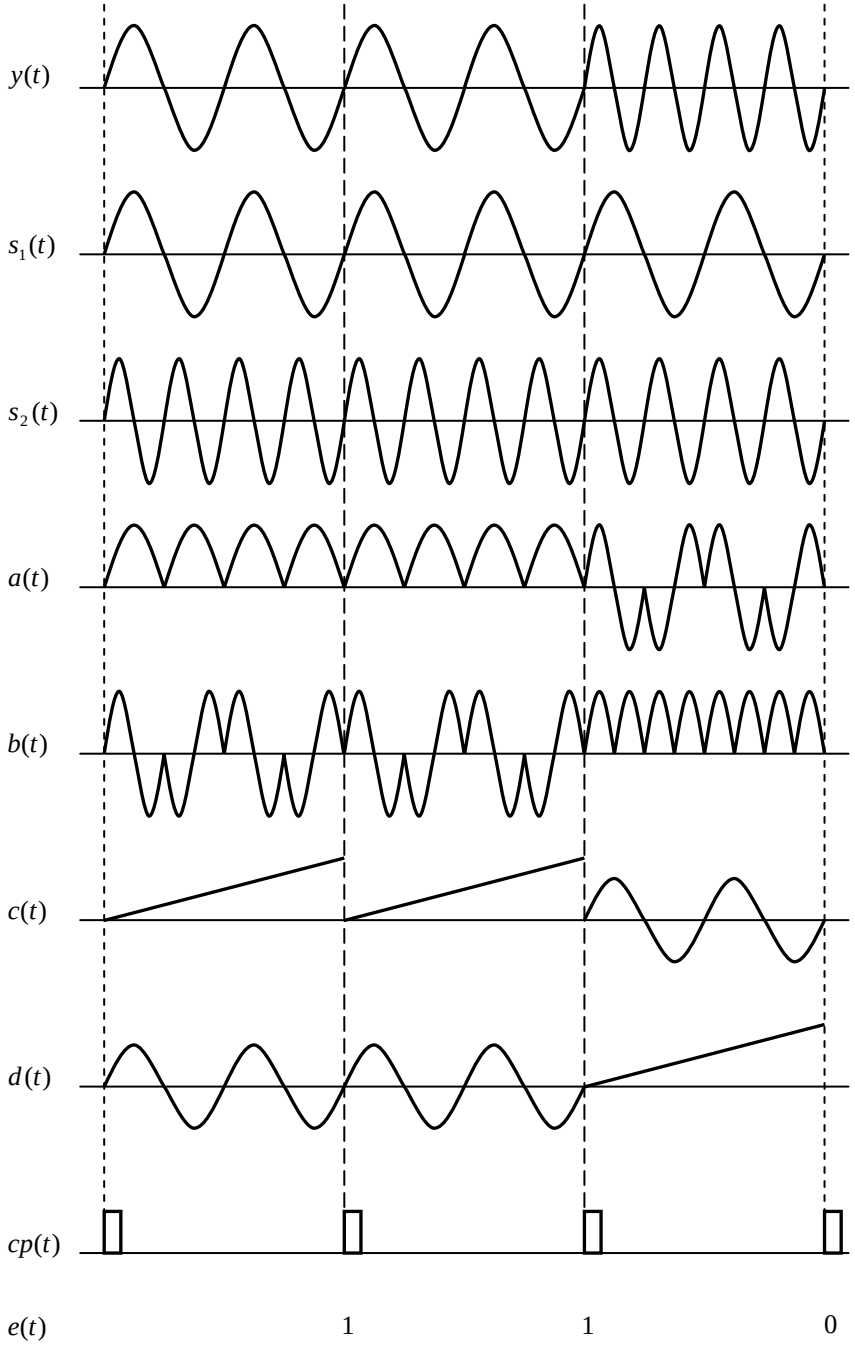

图 J8-2(b) 各点的波形图

（3）因为 $f_1 + f_2 = 6/T_s$， $f_2 - f_1 = 2/T_s$，所以 $s_1(t)$ 与 $s_2(t)$ 不相关。

$s_1(t)$、$s_2(t)$ 的能量为 $E_b = A^2 T_s / 2$。

该系统的误码率为 $P_e = Q\left[\sqrt{E_b / n_0}\right] = Q\left[\sqrt{(A^2 T_s)/(2n_0)}\right]$

