

TEMA 3 - Sistemas de comunicación digital

☒ **CONTENIDOS**

- ❖ Introducción
- ❖ Muestreo de señales
 - ◆ Proceso de muestreo
 - ◆ Teorema de Nyquist
 - ◆ Espectro de una señal muestreada
- ❖ Reconstrucción de señales muestreadas
- ❖ Multiplexión de señales en el tiempo
- ❖ Modulación por codificación de pulso
- ❖ Sincronización
- ❖ Métodos de codificación

Introducción

- ☒ **Objetivos**
 - ❖ Estudiar los sistemas de comunicación digitales debido a su gran importancia dentro de la tecnología actual
- ☒ **Los sistemas comunicación digital se utilizan ampliamente debido a**
 - ❖ La utilización de computadores para el manejo de todo tipo de datos
 - ❖ La posibilidad de utilizar técnicas de procesamiento digital sobre los datos
 - ❖ La posibilidad de codificar las señales para minimizar los efectos del ruido y las interferencias
 - ❖ La utilización de dispositivos de amplificación que eliminan el ruido y regeneran la señal (amplificadores regenerativos)
- ☒ **Señales de comunicación**
 - ❖ por naturaleza son digitales
 - ◆ datos de teletipo, salidas de computadora, etc.
 - ❖ otras son analógicas
 - ◆ señales de voz, TV, telemetría, etc.

Introducción

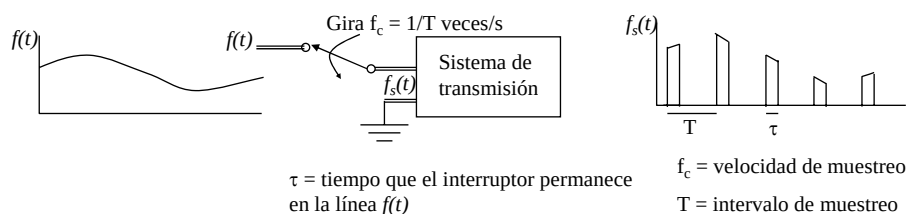
☒ Transmisión de señales analógicas por un sistema de comunicación digital

- ❖ Conversión analógico a digital (A/D)
- ❖ Pasos para la conversión A/D
 - ◆ 1- Muestreo de forma periódica
 - Consiste en tomar el valor de la señal analógica en distintos instantes de tiempo de forma periódica
 - ◆ 2- Cuantización
 - Consiste en convertir las muestras obtenidas en el primer paso en muestras de amplitud discreta

Muestreo de señales

☒ Proceso de muestreo

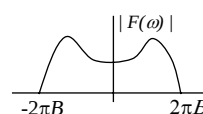
- ❖ Se muestrea la señal $f(t)$ analógica de forma periódica a una velocidad de f_c muestras por segundo obteniéndose $f_s(t)$
 - ◆ $f(t)$ analógica $\rightarrow f_s(t)$ muestreada
- ❖ $f_s(t)$ debe contener toda la información de $f(t)$ y a partir de ella ($f_s(t)$) se de poder reconstruir de forma única la señal original $f(t)$
- ❖ El proceso de muestreo se realiza
 - ◆ de forma práctica con dispositivos electrónicos conmutando la señal entre encendido y apagado a la velocidad deseada
 - ◆ de forma conceptual con un interruptor mecánico que gira a una velocidad deseada



Muestreo de señales

Teorema de Nyquist

- ❖ En el transmisor el proceso de muestreo se realiza para convertir la señal $f(t)$ a formato digital, después se transmite por el sistema digital y en receptor se desea recuperar la señal original $f(t)$
- ❖ ¿Qué valor debe tener la velocidad de muestreo para que no se pierda información en el proceso de muestreo y poder recuperar la señal original $f(t)$ a partir de las muestras $f_s(t)$?
 - ◆ Si T es grande $\Rightarrow$ hay pocas muestras
 - ◆ Si T es pequeña $\Rightarrow$ no compensa utilizar dispositivos tan caros
- ❖ Para responder a esta pregunta se utiliza el análisis de Fourier
- ❖ Se supone una señal $f(t)$ de *banda limitada* a B Hz
 - ◆ No tiene componentes de frecuencia superiores a B Hz
 - ◆ Su transformada de Fourier $F(\omega)$ es
 - ◆ Las señales físicas no tienen este corte abrupto
 - ◆ Sin embargo el contenido en frecuencia decrece rápidamente después del A.B $\Rightarrow$ aproximación no introduce mucho error
 - ◆ En la práctica se usan filtros pasabaja antes del proceso de muestreo



Muestreo de señales

Teorema de Nyquist

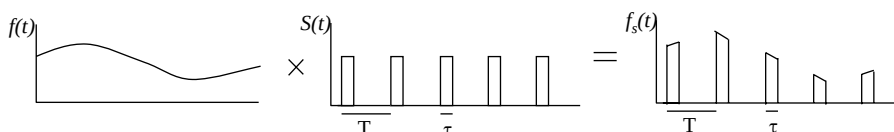
- ❖ Enunciado
 - ◆ Si una señal $f(t)$ limitada en banda a B Hz se muestrea a una velocidad de muestreo $f_c \geq 2B$ entonces no se pierde información en el proceso de muestreo y, por tanto, es posible reconstruir la señal original $f(t)$ a partir de la muestreada
 - ◆ Velocidad de Nyquist es la mínima velocidad de muestreo $2B$ veces/s
 - ◆ Intervalo de muestreo de Nyquist = $1/2B$ segundos

Espectro de una señal muestreada

- ◆ Se recurre al análisis de Fourier
- ◆ Se puede considerar que la señal muestreada es

$$f_s(t) = f(t) \cdot S(t)$$

donde $S(t)$ (*función de conmutación*) es un tren de pulsos periódicos de amplitud 1, ancho τ y periodo $T = 1/f_c$



Muestreo de señales

Espectro de una señal muestreada

- Una señal periódica $S(t)$ de periodo T se puede desarrollar en serie de Fourier de la forma

$$S(t) = \frac{a_0}{T} + \frac{2}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \cos(\omega_n t + \theta_n) \text{ con } \begin{cases} \theta_n = \arctan\left(-\frac{b_n}{a_n}\right) \\ c_n \equiv a_n - jb_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} e^{j\theta_n} \end{cases}$$

- Se había obtenido para un tren de pulsos que

$$c_n = V\tau \frac{\sin(\omega_n \tau/2)}{\omega_n \tau/2} \Rightarrow \begin{cases} c_n = a_n \\ b_n = 0 \end{cases}$$

- Luego para un tren de pulsos de amplitud 1 se tiene

$$S(t) = \frac{\tau}{T} + \frac{2}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \tau \frac{\sin(\omega_n \tau/2)}{\omega_n \tau/2} \cos(\omega_n t) \quad \text{siendo} \quad \omega_n = \frac{2\pi}{T} n$$

Muestreo de señales

Espectro de una señal muestreada

$$S(t) = \frac{\tau}{T} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi n \tau/T)}{\pi n \tau/T} \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right]$$

- Si se llama *ciclo de trabajo* a $d = \tau/T$ y como $f_c = 1/T$ se tiene

$$S(t) = d \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi n d)}{\pi n d} \cos(2\pi n f_c t) \right]$$

- Si $w_c = 2\pi f_c$ y como $f_s(t) = f(t) \cdot S(t)$ entonces se obtiene

$$f_s(t) = d \cdot f(t) + 2d \cdot f(t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi n d)}{\pi n d} \cos(n\omega_c t)$$

- Expresando $\cos(n\omega_c t)$ como suma de dos exponenciales complejas conjugadas

$$f_s(t) = d \cdot f(t) + 2d \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi n d)}{\pi n d} \frac{f(t)e^{jn\omega_c t} + f(t)e^{-jn\omega_c t}}{2}$$

Muestreo de señales

Espectro de una señal muestreada

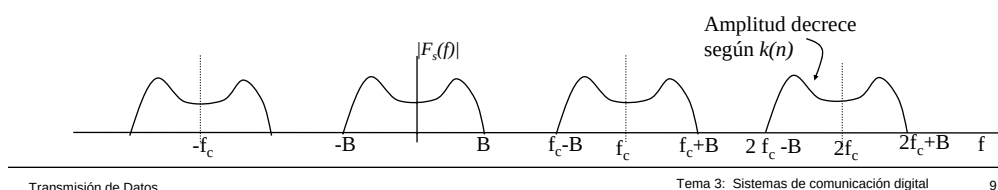
- ❖ Tomando transformadas de Fourier en la expresión previa y aplicando el teorema de desplazamiento en frecuencia se llega a

$$F_s(\omega) = d \cdot F(\omega) + d \sum_{n=1}^{\infty} \underbrace{\frac{\sin(\pi n d)}{\pi n d}}_{k(n)} [F(\omega - n\omega_c) + F(\omega + n\omega_c)]$$

$k(n)$ = término independiente del tiempo

- ❖ El espectro de la señal muestreada estará compuesto por el espectro de la función original $f(t)$, centrado en el origen, más el espectro de la función original $f(t)$ desplazado en múltiplos de la frecuencia de muestreo ω_c

- ♦ Observar que los espectros sucesivos centrados en múltiplos de ω_c están ponderados por el factor $k(n)$ y, por tanto, su amplitud decrece a medida que aumenta n



Transmisión de Datos

Tema 3: Sistemas de comunicación digital

9

Muestreo de señales

Reconstrucción de señales muestreadas

- ❖ Observando el espectro de la señal muestreada es evidente que $f(t)$ se puede recuperar a partir de $f_s(t)$ realizando un filtrado
 - ♦ Utilizando un filtro pasabaja que deje pasar $F(\omega)$ y tenga un corte muy abrupto una vez que llegue a las componentes de frecuencia del espectro centrado en f_c
- ❖ Los sistemas que transmiten las muestras de la señal $f(t)$ se denominan *sistemas muestreados* o *sistemas de modulación de pulsos*
- ❖ Para que se pueda recuperar sin distorsión $f(t)$ es necesario que la velocidad de muestreo sea suficientemente alta
- ❖ Si la frecuencia de muestreo f_c disminuye $\Rightarrow$ las componentes espectrales situadas en múltiplos de la frecuencia de muestreo empiezan a solaparse unas con otras
 - ♦ En particular la componente $F(\omega)$ se solapará con la $F(\omega - \omega_c) \Rightarrow$ resulta imposible separar $F(\omega)$ del espectro resultante $\Rightarrow$ imposible reconstruir $f(t)$ a partir de $f_s(t)$
 - ♦ Esto es debido a que las muestras en el tiempo se están tomando demasiado separadas
 - ♦ Distorsión por *interferencia de colas espectrales* o *aliasing*

Transmisión de Datos

Tema 3: Sistemas de comunicación digital

10

Muestreo de señales

☒ Demostración teorema de Nyquist

- ❖ La frecuencia de muestreo límite a la que no se produce la interferencia entre $F(w)$ y $F(w-w_c)$ se obtiene cuando

$$B = f_c - B \Rightarrow f_c = 2B \quad \text{velocidad de muestreo de Nyquist}$$

- ❖ En la práctica se muestrea a una velocidad superior a la de Nyquist para
 - ◆ asegurar la separación de las componentes de frecuencia
 - ◆ simplificar la etapa de filtrado

☒ Ejemplo: Transmisión de voz vía telefónica

- ❖ Ancho de banda = 3,1kHz
- ❖ Velocidad de muestreo de Nyquist = 6,2 kHz
- ❖ Para transmisión digital se muestrea a una velocidad de 8kHz

Multiplexión de señales en el tiempo

☒ Señal muestreada

- ❖ Los valores de las señales analógicas se toman de forma periódica en ciertos instantes
- ❖ Si la velocidad de muestreo es superior a la velocidad de Nyquist, la señal muestreada contiene la información de la señal original

☒ Sistema de *modulación por amplitud de pulsos (PAM)*

- ❖ Sistema que transmite los valores muestreados de la señal
- ❖ ¿por qué recibe esta denominación?
 - ◆ El tren de pulsos periódico $S(t)$ (*función de conmutación*) de amplitud 1, ancho τ y periodo $T=1/f_c$ se considera que es la *portadora*
 - ◆ La señal *moduladora* se correspondería con la señal analógica, que contiene la información que se desea transmitir
 - ◆ La amplitud de este tren se *modula* (o varía) de acuerdo con la información que se desea transmitir, obteniéndose la señal *modulada*

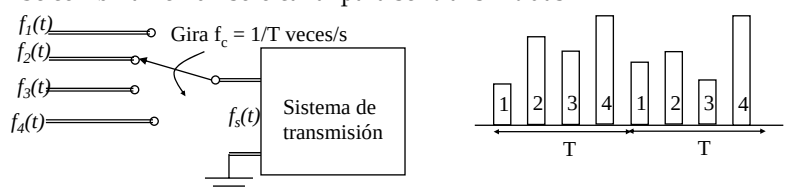
$$f_s(t) = f(t) \cdot S(t)$$

Multiplexión de señales en el tiempo

- ⊗ La mayoría de los sistemas de comunicación actuales transmiten varias señales de este tipo de forma simultánea, en lugar de sólo una
 - ❖ En el proceso de muestreo se toma una muestra muy estrecha de τ segundos cada T segundos
 - ❖ Si las muestras se transmiten por un sistema de comunicación, la mayor parte del tiempo no se está transmitiendo información por el sistema
 - ❖ Es posible transmitir otras señales de información provenientes de otras fuentes en los intervalos vacíos
- ⊗ Multiplexión por división en el tiempo
 - ❖ Transmisión de muestras de información provenientes de distintos canales de señal de forma simultánea a través de un solo sistema de con diferentes muestras de los canales, distribuidas secuencialmente en el tiempo
- ⊗ Sistemas de multiplexión en el tiempo son digitales
 - ❖ Las señales analógicas se deben convertir primero a formato digital antes de transmitirlos de forma multiplexada
 - ❖ Las señales digitales ya están preparadas para la multiplexión

Multiplexión de señales en el tiempo

- ⊗ Configuración de un sistema multiplexor temporal
 - ❖ Las diversas señales se muestrean secuencialmente
 - ❖ Se combinan en un solo canal para ser transmitidas



- ❖ Se muestra un conmutador mecánico y en la práctica se usa un conmutador electrónico
- ❖ Las señales de entrada al mux deben tener el mismo A.B o el muestreo debe realizarse a una velocidad determinada por el A.B mayor
- ❖ Si tienen A.B distintos se puede optimizar con alguna de las dos técnicas
 - ◆ tomar más muestras de las señales de mayor A.
 - ◆ combinar las señales más lentas para formar una señal analógica de mayor A.B

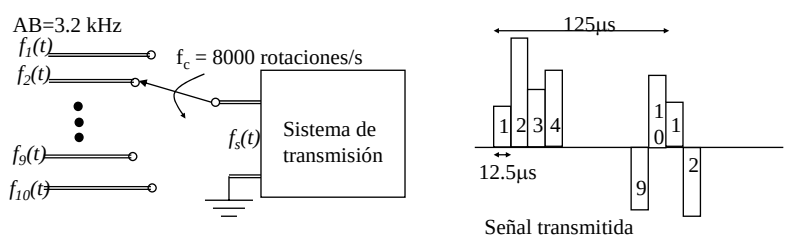
Multiplexión de señales en el tiempo

⊗ Aplicaciones

- ❖ En la radio, telefonía, teletipo, telemetría

⊗ Problemas que presenta la multiplexión temporal

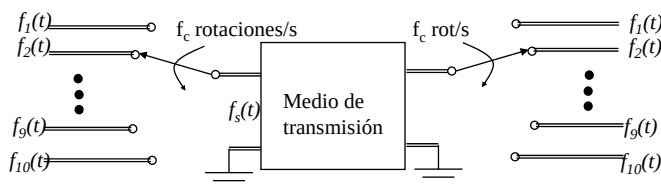
- ❖ A.B necesario para la transmisión aumenta de forma proporcional al número de señales multiplexadas
 - ◆ A.B inversamente proporcional al ancho de los pulsos transmitidos
 - ◆ Al introducir N señales el ancho de los pulsos disminuye de forma proporcional $\Rightarrow$ aumento del A.B en un factor de N
 - ◆ Ejemplo: Multiplexión de 10 canales de voz con un A.B=3.2kHz cada uno



Multiplexión de señales en el tiempo

⊗ Problemas que presenta la multiplexión temporal

- ❖ Adecuada sincronización y registros de los sucesivos pulsos en el receptor
 - ◆ En recepción los pulsos deben llegar a su destino previsto
 - ◆ En el receptor debe existir un conmutador sincronizado con el del emisor para depositar cada muestra en el canal apropiado
 - ◆ Debe realizarse independientemente de la velocidad del sistema de transmisión de datos y de la distancia entre el emisor y el receptor

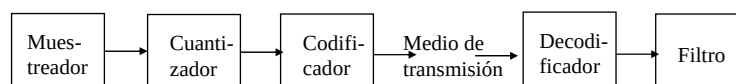


Multiplexión de señales en el tiempo

- ❖ Técnicas para sincronización y registro de las muestras en el receptor
 - ◆ Introducir pulsos de marcación especiales y distinguibles de los de información, insertados de forma periódica
 - ◆ Usar señales senoidales de frecuencia y fase conocidas que pueden extraerse en el receptor para proporcionar la información temporal
 - ◆ Utilizar mecanismos que permiten obtener información temporal a partir de los pulsos transmitidos de las señales, al promediarlos durante largos periodos de tiempo

Modulación por codificación de pulso

- ☒ Sistemas de comunicación actuales
 - ❖ Las señales analógicas muestreadas se digitalizan antes de transmitir las
 - ❖ Las señales resultantes se codifican en cualquier forma equivalente
- ☒ Sistema de *modulación por codificación de pulsos* (PCM)
 - ❖ Sistemas donde se transmiten las señales digitalizadas y codificadas
 - ❖ Los sistemas digitales binarios son el tipo más sencillo de sistemas PCM



- ☒ Ventajas de los sistemas PCM
 - ❖ Las señales pueden regenerarse durante la transmisión, ya que la información no se encuentra contenida en la amplitud (antes variable)
 - ❖ Durante todo el proceso se puede utilizar todo tipo de circuitos digitales
 - ❖ Se pueden procesar digitalmente las señales
 - ❖ El ruido y las interferencias se pueden minimizar mediante códigos

Modulación por codificación de pulso

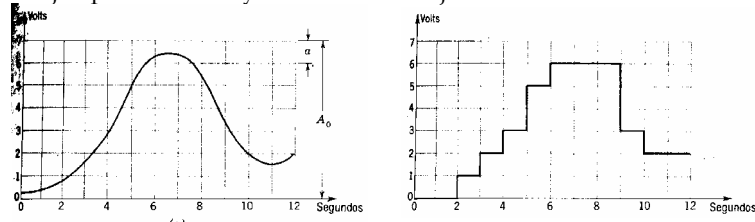
⊗ Cuantización

- ❖ Proceso de digitalización de las señales que en principio eran analógicas
- ❖ Consiste en subdividir las amplitudes de las señales en un número predeterminado de niveles discretos de amplitud
- ❖ Señales resultantes se denominan *cuantizadas*
- ❖ Este proceso produce una pérdida irrecuperable de información
 - ◆ Imposible reconstruir la señal analógica original a partir de su versión cuantizada
- ❖ El proceso de cuantización es aplicable debido a que es imposible distinguir todas las posibles amplitudes
 - ◆ El circuito detector en el receptor no es capaz de distinguir entre pequeñas variaciones en la amplitud de una señal debido al ruido que se introduce en la transmisión y en el propio receptor
 - ◆ Si se está transmitiendo voz, música e imágenes, el receptor final (oídos y ojos) presenta limitaciones en cuanto a los distintos niveles que puede distinguir

Modulación por codificación de pulso

⊗ Cuantización

- ❖ El proceso de muestreo y el de cuantización se pueden realizar por separado o de forma conjunta
- ❖ Ejemplo: muestreo y cuantización conjuntos



- ◆ Las muestras se toman cada segundo
- ◆ La amplitud $V=7$ se divide en niveles igualmente espaciados $a=1$
- ◆ Se selecciona el nivel discreto de amplitud que está más próximo
- ❖ En la práctica la separación entre niveles no es uniforme para mejorar el comportamiento del sistema frente al ruido

Modulación por codificación de pulso

- ⊗ Ruido de cuantización
 - ❖ El proceso de cuantización introduce errores durante la reconstrucción final de la señal
 - ◆ la señal original no coincide con la reconstruida a partir de la cuantizada
 - ❖ El efecto se asemeja a introducir un ruido adicional en el sistema
 - ❖ El ruido de cuantización puede reducirse
 - ◆ disminuyendo la separación entre niveles
 - ◆ aumentando el número de niveles empleados
- ⊗ Señal PAM cuantizada o PAM M -aria
 - ❖ señal obtenida después del proceso de muestreo y la cuantización
- ⊗ Codificación de señales cuantizadas
 - ❖ Cada nivel de voltaje discreto se puede codificar antes de transmitirse
 - ❖ Es normal que las señales cuantizadas se codifiquen en un grupo de pulsos binarios de igual amplitud
 - ❖ La codificación binaria se realiza utilizando la conversión entre decimales y binarios

Modulación por codificación de pulso

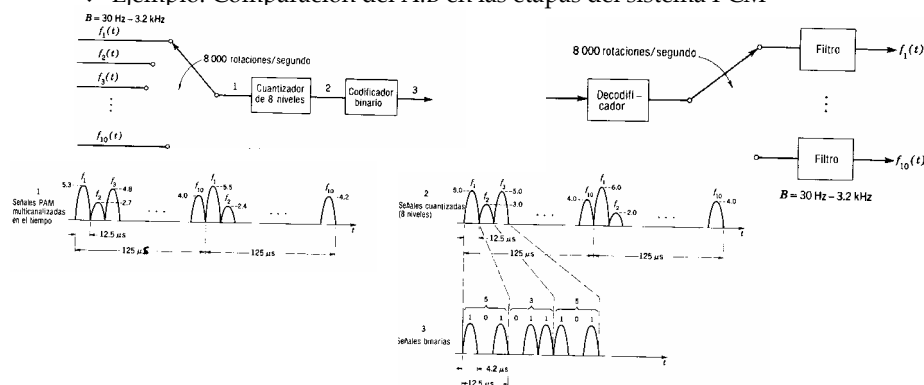
- ⊗ Codificación de señales cuantizadas
 - ❖ En general cualquier muestra cuantizada se puede codificar con un grupo de m pulsos y cada uno de ellos con n posibles alturas, tal que

$$M = n^m \text{ (codificación multinivel)}$$
 donde M es el número de niveles de cuantización
 - ◆ Ejemplo: Si $M=8$ y se utiliza un código binario $n=2 \Rightarrow m=3$
 - ◆ Ejemplo: Si $M=9$ y se utiliza un código ternario $n=3 \Rightarrow m=2$
 - ❖ La posibilidad de codificar de diferentes formas es lo que hace tan atractivos a los sistemas PCM
 - ◆ los códigos presentan unas ventajas unos frente a otros
- ⊗ Código binario es el más utilizado debido
 - ❖ Presenta una mayor inmunidad frente al ruido
 - ◆ En el receptor sólo hay que reconocer la presencia o la ausencia de pulso, no su forma ni amplitud exacta como para las señales analógicas y PAM
 - ❖ En las etapas de amplificación se regenera la señal, eliminándose el ruido
 - ❖ Codificadores y decodificadores más sencillos y baratos

Modulación por codificación de pulso

⊗ Principal inconveniente de código binario

- ❖ Mayor ancho de banda
 - ◆ en el mismo intervalo de tiempo es necesario introducir más pulsos
- ❖ Se puede utilizar el código multinivel para disminuir A.B
- ❖ Ejemplo: Comparación del A.B en las etapas del sistema PCM



Transmisión de Datos

Tema 3: Sistemas de comunicación digital

23

Conceptos referentes a la velocidad de T.D.

⊗ Velocidad de modulación

- ❖ Definición 1 según recomendación X.15 de UIT-T
 - ◆ Inversa de la medida del intervalo de tiempo nominal más corto entre dos instantes significativos sucesivos de la señal modulada
- ❖ Definición 2
 - ◆ Inversa de la duración del intervalo significativo (τ) más corto de la señal modulada

$$V_m = \frac{1}{\tau}$$

$$[V_m] = \text{baudio}$$

- ◆ 1 Baudio = 1 intervalo significativo por segundo
- ❖ Definición 3 (cuando los pulsos tienen la misma duración)
 - ◆ Número máximo de veces por unidad de tiempo que puede cambiar el estado de señalización de la línea (velocidad de señalización)
- ❖ Concepto relacionado con la línea

Transmisión de Datos

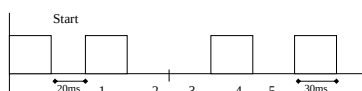
Tema 3: Sistemas de comunicación digital

24

Conceptos referentes a la velocidad de T.D.

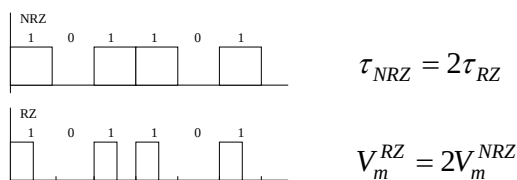
⊗ Ejemplo 1

- ❖ Transmisión típica del servicio telex que trabaja con velocidad de modulación de 50 baudios



⊗ Ejemplo 2

- ❖ Comparación respecto a la velocidad de modulación de los códigos NRZ y RZ



Conceptos referentes a la velocidad de T.D.

⊗ Velocidad de transmisión serie

- ❖ Definición 1 según recomendación R.140 del UIT-T
 - ◆ Velocidad global de transmisión medida en bits por segundo
- ❖ Definición 2
 - ◆ Número de dígitos binarios (m) transmitidos en unidad de tiempo (T) por un circuito de datos, independientemente de que los mismos lleven o no información

$$V_t = \frac{m}{T} \quad [V_t] = bps$$

- ❖ Si el número de estados significativos de la modulación es n , a cada estado le corresponden $\log_2 n$ bits de información, luego

$$V_t = \frac{\log_2 n}{T}$$

$$V_t = V_m \cdot \log_2 n$$

- ❖ Concepto relacionado con el circuito de datos

Conceptos referentes a la velocidad de T.D.

⊗ Ejemplo 1

- ❖ Si la línea tiene dos estados significativos entonces $n=2$ luego

$$V_t = \log_2 2 \cdot V_m \Rightarrow V_t = V_m$$

⊗ Ejemplo 2

- ❖ Una codificación multinivel utiliza ocho estados significativos correspondiendo a cada estado 3 bits de información

$$V_t = \log_2 8 \cdot V_m \Rightarrow V_t = 3 \cdot V_m$$

- ◆ Para velocidades de 1200, 1600 y 2400 baudios se tienen velocidades de transmisión de 3600, 4800 y 7200 bps

⊗ CONCLUSION

- ❖ Aumentando el número de estados significativos de la señal se puede aumentar la velocidad de transmisión sin aumentar la velocidad de modulación, es decir, sin disminuir el ancho de los pulsos (sin aumentar el ancho de banda de la señal)

Conceptos referentes a la velocidad de T.D.

⊗ Velocidad de transferencia de datos

- ❖ Definición según recomendación X.15 de UIT-T
 - ◆ Número medio de bits, caracteres o bloques (*num*), sólo de información, transmitidos entre dos equipos correspondientes en un sistema de T.D.

$$V_{td} = \frac{num}{T}$$

$$[V_{td}] = \frac{bytes}{s}, \quad [V_{td}] = \frac{caracteres}{s}, \quad [V_{td}] = \frac{bloques}{s}$$

⊗ Velocidad real de transferencia de datos

- ❖ Definición según recomendación V.7 de UIT-T
 - ◆ Número medio de bits por unidad de tiempo que se transmiten entre equipos de un sistema de T.D. con la condición de que el receptor los acepte como válidos
- ❖ Concepto relacionado con el enlace de datos

$$V_t > V_{td} > V_{rtd}$$

$$V_{rtd} = \varepsilon \cdot V_{tdr} \quad \text{siendo} \quad \varepsilon \equiv \text{eficiencia sistema transmisión}$$

Capacidad de transferencia de un canal

Definición

- ❖ Máxima velocidad de transmisión de bits por un canal
- ❖ Medida en bps
- ❖ Determina el tiempo de respuesta de las aplicaciones de usuario y su rendimiento

$$C = \max(v_t) = \max\left(\frac{\log_2 n}{\tau}\right) \quad \begin{array}{l} n = \text{número de estados significativos de la señal en la línea} \\ \tau = \text{duración del intervalo significativo mínimo de la señal} \end{array}$$

Dos posibilidades de hacer máxima la velocidad de transmisión

- ❖ Disminuir τ (señal con pulsos más estrechos) $\Rightarrow$ aumento ancho banda de la señal $\Rightarrow$ se necesita un canal con mayor ancho de banda para poder transmitirla
- ❖ Aumentar n número de niveles de la señal en la línea mediante
 - ◆ Aumentar potencia de señal con separación entre niveles constante
 - limitado por características físicas del canal y la fuente
 - ◆ Disminuir separación entre niveles con potencia de señal constante
 - limitado por el ruido presente en la transmisión

Capacidad de transferencia de un canal

Parámetros que determinan la capacidad de un canal

- ❖ Ancho de banda del canal
- ❖ Ruido
 - ◆ Inherente al canal por ser un conductor eléctrico
 - ◆ Originado por el movimiento constante y aleatorio de los electrones en el conductor
 - ◆ Características de aditividad
 - Ruido se superpone a la señal originando errores, distorsiones, etc.
 - ◆ Relación señal/ ruido $\left(\frac{S}{N}\right)$
 - Potencia del ruido medida respecto potencia de señal en un punto
 - Importante en un sistema de comunicaciones porque cuantifica la medida en que la señal útil supera al ruido
 - Determina el número de niveles
 - Medida en decibelios (dB)

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = 10 \lg_{10} \left(\frac{S}{N}\right)_w \quad \text{con} \quad \begin{array}{l} \left(\frac{S}{N}\right)_w \quad \text{Señal y ruido en watios} \\ \left(\frac{S}{N}\right)_{dB} \quad \text{Señal y ruido en dB} \end{array}$$

Capacidad de transferencia de un canal

⊗ Ejemplo:

- ❖ En sistema telefónico $\left(\frac{S}{N}\right)_w = 10^3$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = 10 \log_{10} 10^3 = 30 \log_{10} 10 = 30$$

⊗ Capacidad de un canal ideal

- ❖ Canal ideal con ancho de banda W y sin ruido

$$C = 2W \log_2 n$$

- ❖ Depende del nº de estados significativos de la señal en la línea
 - ◆ limitado por potencia máxima de la señal (que depende del medio de transmisión y de la fuente)
 - ◆ limitado por problemas de codificación y modulación
 - ◆ limitado por sensibilidad del receptor
- ❖ Ejemplo: transmisión digital binaria

$$C = 2W \log_2 2 = 2W \Rightarrow C = 2W$$

Capacidad de transferencia de un canal

⊗ Capacidad de un canal real

- ❖ Canal real con ancho de banda W y con ruido

$$C = W \log_2 \left(1 + \left(\frac{S}{N}\right)_w \right)$$

- ❖ Expresión propuesta por Shannon
- ❖ Proporciona un límite superior para la velocidad de transmisión por un canal de ancho de banda W con una determinada relación señal/ruido
- ❖ Ejemplo: transmisión por línea telefónica con $(S/N)=30dB$

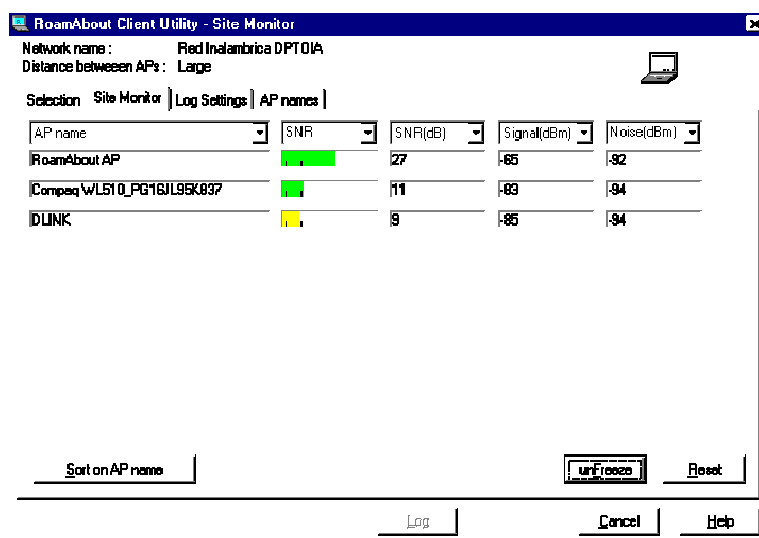
$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N}\right)_w \Rightarrow 30 = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N}\right)_w \Rightarrow \log_{10} \left(\frac{S}{N}\right)_w = 3 \Rightarrow \left(\frac{S}{N}\right)_w = 10^3$$

$$C = 3100 \log_2 (1 + 1000) = 3100 \log_2 (1001) \approx 3100 \log_2 (2^{10}) = 31k\text{bps}$$

- ❖ Se garantiza una transmisión libre de errores por una línea telefónica si la velocidad $< 31\text{kps}$
- ❖ Para aumentar C , mejor aumentar W que (S/N)

Capacidad de transferencia de un canal

☒ Ejemplo

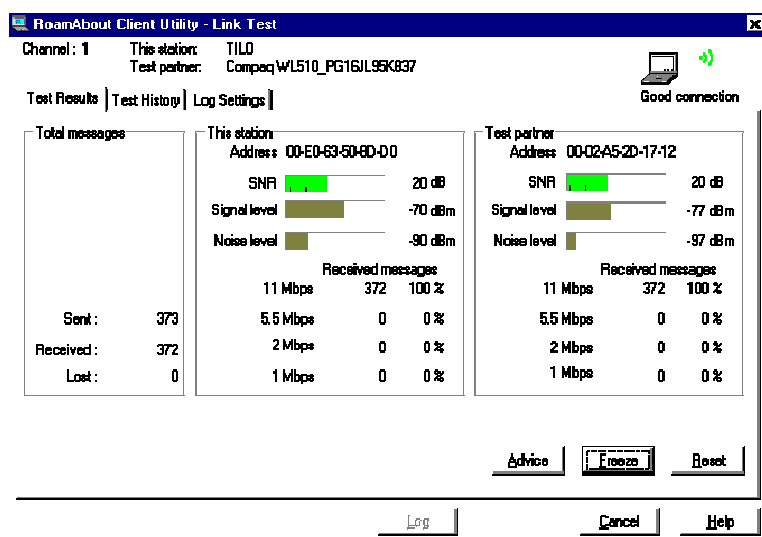


Transmisión de Datos

Tema 3: Sistemas de comunicación digital

33

Capacidad de transferencia de un canal

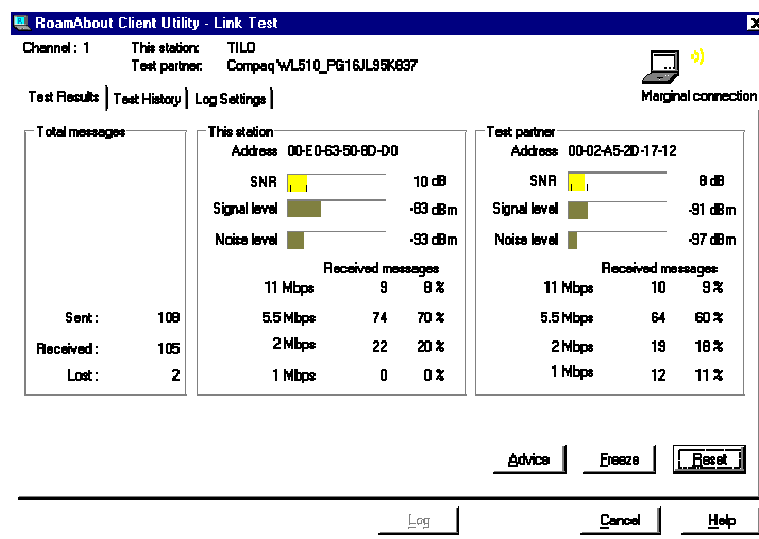


Transmisión de Datos

Tema 3: Sistemas de comunicación digital

34

Capacidad de transferencia de un canal



Sincronización

⊗ Problema

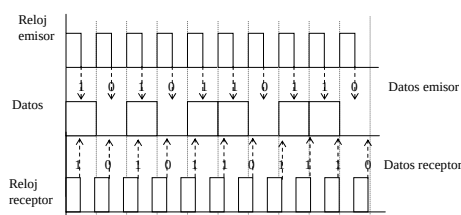
- ❖ El reloj del emisor y del receptor tienen la misma frecuencia nominal, pero no real (existe un pequeño desajuste o "jitter")

⊗ Definición

- ❖ Operación que se realiza para asegurar la coincidencia de la base de tiempos del emisor y receptor y que es esencial para que el receptor pueda reconstruir los datos enviados por el emisor
- ❖ Si el receptor no está sincronizado con el emisor puede muestrear la señal que le llega por la línea en instantes erróneos, con lo que no reconstruiría correctamente los datos

⊗ Niveles de sincronización

- ❖ de bit
- ❖ de carácter
- ❖ de bloque



Sincronización

- ☒ Sincronismo de bit
 - ❖ Determinar el instante de comienzo y el intervalo de duración de un bit
 - ❖ El receptor puede comenzar a contar un bit en el flanco de subida, en el flanco de bajada o en posiciones intermedias
 - ❖ Velocidad de muestreo de la línea debe ser mayor (normalmente 10 veces) que la velocidad de modulación para detectar las transiciones
- ☒ Sincronismo de carácter
 - ❖ Determinar cuándo comienza un carácter y cuándo acaba
 - ❖ El receptor conoce cuáles de los n bits recibidos constituyen un carácter
 - ❖ Importante en transmisiones asíncronas
- ☒ Sincronismo de bloque
 - ❖ Determinar el conjunto de caracteres que constituirán la unidad básica del tratamiento de errores
 - ❖ Forma parte del protocolo de comunicaciones
 - ❖ Bloque delimitado por caracteres ASCII (STX y ETX/ ETB)

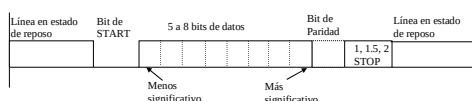
Sincronización

- ☒ Dos formas de lograr la sincronización dependiendo de que
 - ❖ los relojes del emisor y receptor sean independientes (asíncrona)
 - ❖ el reloj del receptor funcione en sincronía con la señal recibida (síncrona)
- ☒ Transmisión asíncrona
 - ❖ El bloque de caracteres se transmite a intervalos no uniformes
 - ❖ Cada carácter se trata de forma independiente para fines de sincronismo de bit o de carácter y el receptor se resincroniza al comienzo de cada carácter
- ☒ Transmisión síncrona
 - ❖ El bloque de caracteres se transmite en forma de una cadena de continua de bits
 - ❖ Receptor mantiene la sincronía con el flujo de bits de llegada hasta que recibe el bloque completo

Sincronización: transmisión asíncrona

⊗ Características

- ❖ Unidad básica de transmisión es el carácter
- ❖ No hay normas respecto a la separación temporal entre caracteres
- ❖ Los bits de información se envían delimitados por un bit de arranque (START) y uno o más bits de parada (STOP)



⊗ Orígenes

- ❖ Método de transmisión más simple y más antiguo
- ❖ Se utilizó por primera vez en las antiguas teleimpresoras mecánicas
- ❖ Surgió porque no había dispositivos de almacenamiento intermedio
 - ◆ carácter que se generaba se enviaba
- ❖ Convenios en teleimpresoras
 - ◆ Línea vacía => fluye corriente
 - ◆ Inicio de transmisión se interrumpía la corriente en la línea

Sincronización: transmisión asíncrona

⊗ Funciones del bit de START

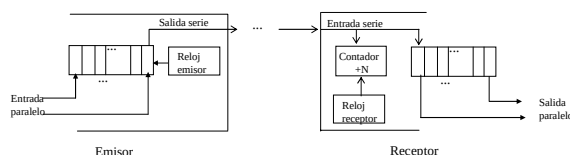
- ❖ Sincronismo de bit
 - ◆ En la transición de “1” a “0” se arranca el reloj del receptor que sirve para identificar los bits de datos que llegan a continuación
- ❖ Sincronismo de carácter
 - ◆ Cuando se recibe el bit de START se activan los mecanismos de contar
 - Primer bit significativo del carácter es el que sigue al bit de START
 - Sólo se necesita contar

⊗ Funciones del bit de STOP

- ❖ Sincronismo de bit
 - ◆ Garantizar que exista una transición del estado “1” al estado “0”
- ❖ Plazo de espera
 - ◆ En las antiguas teleimpresoras mecanismos servía para que los mecanismos volviesen a su posición de reposo
- ❖ Detección de errores
 - ◆ Después de los bits de datos el receptor tiene que recibir un “1”

Sincronización: transmisión asíncrona

⊗ Diagrama de bloques



- ❖ No se envía una señal reloj con o acompañando a los datos (asíncrona)

⊗ Ventajas e inconvenientes

- ❖ Bajo rendimiento en la transmisión debido a la proporción de bits de datos respecto a bits de sincronización
 - ◆ Rendimiento del 72% en transmisión de 2 bits de STOP, 1 de START, 1 de paridad y 7 de datos
- ❖ Apta para bajas velocidades de transmisión
- ❖ Adecuada en transmisiones con flujo de datos irregular
- ❖ Sencilla => equipamiento barato y tecnología poco sofisticada

Sincronización: transmisión síncrona

⊗ Razones para el desarrollo de la transmisión síncrona

- ❖ Aumento del rendimiento de la transmisión utilizando menor número de bits para la sincronización del emisor y el receptor
- ❖ Desarrollo de tecnologías más sofisticadas para transmitir de forma conjunta las señales de sincronismo y las de datos

⊗ Características fundamentales

- ❖ a- Unidad fundamental es el bloque
 - ◆ Los caracteres se agrupan en bloques de tamaño 128 a 1024 bytes
 - ◆ Compromiso en la determinación del tamaño del bloque
 - si es pequeño entonces disminuye el rendimiento
 - si es grande, en caso de errores es necesario retransmitir gran cantidad de caracteres con el consiguiente retardo
- ❖ b- Dentro de un bloque no puede haber separación temporal de caracteres
 - ◆ El bloque se transmite del emisor al receptor con una velocidad fija y constante, marcada por una base de tiempos común a todos los elementos que intervienen en el sistema de T.D.

Sincronización: transmisión síncrona

- ❖ c- El receptor funciona en sincronía con la señal recibida. La señal de reloj se proporciona al receptor mediante
 - ◆ Un cable exclusivo para el reloj desde el emisor al receptor, además del cable de datos. Señal de reloj generada por el ETD
 - Método caro y propenso a errores
 - Utilizado en distancias cortas e imposible utilizarlo en largas distancias sobre la Red Telefónica
 - ◆ Un ETCD que incluya el reloj en el proceso de modulación o codificación de los datos
 - Método más utilizado y unido al avance en técnicas de modulación y de codificación
 - En transmisiones sobre canales analógicos
 - modems síncronos utilizan modulación en fase para incluir la señal de reloj
 - ETCD receptor reconstruye la señal de reloj a partir de señal recibida por la línea y la entrega al ETD receptor en un conductor separados
 - En transmisiones sobre canales digitales
 - ETCD emisor envía la señal de reloj junto con los datos utilizando alguna técnica de codificación (Ejemplo: Manchester)
 - ETCD receptor obtiene ambas por separado

Sincronización: transmisión síncrona

- ☒ Sincronismo de bit
 - ❖ Mediante la señal de reloj extraída por el ETCD receptor a partir de la señal recibida por la línea (reloj + datos)
- ☒ Sincronismo de carácter
 - ❖ Un bloque de información se envía delimitado por dos grupos de caracteres SYN

SYN	BLOQUE	SYN	SYN
-----	--------	-----	-----
 - ❖ Cuando comienza una transmisión o se producen errores los receptores síncronos se ponen en modo de búsqueda de sincronismo
 - ◆ buscan uno o varios caracteres SYN para sincronizarse
 - ◆ Una vez detectados, el receptor arranca un contador y cada 8 bit pone un flag de carácter disponible
 - ❖ Con los SYN se efectúan resincronizaciones periódicas de los relojes, aunque estos permanecen estables durante un tiempo considerable (osciladores con precisión 1:100.000)

Sincronización: transmisión síncrona

☒ Ventajas e inconvenientes

- ❖ Equipos de tecnología más compleja y más costosos
 - ◆ ETCD deben codificar la señal de reloj con los datos
- ❖ Alto rendimiento en la transmisión
 - ◆ Bloques de 1024 byte con 10 bytes de cabecera y fin
=> rendimiento 99%
 - ◆ Mejor aprovechamiento de la línea
- ❖ Transmisiones de alta velocidad

