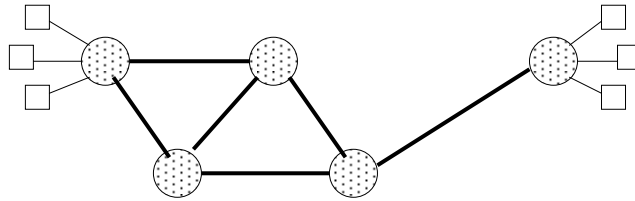


Tema 2

La Capa Física - 1



2.1 Transmisión de datos

- Conceptos de transmisión de señales
- Teorema de Nyquist
- Relación Señal/Ruido : Shannon
- Sincronismo
- Transmisión analógica/digital
- Técnicas de codificación
- Técnicas de modulación
- Técnicas de digitalización
- Multiplexación

Transmisión de señales

- **Señal:** cambio en una propiedad física del medio, que se propaga a través de éste.
- **Retardo de propagación** t_{prop} : La propagación de una señal a través de un medio no es instantánea, depende de la velocidad de propagación para ese medio y de su longitud.

$$t_{\text{prop}} (\text{s}) = \text{long} (\text{m}) / \text{vel}_{\text{prop}} (\text{m/s})$$

- **Modulación de la señal:** Acción de cambiar la señal
- **Frecuencia de modulación** (F_{mod}): Frecuencia con la que se modifica la señal, se mide en **baudios (cambios por segundo, físicamente s⁻¹)**.

Transmisión de señales

- **Velocidad de transmisión de datos** : Depende de F_{mod} y se mide en **bits por segundo (bps)**:

$$V_{\text{datos}} (\text{bps}) = F_{\text{mod}} (\text{baudios}) * B$$

Con $B = \text{n}^\circ$ de bits transmitidos por cada cambio (“bits por baudio”)

- **B depende del número de estados diferentes** y reconocibles que puede adoptar la señal: si a cada estado se le asigna una codificación binaria distinta, entonces:

$$B = \log_2 N$$

Con $N = \text{n}^\circ$ de estados diferentes de la señal

- **Por tanto, la velocidad de transmisión de datos sería:**

$$V_{\text{datos}} (\text{bps}) = F_{\text{mod}} * \log_2 N$$

Transmisión de señales

- Tipos físicos de señales usados para transmisión de información:
 - Vibraciones materia (gas, líquido, sólido: sonido)
 - Eléctricas (medio conductor: niveles de tensión)
 - Ópticas (medio transparente: pulsos de luz)
 - Ondas electromagnéticas (espacio: microondas, etc.)
- Representación de las señales:
 - Dominio del tiempo
 - Dominio de la frecuencia

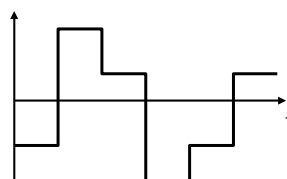
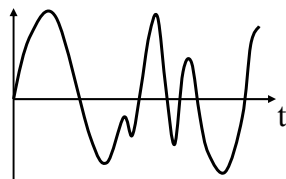
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

5

Dominio del tiempo

- **Forma de onda:** representa la forma en que evolucionan las señales a lo largo del tiempo: Amplitud vs. Tiempo.
- Señales **analógicas/digitales**:
 - Analógicas: varían en el tiempo de forma continua
 - Digitales: varían en el tiempo de forma discreta



noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

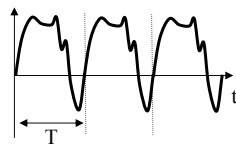
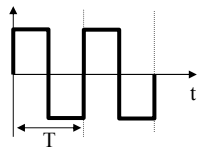
6

Dominio del tiempo (2)

- Señales **periódicas**: señal cuya forma de onda se repite a intervalos de tiempo fijo (periodo T):

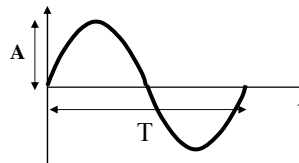
$$s(t + T) = s(t), \forall t \in \mathbb{R}; T > 0$$

- **Frecuencia fundamental** $f = 1/T$ (en Hz, Hertzios, o ciclos por segundo, físicamente s^{-1})



- Ejemplo simple de señal periódica: onda sinusoidal.

$$s(t) = A \sin(2\pi(1/T)t)$$



noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

7

Dominio del tiempo (3)

- Serie de Fourier: Una señal periódica se puede representar como una suma de señales senoidales (“armónicos”).

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi f n t) + b_n \cos(2\pi f n t)$$

- Cada armónico “n” tiene:

- Una frecuencia múltiplo de la fundamental, f.
- Una amplitud a_n o b_n específica que determina cuánto aporta a la forma de onda de la señal.

