

9. Sincronización de Portadora y Sincronización de Símbolo

9.1 Objetivos

- Comprender los efectos de la pérdida de sincronismo de portadora y de símbolo.
- Conocer los distintos métodos para lograr la sincronización de portadora.
- Conocer el mecanismo empleado para lograr la sincronización de símbolo.
- Aplicar los mecanismos de sincronización a los métodos de modulación empleados.

9.2 Introducción

La demodulación coherente requiere que la señal de referencia en el receptor esté sincronizada en fase y frecuencia con la señal receptionada. Tanto la modulación coherente como no coherente requieren que se sincronice en fase y frecuencia el reloj de símbolo del receptor con la señal receptionada.

La sincronización de portadora se puede lograr enviando un tono de prueba antes de la señal de mensaje. Debido a que el tono tiene una fuerte componente espectral en la frecuencia de la portadora, el receptor puede capturar esta componente y generar una señal local coherente. Sin embargo, en este caso se requerirá un ancho de banda de transmisión extra.

La sincronización de portadora también se puede lograr empleando un circuito de recuperación de portadora que extrae la información de fase y frecuencia a partir de la señal receptionada con ruido y emplea esta información para generar una señal sinusoidal de referencia limpia.

La sincronización de símbolo generalmente se logra con un circuito de recuperación de reloj el cual emplea la señal receptionada para controlar el oscilador local.

9.3 Sincronización de Portadora

Sincronización de Portadora - BPSK

La expresión para una señal BPSK es

$$x(t) = A(t) \cos(2\pi f_c t + \theta)$$

donde $A(t)$ es una señal aleatoria de la forma

$$A(t) = \sum_k A_k p(t - kT - D)$$

con $A_k = \pm 1$ y $p(t)$ un pulso de amplitud unitaria de duración T . Como se observó en capítulos anteriores para poder demodular $x(t)$ y extraer A_k , el receptor necesita una portadora generada localmente de la forma

$$c(t) = \cos(2\pi f_c t + \hat{\theta})$$

y además necesita un reloj local que tenga transiciones a $kT + \hat{D}$, el receptor tiene que estimar los valores de la fase de la portadora θ y la fase del reloj D .

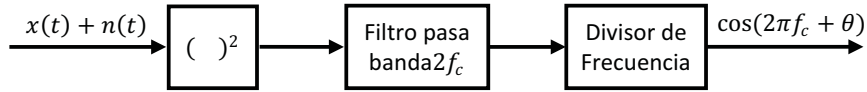


Figura 9.1 Sincronización de portadora BPSK de lazo abierto

El espectro de $x(t)$ no tiene la componente de la portadora debido a que $A(t)$ no tiene valor de continua. Para observar cómo podemos generar una componente a la frecuencia de la portadora, vamos a tomar la señal modulada sin distorsión y sin ruido $x(t)$ y elevarla al cuadrado para obtener

$$x^2(t) = A^2(t) \cos(2\pi f_c t + \theta) = \frac{A^2(t)}{2} [1 + \cos(4\pi f_c t + 2\theta)]$$

$$z_2(t) = \frac{A^2(t)}{2} \cos(4\pi f_c t + 2\theta)$$

En el caso ideal, $A(t) = \pm 1$, $A^2(t) = 1$, por lo tanto tenemos

$$x^2(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(4\pi f_c t + 2\theta)$$

de donde tenemos que $z_2(t)$ es simplemente el término de doble frecuencia $\frac{1}{2} \cos(4\pi f_c t + 2\theta)$.

Pasando $x^2(t)$ por un filtro pasa-banda, podemos aislar $z^2(t)$, y luego procesando esta señal a través de un circuito divisor de frecuencia, podemos extraer la portadora de referencia $\cos(2\pi f_c t + \theta)$. Esta operación elimina la señal moduladora de la portadora para producir una portadora local sin modulación con la fase correcta