8-6 解：

（1）匹配滤波器形式的最佳接收机结构如图 J8-6(a)所示：

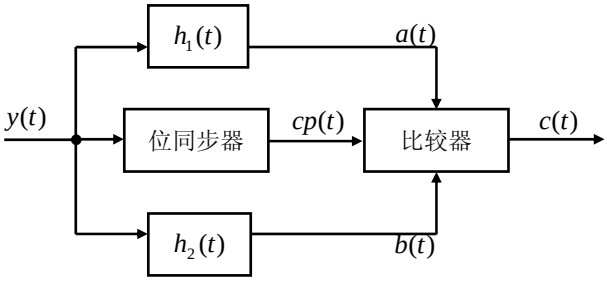

图 J8-6(a) 匹配滤波器形式的最佳接收机结构

（2）由题意得：

$h_1(t) = s_1(T-t) = s_2(t)$

$h_2(t) = s_2(T-t) = s_1(t)$

匹配滤波器形式的最佳接收机波形如图 J8-6(b)：

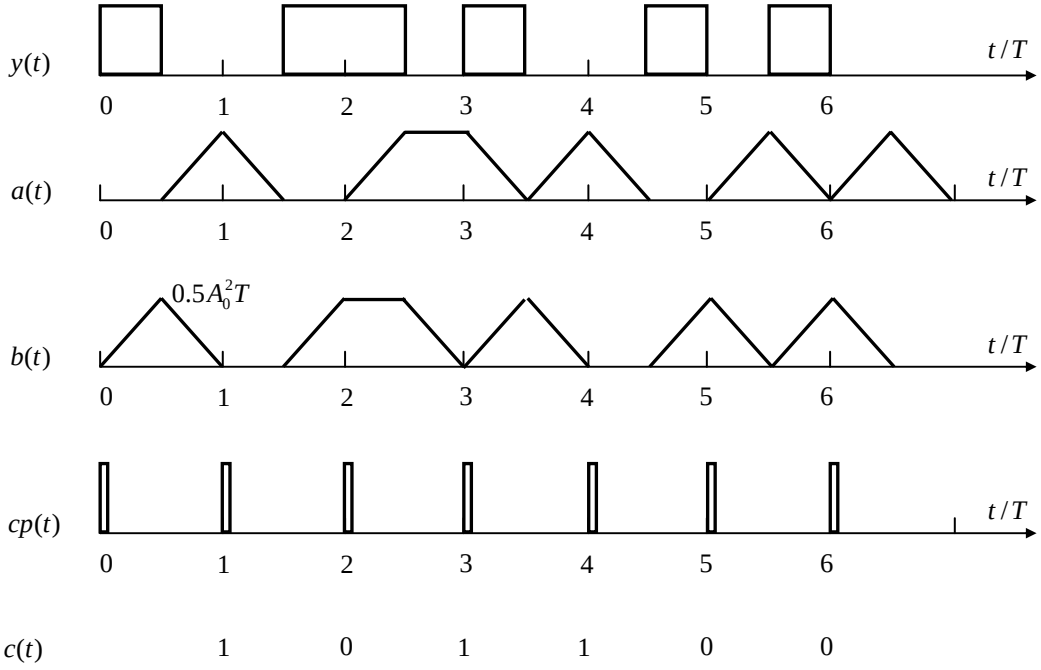

图 J8-6(b) 匹配滤波器形式的最佳接收机结构

（3） $E_{b1} = E_{b2} = E_b = A_0^2 T/2$， $\rho = \dfrac{1}{E_b}\int_0^T s_1(t)s_2(t)dt = 0$

因此系统的误码率为 $P_e = Q\left[\sqrt{E_b/n_0}\right] = Q\left[\sqrt{(A_0^2T)/(2n_0)}\right]$

8-7 解：

（1）匹配滤波器形式的最佳接收机结构如图 J8-7(a)所示：

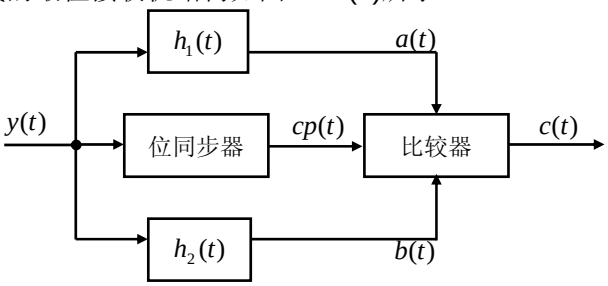

图 J8-7(a) 最佳接收机结构

（2）匹配滤波器的冲激响应波形如图 J8-7(b)：

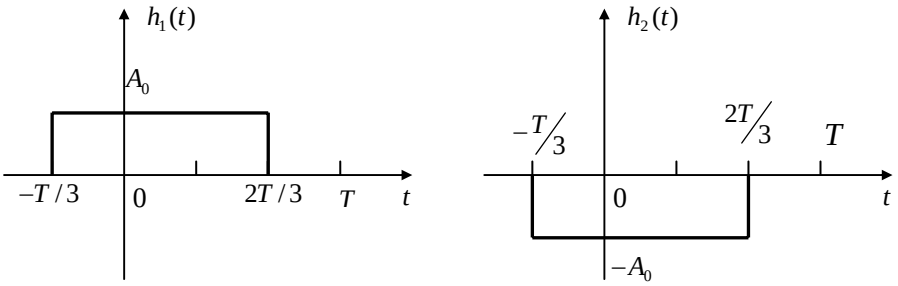

图 J8-7(b) 匹配滤波器的冲击响应波形

匹配滤波器形式的最佳接收机波形如图 J8-7(c)：

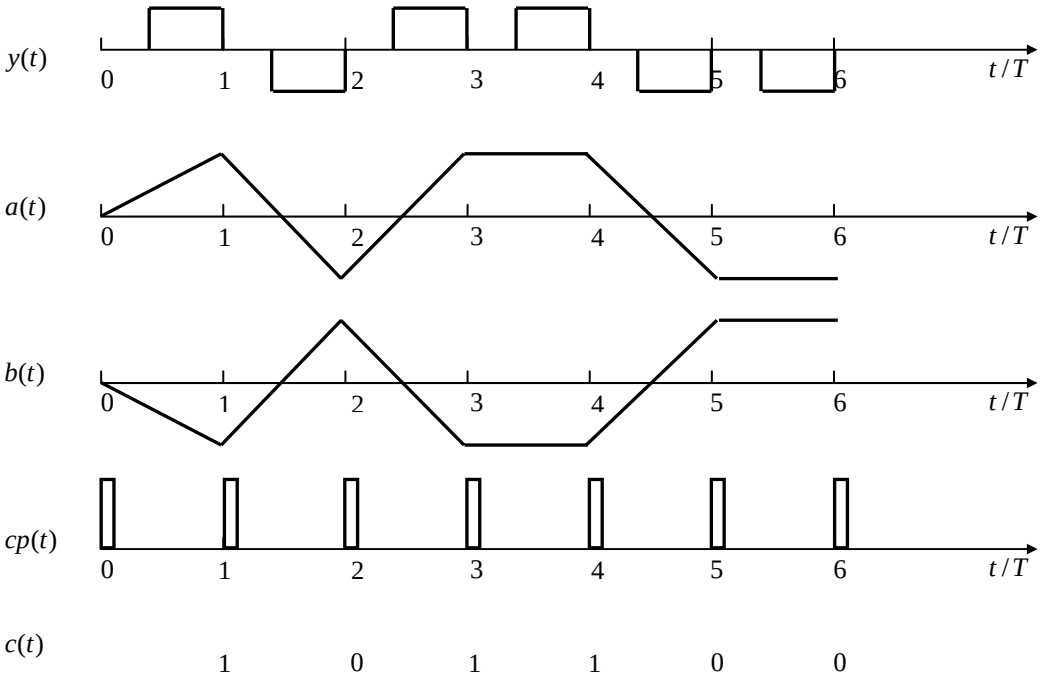

图 J8-7(c) 最佳接收机各点波形

（3） $E_b = 2A_0^2 T/3$， $\rho = -1$

系统的误码率为 $P_e = Q\left[\sqrt{2E_b/n_0}\right] = Q\left[2A_0\sqrt{T/(3n_0)}\right]$

8-12 解：

（1）2DPSK 最佳相干接收机方框图如图 J8-12(a)所示。

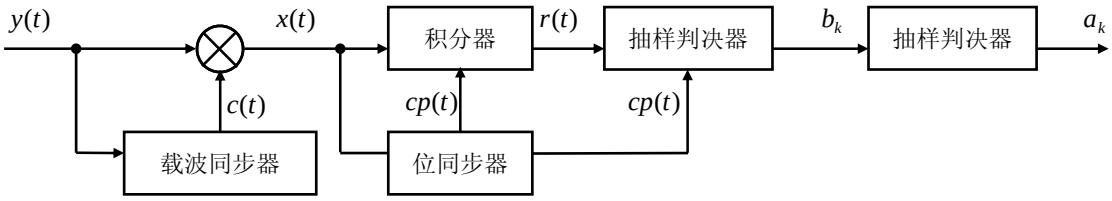

图 J8-12(a) 最佳相干接收机方框图

（2）无噪声时，最佳相干接收机各点波形如图 J8-12(b)所示：

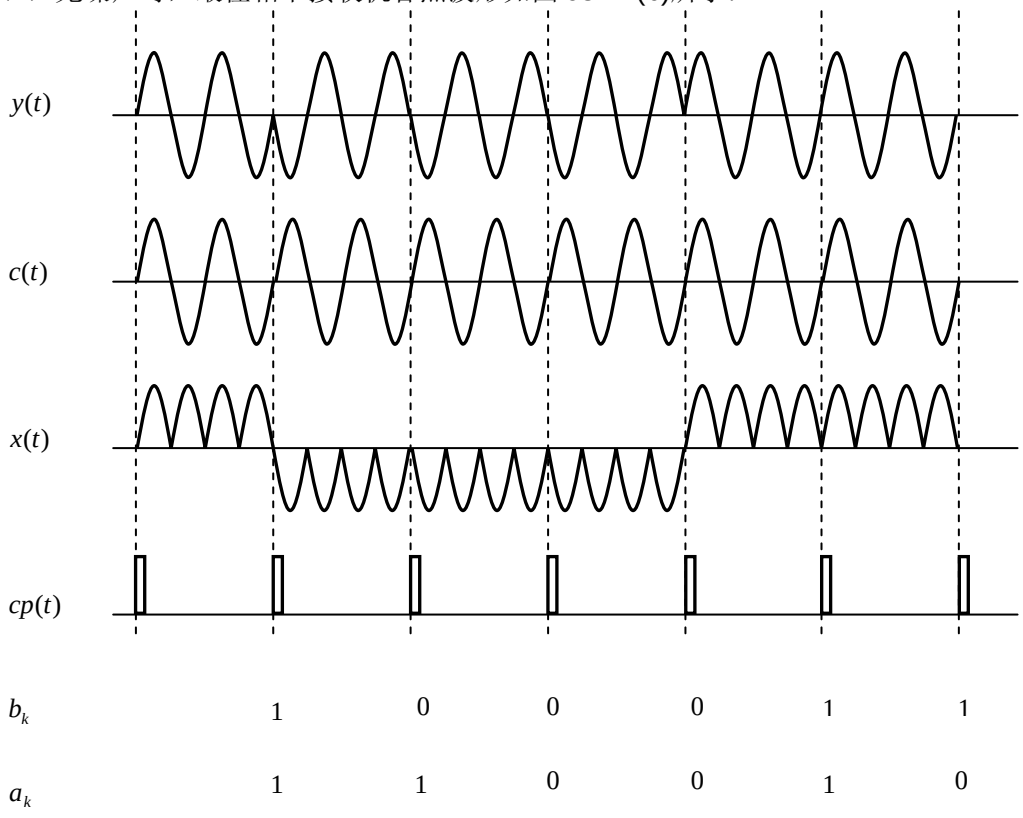

图 J8-12(b) 最佳相干接收机的各点波形

8-13 证：

最佳接收机的误码率为 $P_{e1}=Q\left[\sqrt{2E_b/n_0}\right]$

非最佳接收机的误码率为 $P_{e2}=Q\left[\sqrt{A^2/\sigma_n^2}\right]$

设非最佳接收机的收滤波器的频率特性为理想矩形，其带宽等于信号占用的信道带宽 B_c，则滤波器输出噪声功率为 $\sigma_n^2=n_0B_c$。

最佳接收机输入信号的每比特能量为 $E_b=A^2T_s=A^2/R_b$。

$$\frac{2E_b/n_0}{A^2/\sigma_n^2}=\frac{2A^2/(n_0R_b)}{A^2/(n_0B_c)}=\frac{2}{R_b/B_c}=\frac{2}{\eta_b}$$

因为 $\eta_b \le 2$，所以 $\frac{2E_b/n_0}{A^2/\sigma_n^2} \ge 1$， $P_{e1} \le P_{e2}$。