(El seno y el coseno representan la misma función, pero desfasada 90°)

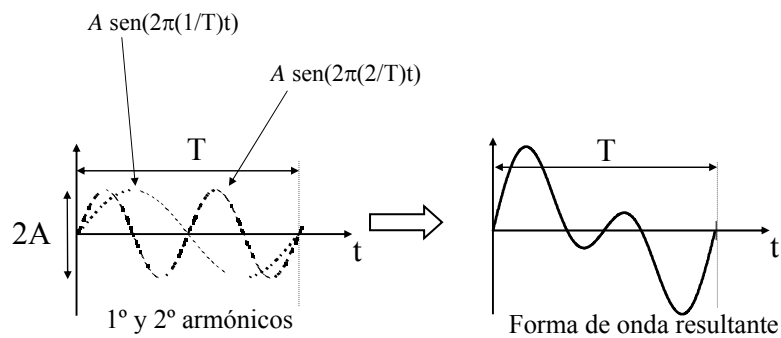
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

8

Dominio del tiempo (4)

- Ejemplo: Señal formada por los dos primeros armónicos (en este ejemplo con la misma amplitud A).



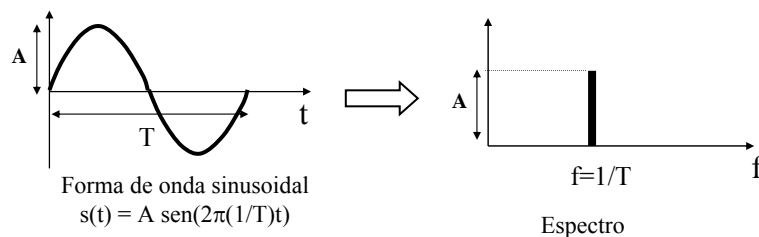
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

9

Dominio de la frecuencia

- Forma alternativa de representación de las señales: Amplitud vs. Frecuencia.
- **Espectro de la señal:** Cada señal en un instante t está formada por la suma de un **conjunto de componentes sinusoidales**, cada una con frecuencia f .
 - Espectro más simple: el de una sinusoidal:



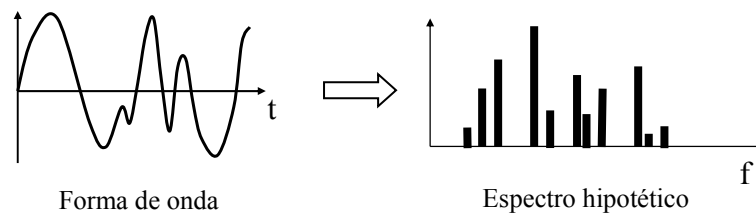
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

10

Dominio de la frecuencia

- **Forma alternativa de representación de las señales.**
- **Espectro de la señal:** Cada señal en un instante t está formada por la suma de un **conjunto de componentes senoidales**, cada una con frecuencia f .



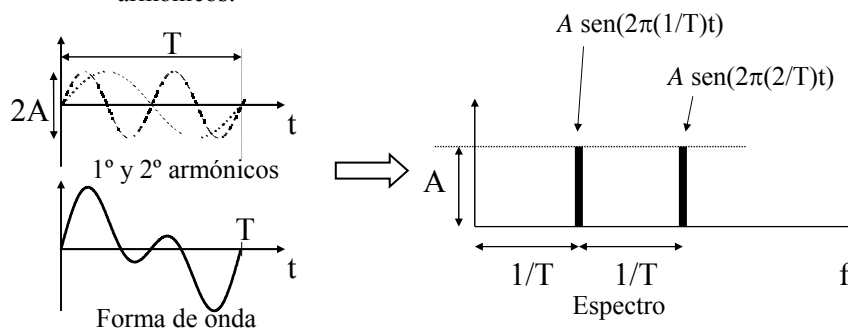
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

11

Dominio de la frecuencia (2)

- **Señales periódicas:** tienen un **espectro discreto**, formada por la secuencia de armónicos de la Serie de Fourier:
 - Cada armónico es una componente senoidal pura con frecuencia múltiplo de la fundamental, $1/T$.
 - Para el ejemplo anterior, de una señal formada por la suma de dos armónicos:



noviembre de 2005

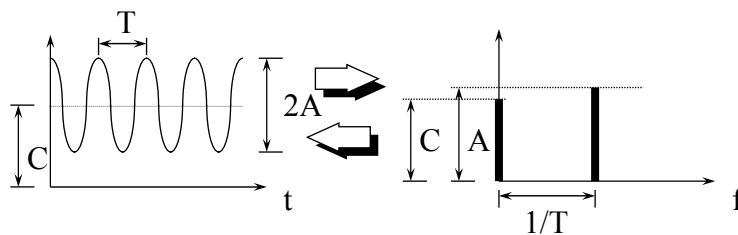
Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

12

Dominio de la frecuencia (3)

- **Componente continua** de una señal (DC): se traduce en una componente de frecuencia cero.
 - Si existe componente DC, la amplitud media en el dominio del tiempo será distinta de cero:

$$s(t) = B \sin[2\pi(1/T)t + \phi_0] + C$$



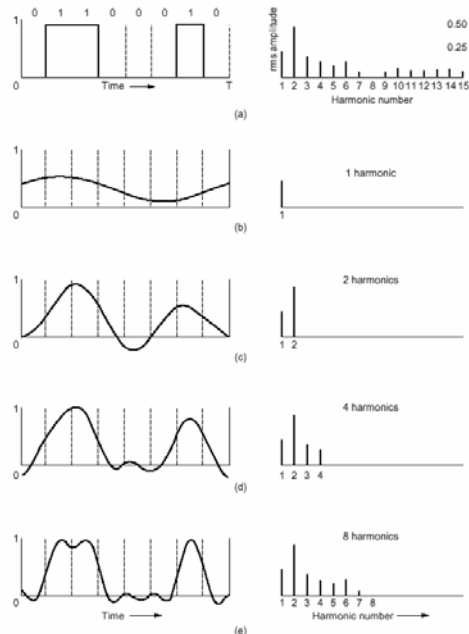
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

13

Ejemplo:

- Reconstrucción de una señal periódica digital en el receptor.
- La calidad de la reconstrucción varía dependiendo del número de armónicos que consideremos.



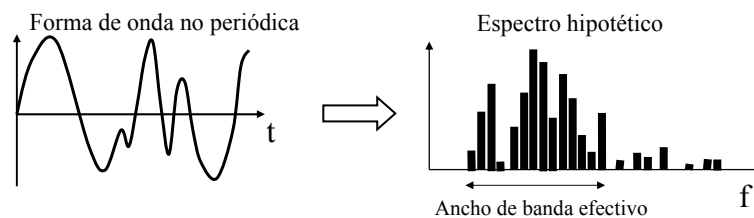
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

14

Dominio de la frecuencia (4)

- **Señales no periódicas:** presentan un **espectro continuo**, obtenible mediante transformada de Fourier.
 - **Ancho de banda efectivo** de la señal: parte de su espectro (“espectro efectivo”) en la que se concentra la mayor parte de la energía de la señal.
 - Señales más interesantes:
 - Las que tienen menos componentes de altas frecuencias en su espectro.
 - Su ancho de banda efectivo es más reducido: se transmite más fácilmente



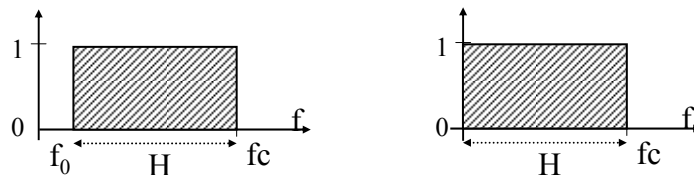
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

15

Canales

- **Los canales o medios de transmisión** se comportan como **filtros**, dejando pasar sólo un rango de frecuencias restringido: ancho de banda H del canal.



- $H = f_c - f_0$
- A menudo el canal se comporta como un filtro pasabajo ($f_0 = 0$ y $f_c =$ frecuencia de corte, $H = f_c$)
- Un canal es apropiado para transmitir una señal si deja pasar el ancho de banda efectivo de la misma.

noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

16

Teorema de Nyquist

- Relaciona la frecuencia de modulación con el ancho de banda.
- El ancho de banda H mínimo necesario para poder transmitir **n** baudios (cambios por segundo) es:

$$\mathbf{H_n = n/2 \text{ (Hz)}}$$
, con H_n = Frecuencia de Nyquist.

- Puede expresarse al revés: la frecuencia máxima teórica de modulación (en baudios) para un canal ideal de ancho de banda H es:

$$\mathbf{n_{max} = 2H \text{ (baudios)}}$$
, o “dos baudios por hertzio”

Teorema de Nyquist (2)

- En la práctica conviene usar un canal de al menos un ancho de banda doble que la frecuencia de Nyquist:

$$\mathbf{H = 2H_n \text{ (Hz)}}$$
 (o “un baudio por hertzio”).

- Motivos de esta “regla”:
 - