

Lección 4: Formato y Modulación en Banda Base. Parte II

Gianluca Cornetta, Ph.D.

Dep. de Ingeniería de Sistemas de Información y Telecomunicación

Universidad San Pablo-CEU



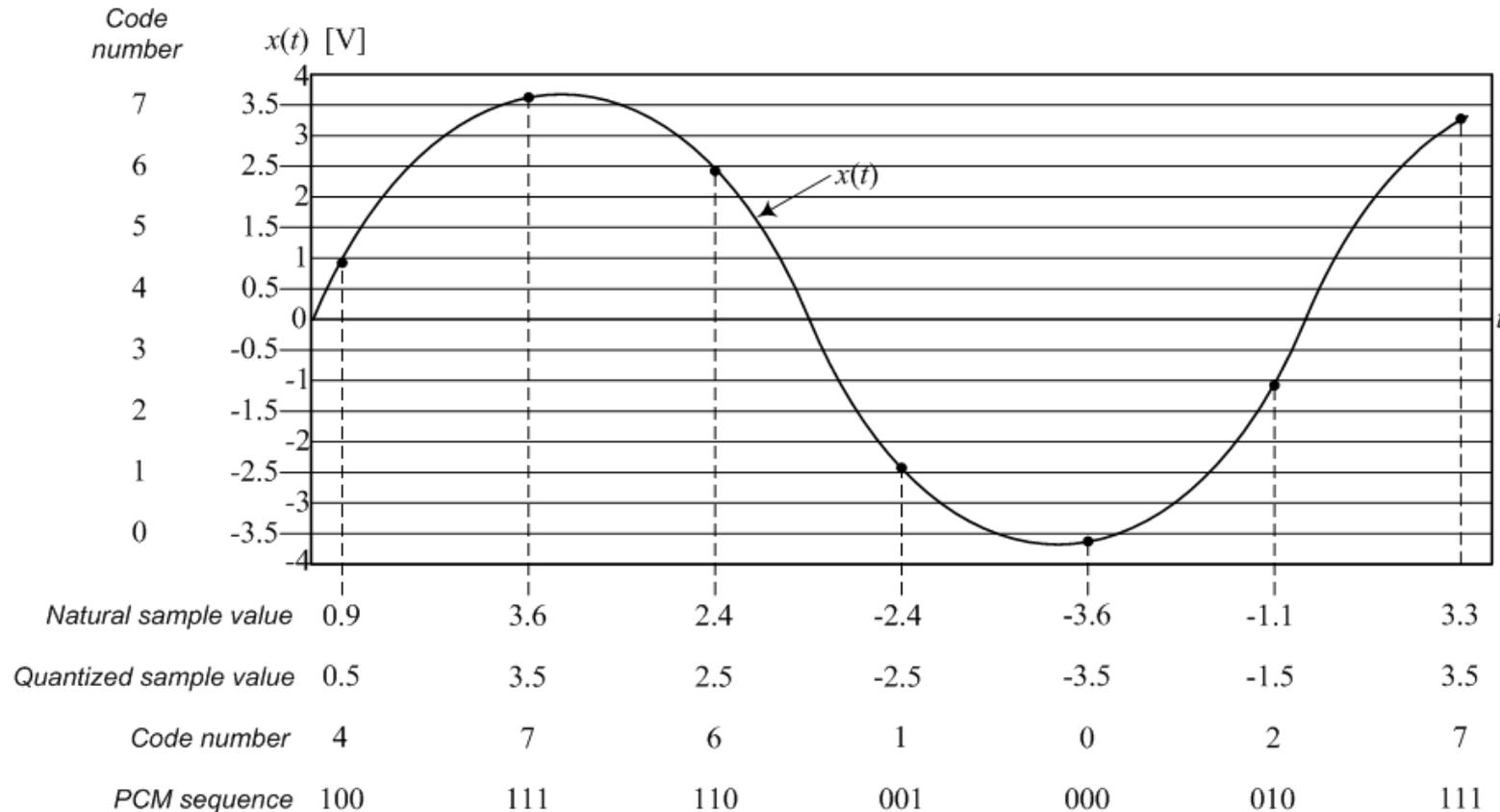
Contenido

- ❑ Modulación por Impulsos Codificados (PCM)
- ❑ Cuantificación Uniforme y No Uniforme
- ❑ Transmisión en Banda Base
- ❑ Codificación Correlativa

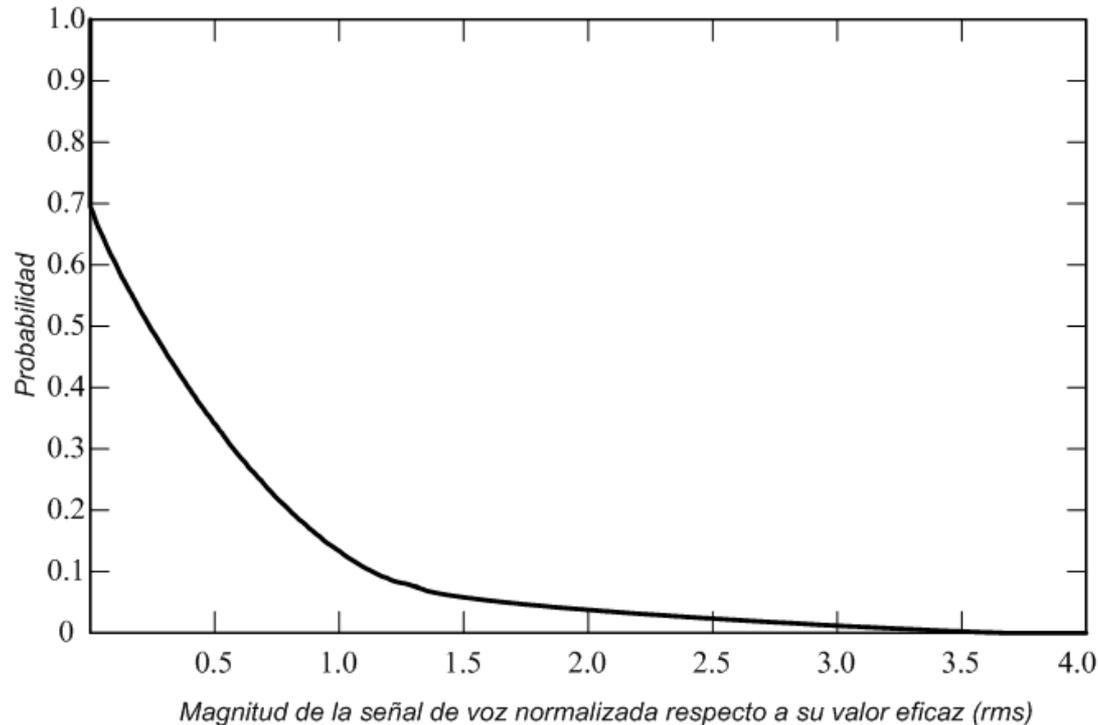


Modulación por Impulsos Codificados

- ❑ La modulación por impulsos codificados (*Pulse Code Modulation* –PCM) caracteriza una clase de señales en banda base obtenidos a partir de señales PAM cuantificadas codificando cada muestra con una palabra digital
- ❑ Una señal PAM es asignada a uno entre L posibles niveles de cuantificación
- ❑ Cada nivel de cuantificación es codificado con $\ell = \log_2 L$ bits



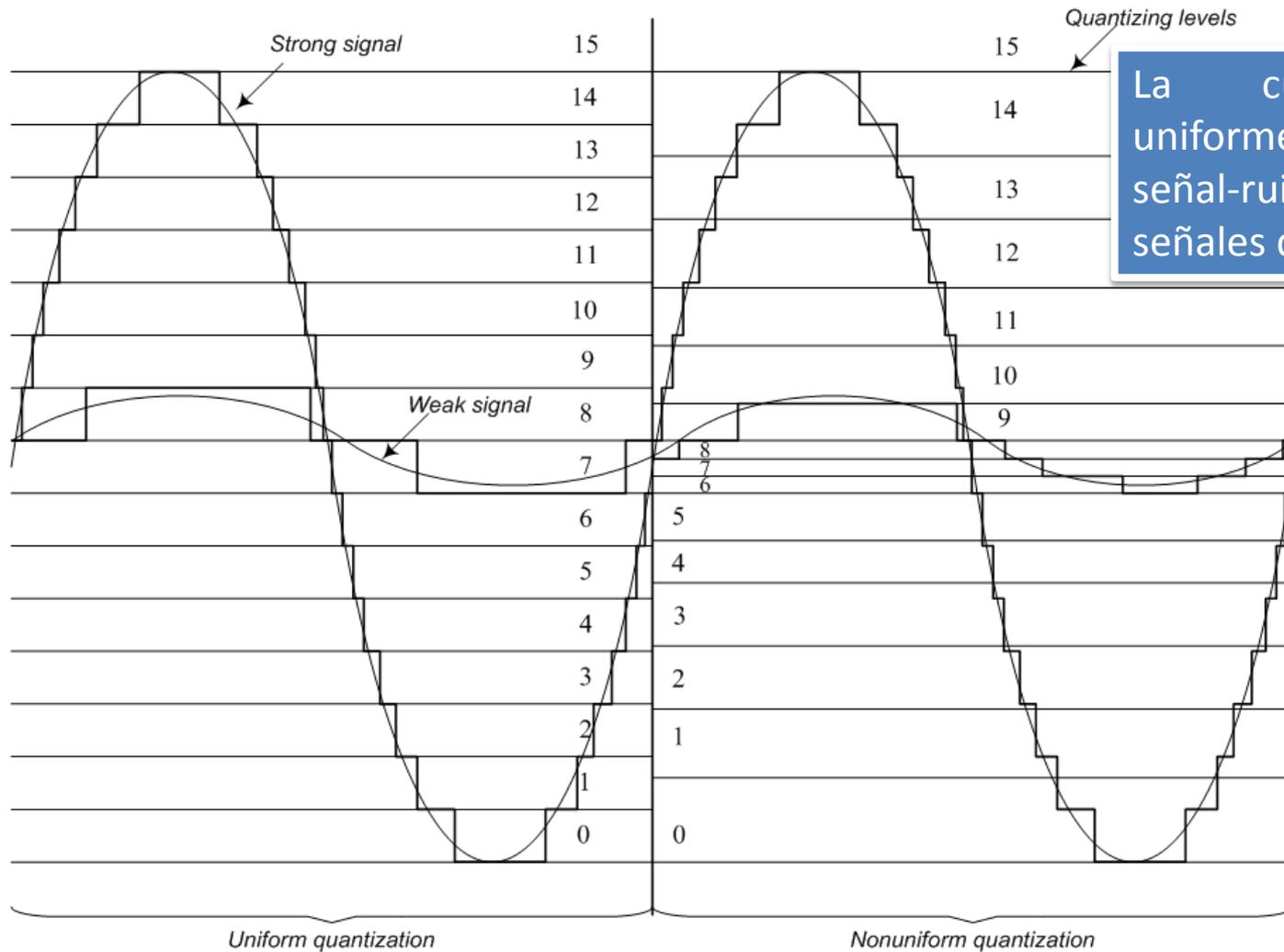
Cuantificación Uniforme y No Uniforme



- ❑ Existen aplicaciones en las que la potencia de la información a transmitir depende del tipo de información
- ❑ Un claro ejemplo es la transmisión de la voz humana para la que el 50% de las veces la energía asociada a la señal es inferior a la cuarta parte de su valor eficaz (*rms*) y sólo el 15% de las veces la señal supera el valor eficaz



Cuantificación Uniforme y No Uniforme

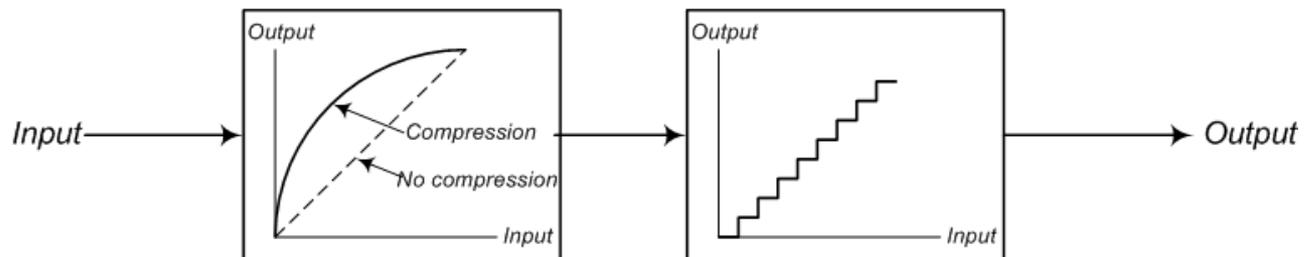
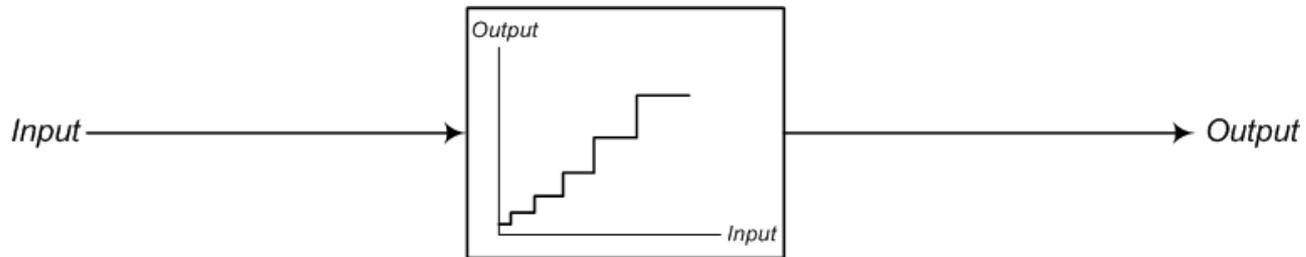


La cuantificación no uniforme mejora la relación señal-ruido en el caso de señales débiles



Cuantificación Uniforme y No Uniforme

- ❑ Existen dos formas de realizar una cuantificación no uniforme:
 - ❑ *Utilizar un cuantificador no uniforme*
 - ❑ *Pre-distorsionar la señal con un compresor logarítmico y aplicar la señal distorsionada a un cuantificador lineal. En recepción es necesaria una operación de expansión de la señal (el conjunto de operaciones de compresión y expansión se denomina *companding*)*



Cuantificación Uniforme y No Uniforme

- ❑ Los sistemas PCM modernos utilizan aproximación lineal a tramos de una característica de compresión logarítmica
- ❑ *Estándar Americano (μ -law $-\mu=255$):*

$$y = y_{\max} \frac{\log_e \left[1 + \mu \left(|x| / x_{\max} \right) \right]}{\log_e (1 + \mu)} \operatorname{sgn} x$$

- ❑ *Estándar Europeo (A -law $-A=87.6$)*

$$y = \begin{cases} y_{\max} \frac{A \left(|x| / x_{\max} \right)}{1 + \log_e A} \operatorname{sgn} x & 0 < \frac{|x|}{x_{\max}} \leq \frac{1}{A} \\ y_{\max} \frac{1 + \log_e \left[A \left(|x| / x_{\max} \right) \right]}{1 + \log_e A} \operatorname{sgn} x & \frac{1}{A} < \frac{|x|}{x_{\max}} < 1 \end{cases}$$

- ❑ Donde:

$$\operatorname{sgn} x = \begin{cases} +1 & \text{para } x \geq 0 \\ -1 & \text{para } x < 0 \end{cases}$$

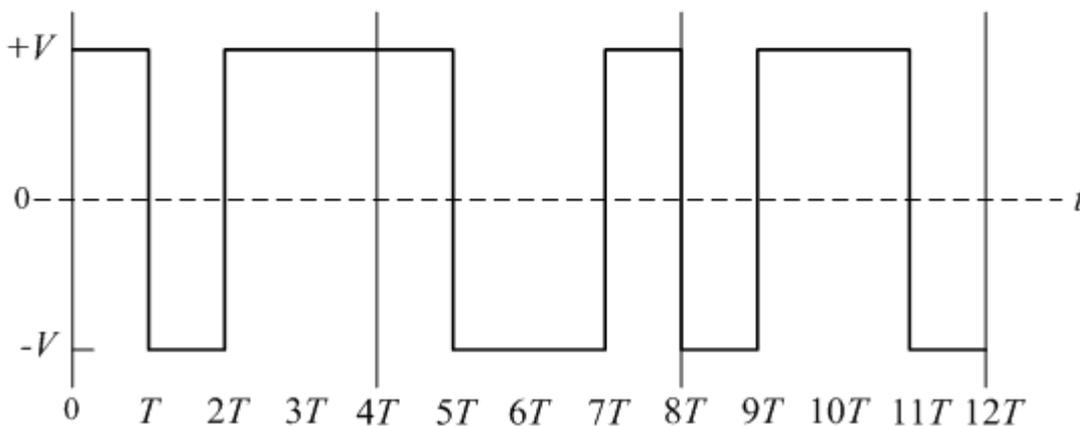
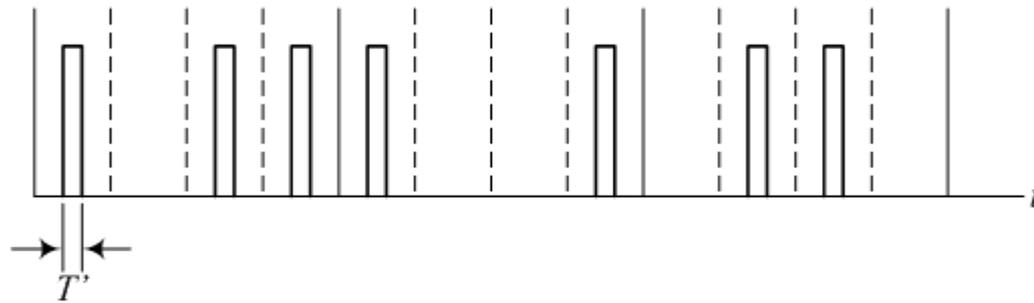


Transmisión en Banda Base



Desde el punto de vista físico los bits se implementan mediante pulsos eléctricos de duración T' (que codifican los 1) y ausencia de pulsos (que codifican los 0). El tiempo reservado para la transmisión de un bit es T .

La probabilidad de detectar correctamente un bit en recepción es proporcional a la energía del pulso por lo que conviene que sea $T'=T$ y utilizar una codificación bipolar de los pulsos.

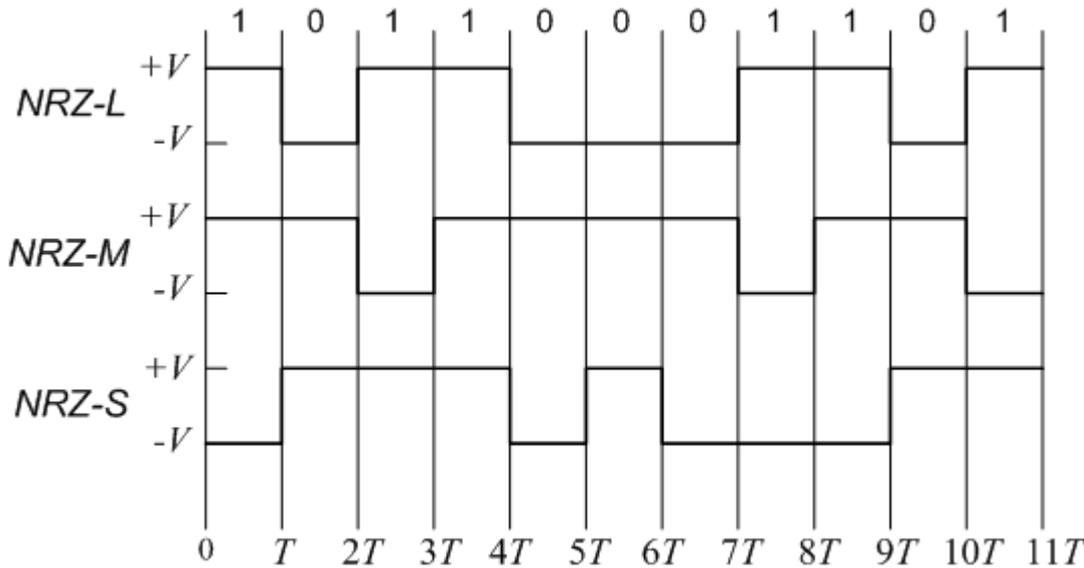


Transmisión en Banda Base

- ❑ Una modulación por impulsos codificados puede ser:
 - ❑ *Binaria* cuando es aplicada a un símbolo binario (PCM)
 - ❑ *M-aria* cuando es aplicada a un símbolo no binario
- ❑ Las señales PCM se dividen en 4 grupos:
 - ❑ *Sin retorno a cero (NRZ)*
 - ❑ *Con retorno a cero (RZ)*
 - ❑ *Con codificación de fase*
 - ❑ *Binario multinivel*



Transmisión en Banda Base



La codificación más utilizada es la NRZ que puede dividirse en los subgrupos siguientes:

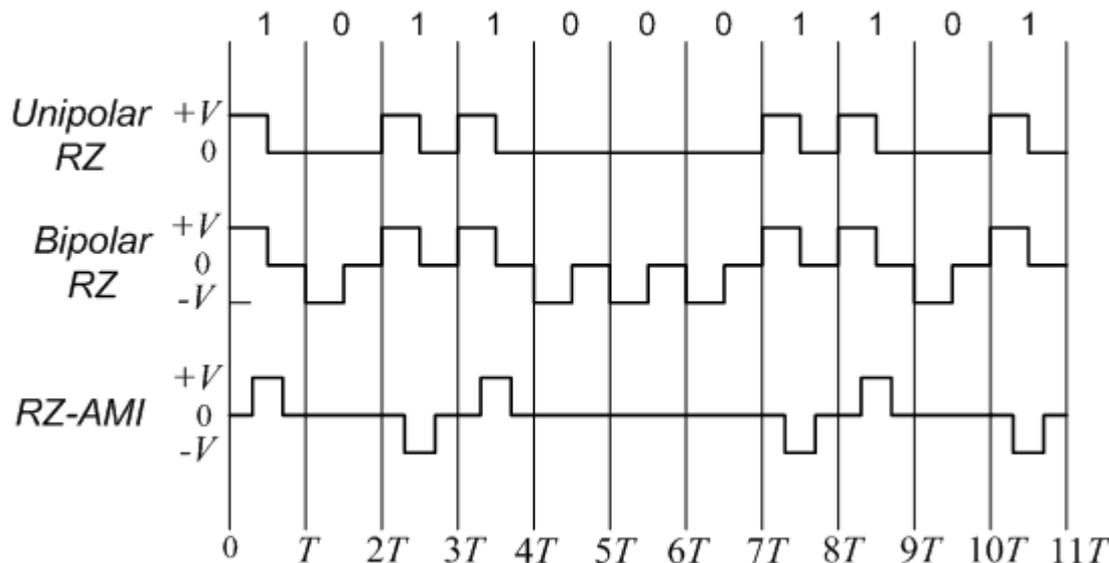
1- NRZ-L (L está por "level", el 0 y el 1 son representados mediante dos niveles de tensión)

2- NRZ-M (M está por "mark", es decir un 1 binario)

3- NRZ-S (S está por "space", es decir, un 0 binario)

- ❑ En una codificación NRZ-L los niveles cambian cada vez que hay una transición de 0 a 1 o viceversa
- ❑ En una codificación NRZ-M (*codificación diferencial*) un 1 es representado con un cambio de nivel mientras que a un 0 no corresponde ningún cambio
- ❑ La codificación NRZ-S es la complementaria de la NRZ-M

Transmisión en Banda Base



La codificación RZ puede dividirse en los subgrupos siguientes:

1- RZ-Unipolar

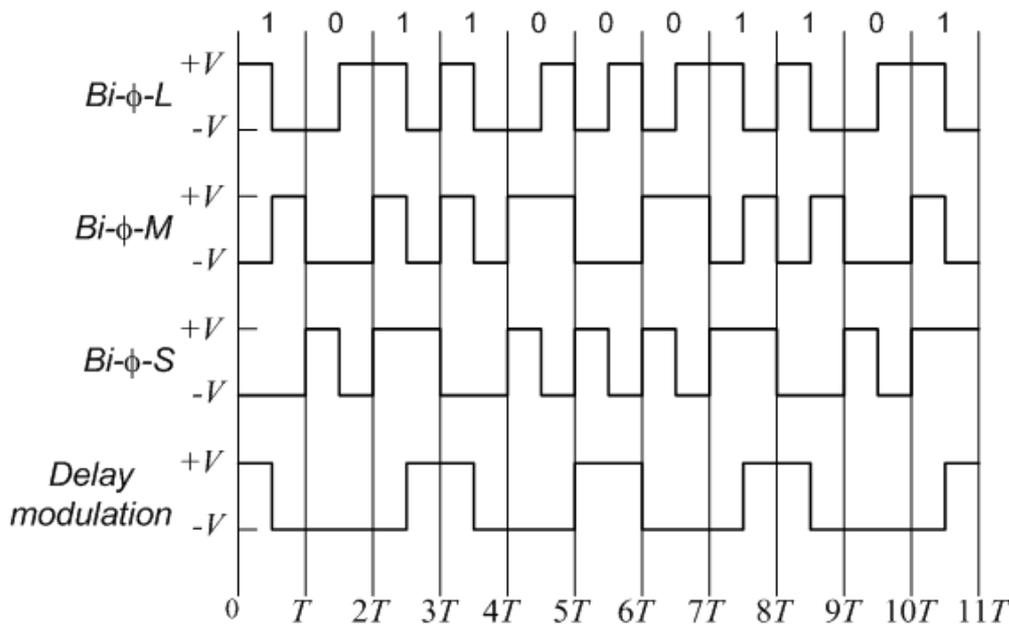
2- RZ-Bipolar

3- RZ-AMI (AMI está por "Alternate Mark Inversion")

- ❑ En una codificación RZ unipolar un 1 es representado con un pulso cuya duración es la mitad del tiempo de bit mientras que un 0 es representado por la ausencia de pulso
- ❑ En una codificación RZ bipolar 0 y 1 son representados con pulsos de polaridades opuestas cuya duración es la mitad del tiempo de bit
- ❑ En una codificación RZ-AMI los 1 son representados por pulsos alternos de igual amplitud mientras que los 0 son representados por la ausencia de pulsos



Transmisión en Banda Base

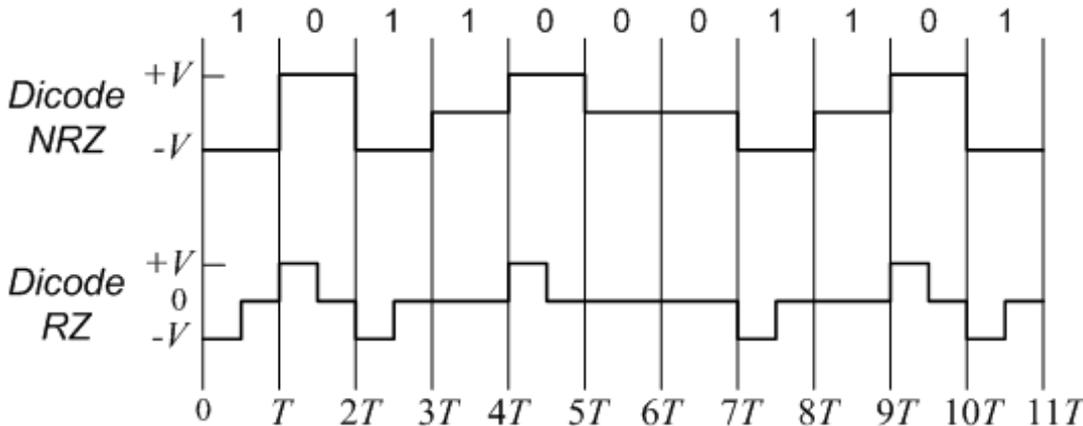


La codificación de fase puede dividirse en los subgrupos siguientes:

- 1- $Bi-\phi-L$ (*bi-phase-level*) también conocida como *codificación Manchester*
- 2- $Bi-\phi-M$ (*bi-phase-mark*)
- 3- $Bi-\phi-S$ (*bi-phase-space*)
- 4- *Delay modulation (DM)* también conocida como *codificación de Miller*

- ❑ En una codificación $Bi-\phi-L$ un 1 es representado con un pulso cuya duración es la mitad del tiempo de bit posicionado en la primera parte del intervalo, mientras que un 0 es representado pulso cuya duración es la mitad del tiempo de bit posicionado en la segunda parte del intervalo
- ❑ En una codificación $Bi-\phi-M$ la transición ocurre al comienzo de cada intervalo de bit. Un 1 es representado por una transición en la segunda parte del intervalo, mientras que un 0 es representado por ausencia de transición
- ❑ En una codificación $Bi-\phi-S$ una transición ocurre al comienzo de cada intervalo de bit. A un 1 no corresponde ninguna transición en la segunda parte del intervalo de bit, mientras que a un 0 corresponde una segunda transición en la segunda mitad del tiempo de bit
- ❑ En una codificación DM un 1 es representado por una transición en mitad del tiempo de bit, a un 0 no le corresponde ninguna transición a menos que sea seguido por otro cero. En este caso hay una transición al final del primer bit

Transmisión en Banda Base



La codificación binaria multinivel puede dividirse en los subgrupos siguientes:

1- RZ-Bipolar

2- RZ-AMI

3- Dicode-NRZ

4- Dicode-RZ

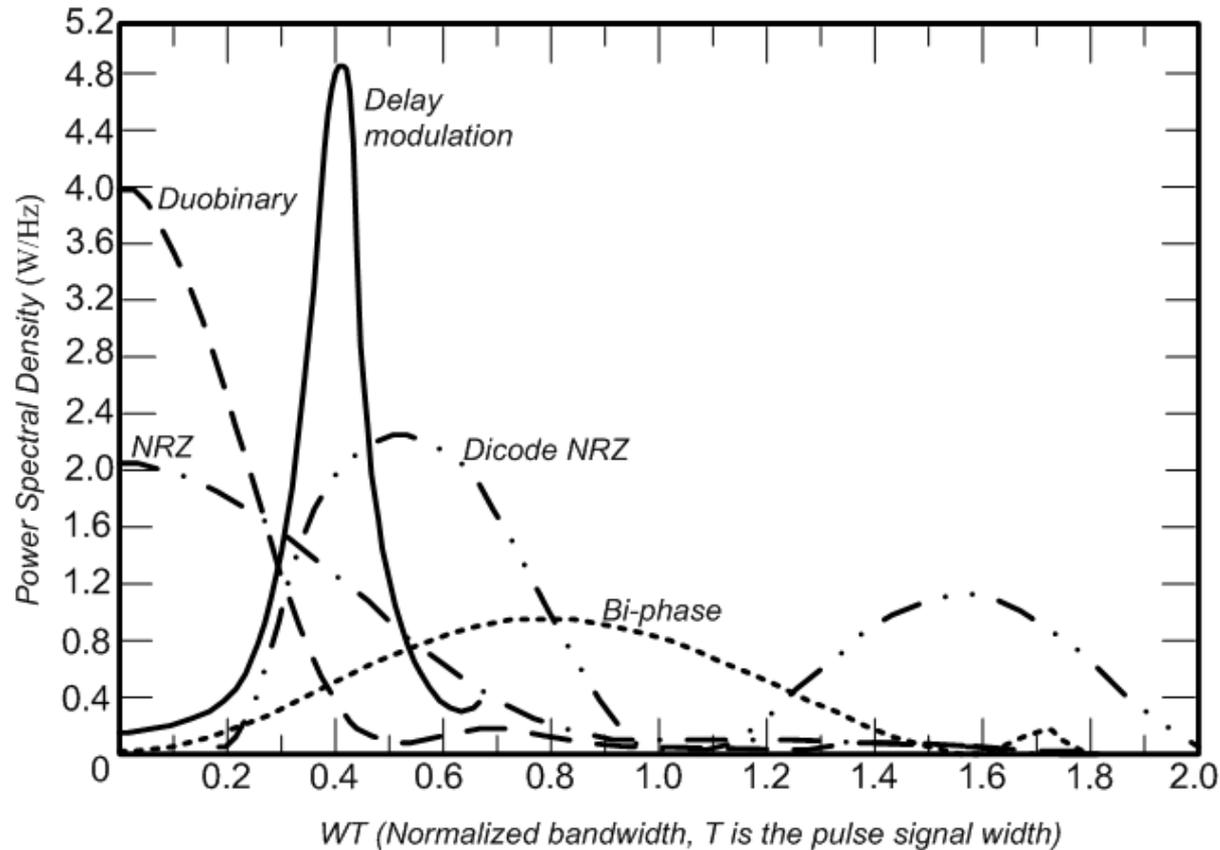
- ❑ En una codificación *Dicode-NRZ* una transición 0-1 o 1-0 cambia la polaridad del pulso. Cuando no hay transiciones se transmite un nivel 0
- ❑ En una codificación *Dicode-RZ* una transición 0-1 o 1-0 produce un cambio de polaridad en un pulso de duración de la mitad del tiempo de bit. Cuando no hay transiciones se transmite un nivel 0



Transmisión en Banda Base

- ❑ La elección del tipo de señal PCM más adecuada depende del tipo de aplicación
- ❑ Para escoger la forma de onda más adecuada hay que tener en cuenta los siguientes factores:
 - ❑ *Componente DC*: eliminar la energía de la señal DC permite realizar sistemas acoplados en AC. El problema es que sistemas acoplados en AC tienen baja sensibilidad para señales a bajas frecuencias
 - ❑ *Self-clocking*: algunos tipos de codificación PCM implementan intrínsecamente un mecanismo de sincronización (p. ej. la codificación Manchester presenta una transición en la mitad de cada intervalo de bit)
 - ❑ *Detección de error*: las codificaciones duobinarias proporcionan la posibilidad de detectar posibles errores de transmisión sin añadir bits adicionales de detección en la secuencia transmitida
 - ❑ *Compresión de banda*: los códigos multinivel mejoran la eficiencia espectral ya que a paridad de *data-rate* requieren un ancho de banda menor que otros esquemas
 - ❑ *Codificación diferencial*: Esta técnica permite invertir la polaridad de los datos transmitidos sin afectar al detector. Esta propiedad resulta ser muy útil en ciertos sistemas de comunicación
 - ❑ *Inmunidad al ruido*: algunos esquemas como el NRZ tienen mejor inmunidad al ruido respecto a otros, como por ejemplo el RZ unipolar

Transmisión en Banda Base

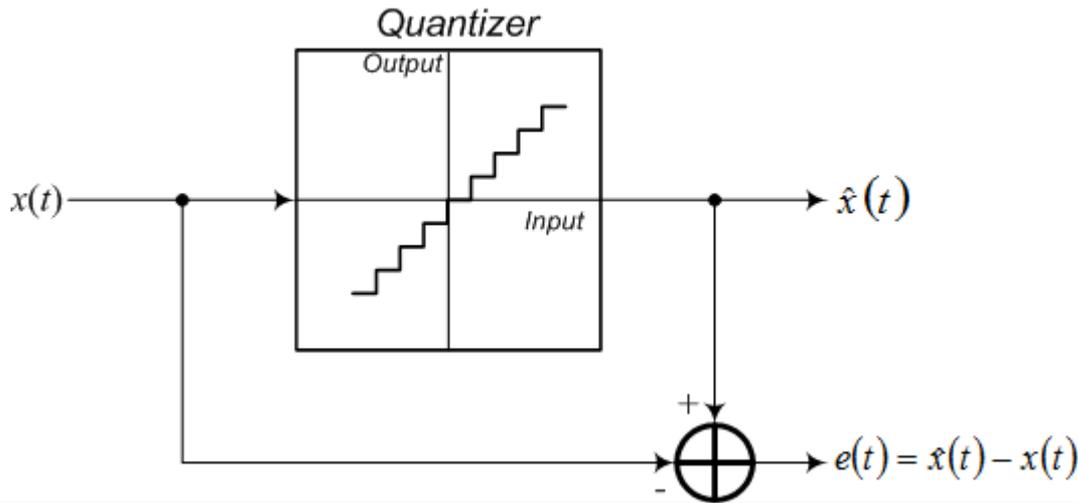


El producto WT se conoce como producto tiempo-ancho de banda y es una medida del aprovechamiento del ancho de banda disponible para transmitir una forma de onda dada.

Transmisión en Banda Base

- ❑ WT puede expresarse de forma equivalente como W/R_s ya que la tasa de transmisión de pulsos o símbolos es el recíproco de T
- ❑ Las formas de onda que requieren menos de 1.0 Hz para transmitir 1 símbolo/s son más eficientes de las que requieren más de 1.0 Hz para transmitir 1 símbolo/s
- ❑ Esquemas de transmisión como NRZ o duobinario concentran la mayor parte de su energía en DC o a las bajas frecuencias. Por el contrario, esquemas como el bi-fase no tiene energía en DC
- ❑ El parámetro que utiliza para medir la eficiencia de banda R/W (en bits/s/Hz). R/W indica el *throughput* por cada Hz de banda disponible

Transmisión en Banda Base



El error de cuantificación e puede expresarse como una fracción p de la tensión analógica pico-pico V_{pp} :

$$|e| \leq pV_{pp}$$

p depende del número L de niveles de cuantificación:

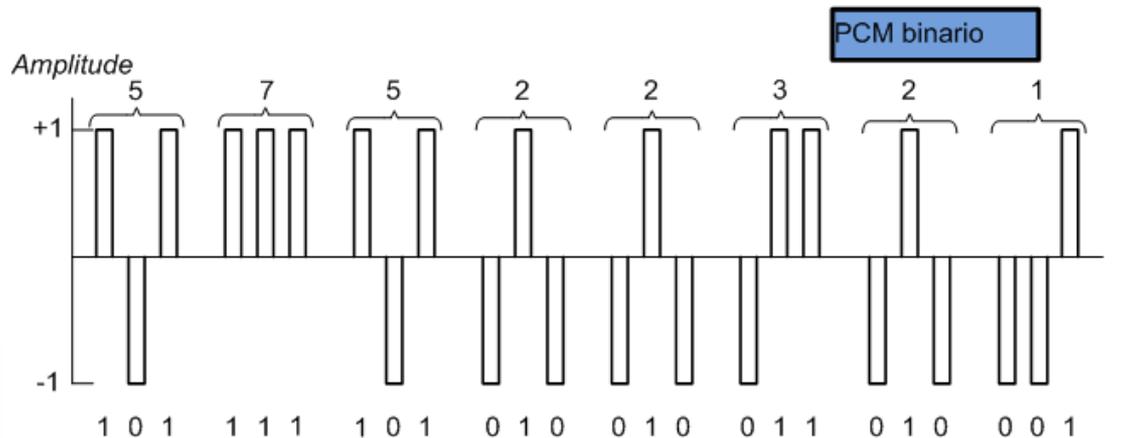
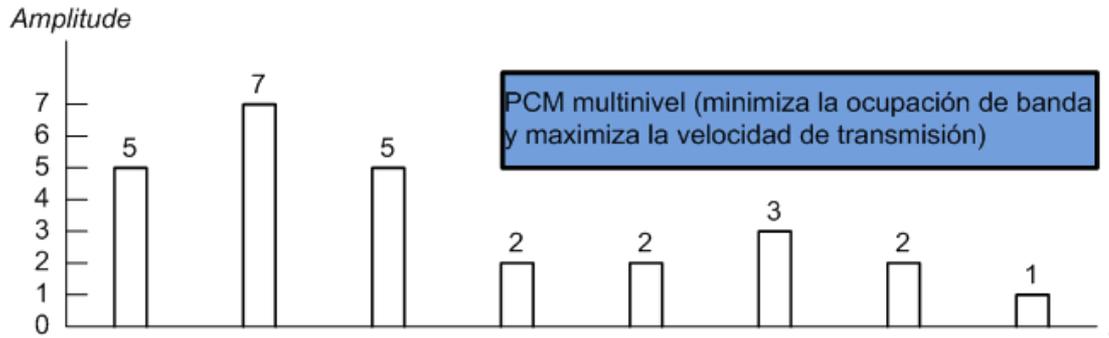
$$|e|_{\max} = \frac{q}{2} = \frac{V_{pp}}{2(L-1)} \approx \frac{V_{pp}}{2L} \leq pV_{pp}$$

Por tanto el número ℓ de bits necesarios para representar los L niveles es:

$$2^\ell = L \geq \frac{1}{2p} \Rightarrow \ell \geq \log_2 \frac{1}{2p}$$



Transmisión en Banda Base

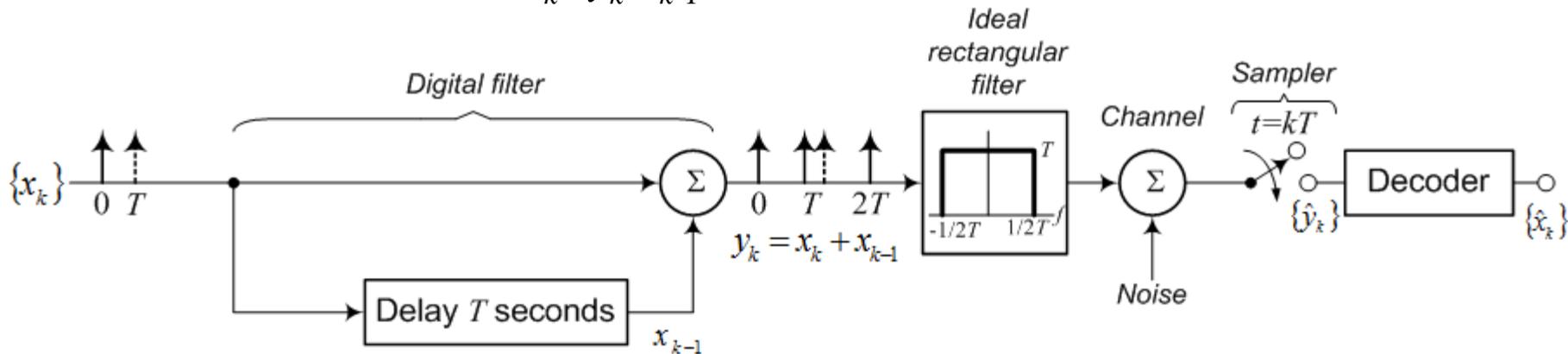


Existen tres formas distintas de modular una secuencias de pulsos:

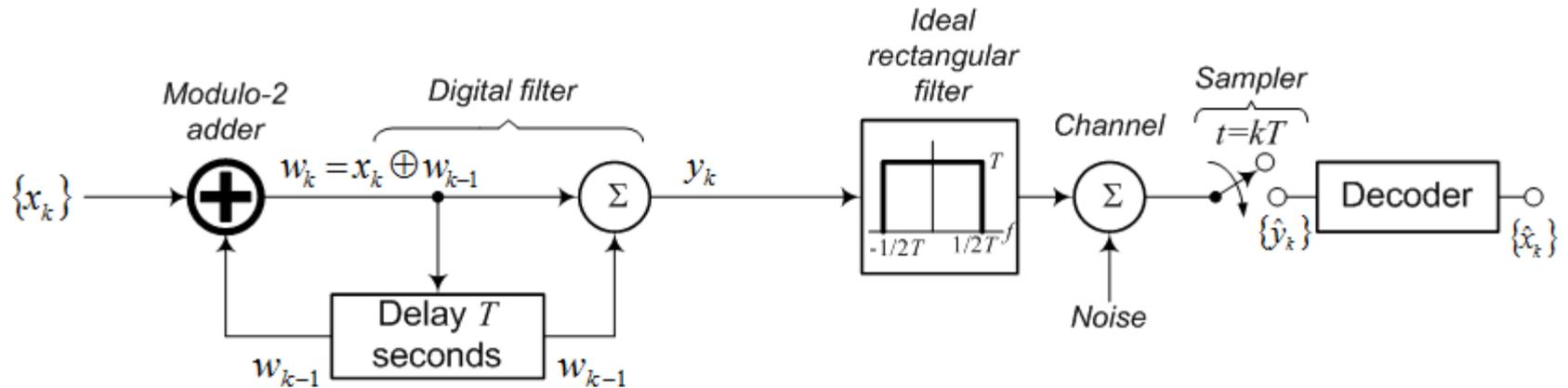
- Variar la amplitud (*Pulse Amplitude Modulation – PAM*)
- Variar la posición (*Pulse Position Modulation – PPM*)
- Variar la duración (*Pulse Duration Modulation – PDM*, conocida también como *Pulse Width Modulation – PWM*)

Codificación Correlativa

- ❑ Utilizando la *codificación correlativa* (o *codificación duobinaria*) es posible transmitir $2W$ símbolos/s sin ISI utilizando la banda mínima teórica de W Hz
- ❑ La idea consiste en pre-distorsionar los símbolos transmitidos introduciendo cierta ISI entre símbolos consecutivos y en modificar el detector para cancelar la interferencia inyectada en los símbolos
- ❑ Si x_k es igual a ± 1 , la señal distorsionada y_k puede asumir tres posibles valores: $-2, 0, +2$
- ❑ La decodificación es exactamente el inverso de la operación de codificación, es decir: $x_k = y_k - x_{k-1}$



Codificación Correlativa



El problema de la codificación correlativa es que si el receptor hace un error de detección, el error se propaga a los dígitos sucesivos corrompiendo el proceso de detección. Para evitar este problema se utiliza una técnica llamada pre-codificación (*pre-coding*)

Codificación Correlativa

- ❑ La función de transferencia de una codificación duobinaria es implementada conectando en cascada un filtro digital que incorpora un retardo de un dígito seguido por un filtro ideal con respuesta al impulso rectangular
- ❑ Un retardo en el dominio de Fourier es $e^{-j2\pi fT}$ por tanto la función de transferencia $H_1(f)$ del filtro digital es:

$$H_1(f) = 1 + e^{-j2\pi fT}$$

- ❑ La función de transferencia $H_2(f)$ del filtro ideal rectangular es:

$$H_2(f) = \begin{cases} T & \text{for } |f| < \frac{1}{2T} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

- ❑ Por consiguiente la función de transferencia global $H_e(f)$ de la conexión en cascada de los dos filtros es:

$$H_e(f) = H_1(f)H_2(f) \quad \text{for } |f| < \frac{1}{2T} \Rightarrow H_e(f) = (1 + e^{-j2\pi fT})T = T(e^{j\pi fT} + e^{-j\pi fT})e^{-j\pi fT}$$

- ❑ Es decir:

$$|H_e(f)| = \begin{cases} 2T \cos \pi fT & \text{for } |f| < \frac{1}{2T} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

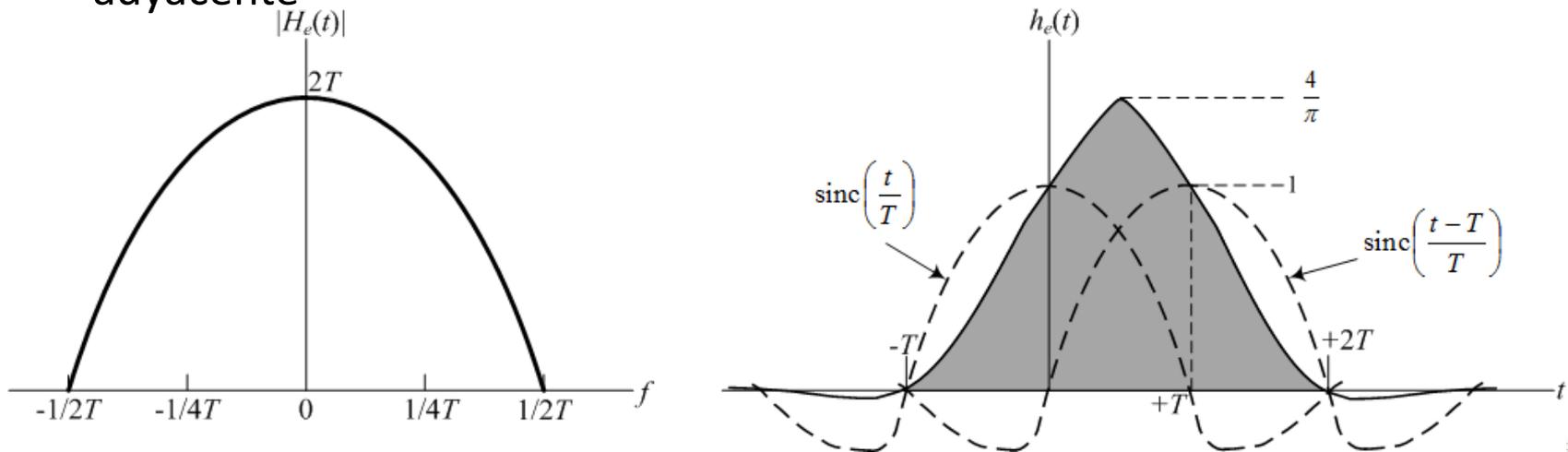


Codificación Correlativa

- ❑ Es interesante notar que la combinación de un filtro digital con un filtro ideal (no realizable), lleva a un filtro cuya función de transferencia $H_e(f)$ es de tipo coseno
- ❑ Aunque la respuesta del filtro de tipo coseno no es causal (por lo que el filtro no es realizable) se puede aproximar fácilmente con la respuesta de un filtro realizable
- ❑ La respuesta al impulso $h_e(t)$ del filtro se obtiene antitransformando y es:

$$h_e(t) = \text{sinc}\left(\frac{t}{T}\right) + \text{sinc}\left(\frac{t-T}{T}\right)$$

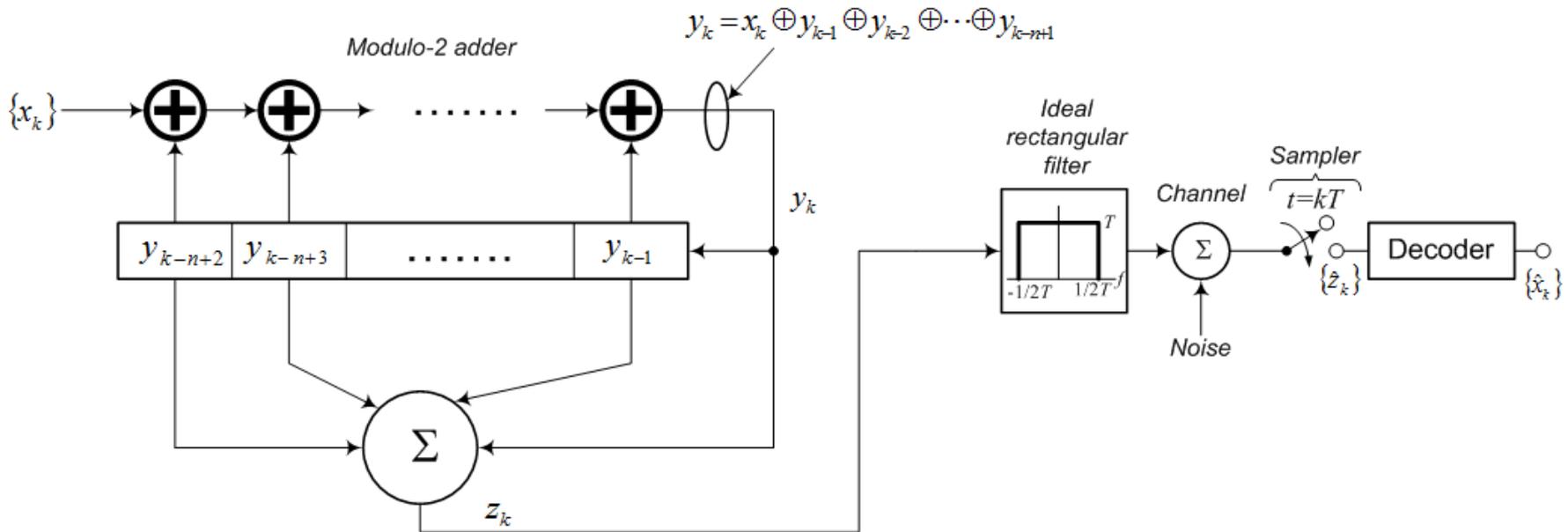
- ❑ Observe que $h_e(t)$ sólo tiene dos muestras no nulas separadas por un intervalo T segundos, lo que da origen a un ISI controlada con el bit adyacente



Codificación Correlativa

- ❑ La codificación duobinaria introduce una correlación entre pulsos adyacentes para crear una ISI controlada que puede ser fácilmente cancelada en recepción y transmitir la señal utilizando un ancho de banda inferior al teórico
- ❑ El precio a pagar por esta mejora es la necesidad de utilizar una codificación de tres niveles que complica la recepción y que requiere una potencia de transmisión superior a la de una codificación binaria para alcanzar él mismo SNR
- ❑ Para una probabilidad de error de bit dada P_B , la codificación duobinaria preciosa un SNR superior de 2.5 dB respecto al caso binario pero requiere solo $1/(1+r)$ del ancho de banda del esquema binario (r es el *roll-off* del filtro)

Codificación Correlativa



La codificación duobinaria puede extenderse a más de tres dígitos y niveles. La transformación se realiza en dos pasos : primero se genera una secuencia y_k y luego la secuencia polibinaria z_k . Para generar una codificación de n niveles (de 0 a $n-1$) hay que correlar la entrada x_k con los $n-2$ dígitos anteriores a y_k .

La ventaja de esta codificación es la redistribución de las componentes espectrales de la secuencia x_k a favor de las componentes de baja frecuencia resultando en una mejor eficiencia espectral.