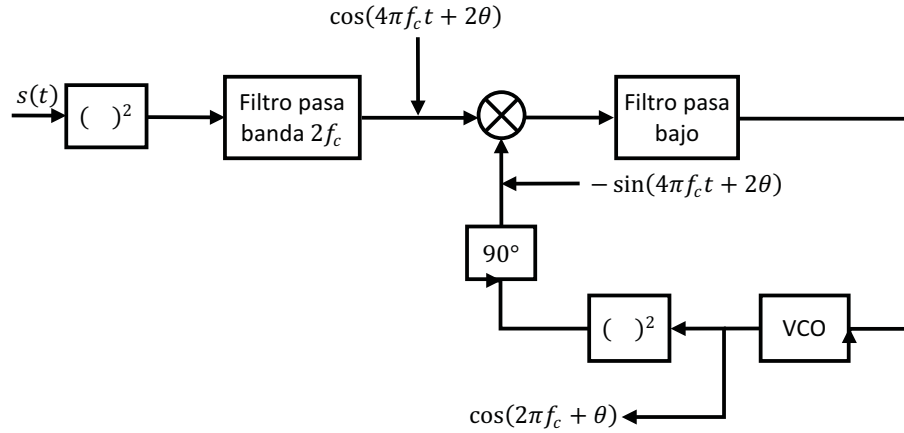


Figura 9.2 Sincronización de portadora BPSK de lazo cerrado

La estructura mostrada en la Figura 9.1 realizará la función de generar una portadora de referencia si la entrada BPSK no presentara distorsión ni presentara ruido, además la frecuencia de la portadora debe ser muy cercana a la frecuencia de oscilador local del transmisor y la fase de la portadora una constante. En la realidad estas condiciones no se satisfacen y esta implementación es ineficiente. La solución a este problema es el empleo de un circuito sincronizador de fase conocido como PLL, como el que se muestra en la Figura 9.2, el cual es sólo una variación de una serie de implementaciones generalmente conocidas como lazo cuadrático. El filtro ubicado a continuación del multiplicador se encarga de eliminar la componente del doble de frecuencia.

Dos alternativas al lazo cuadrático se muestran en la figura 14.3, el diagrama de la parte (a) se conoce como el lazo de costas y el de la parte (b) como lazo de dirección guiada.

9.4 Sincronización de Símbolo

Sincronización de Símbolo - BPSK

Bajo la consideración que tanto como la modulación como la demodulación se implementan idealmente, la señal transmitida en banda base queda expresada de la siguiente forma

$$A(t) = \sum_k A_k p(t - kT - D)$$

esta señal se recupera en el receptor exactamente de la misma manera. Con el fin de recuperar la información, es necesario que el receptor tenga un reloj el cual esté sincronizado con la señal recepcionada. El reloj es una señal periódica $P(t)$ con periodo T , y cuyo cruce por cero ocurre a $(kT - D)$, de la siguiente forma

$$P(t) = \sum_k g(t - kT - D)$$

donde $g(t)$ es un pulso de duración $< T$. El flanco de subida del reloj se usa para controlar los intervalos de observación del dispositivo de decisión. Por ejemplo en el caso del filtro integrador el flanco del reloj se encarga de marcar el inicio del integrador y el siguiente flanco se encarga de finalizar el tiempo de integración y marcar un nuevo periodo de integración.

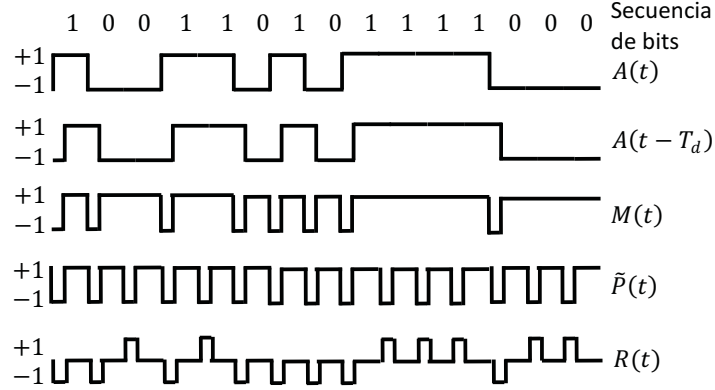


Figura 9.3 Ilustración del método retardar y multiplicar

Existe una analogía interesante entre la recuperación de fase y la recuperación de símbolo, en el sentido que recuperar la frecuencia de portadora es similar a recuperar la frecuencia de reloj y en lugar de sincronizar el desfase θ de la frecuencia f_c del oscilador, en la recuperación de tiempo de símbolo se sincroniza el retardo D . Sin embargo, hay una diferencia importante. Por ejemplo, si tratamos de aplicar el método del lazo cuadrático, no va a funcionar debido a que $A^2(t)$ va a ser igual a uno para todo t , por lo que no contendrá ningún cruce por cero.

De esta manera, se han planteado varias soluciones al problema de recuperación de tiempo símbolo de las cuales presentamos una técnica conocida como el método de retrasar y multiplicar. En lugar de $A^2(t)$, consideraremos el producto $A(t)A(t - T_d)$, el cual nos muestra la razón del nombre del método. T_d es un valor constante seleccionado apropiadamente. Esta técnica se ilustra en la Figura 9.3. El resultado del producto es

$$M(t) = A(t)A(t - T_d)$$

el cual se puede descomponer en sus componentes periódica y aperiódica

$$M(t) = \tilde{P}(t) + R(t)$$

La componente periódica $\tilde{P}(t)$ tiene armónicos múltiplos de $1/T$, por lo tanto el tono en $f = T^{-1}$ puede filtrarse para recuperar la señal de reloj. Sin embargo observamos que el tono filtrado $\cos(2\pi T^{-1}t)$ no está en la forma deseada por lo que es necesario adicionar un procesamiento no lineal para que esté en la forma deseada.

El método presentado anteriormente es un ejemplo de sincronizador de lazo abierto, sin embargo la respuesta de estos sistemas no son óptimas en presencia de ruido y distorsión. El método de adelanto y atraso, que se muestra

en la Figura 9.4, es un ejemplo de la clase de sincronizadores de lazo cerrado. El principio de funcionamiento se comprende mejor observando la Figura 9.5. El punto de inicio es establecido por el oscilador de onda cuadrada generado localmente por el VCO. Si el reloj de señal cuadrada del VCO está en perfecta sincronización con la señal demodulada $m(t)$, el integrador de adelanto y el integrador de retraso almacenarán la misma cantidad de energía de la señal, de modo que la señal de error $e = 0$. Si la frecuencia del VCO es mayor que la frecuencia de $m(t)$, entonces $m(t)$ se retrasará por $\Delta < d$, con respecto al reloj del VCO. Por lo que el tiempo de integración del integrador de adelanto será $T - d - \Delta$, mientras que el tiempo de integración del integrador de retraso se mantiene constante en $T - d$. La señal de error será proporcional a $-\Delta$. Esta señal de error reducirá la frecuencia del VCO y retardará el reloj del VCO para regresarlo a la fase de $m(t)$. Si la frecuencia del oscilador fuera menor el reloj del VCO se retrasaría con respecto a $m(t)$, por lo que la señal de error será proporcional a $+\Delta$, y se producirá en proceso inverso, en el cual el VCO aumentará su frecuencia para tratar de alcanzar a la señal de entrada y avanzar al mismo tiempo.

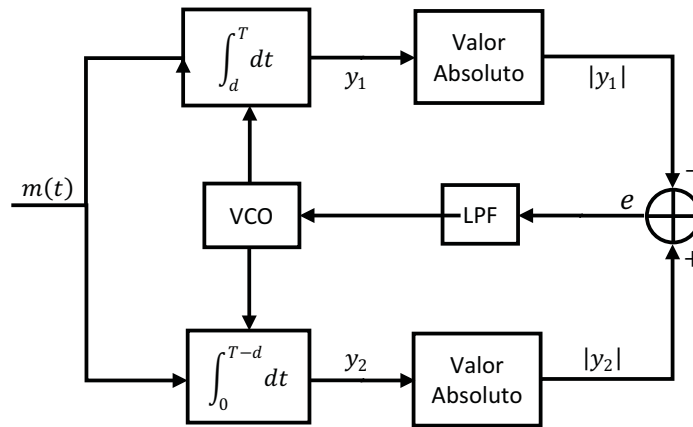


Figura 9.4 Sincronización de símbolo BPSK de adelanto y atraso

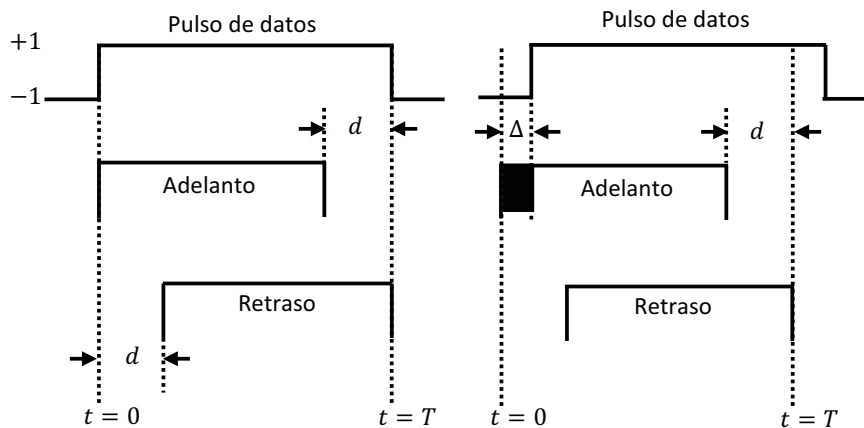


Figura 9.5 Ilustración de la sincronización de símbolo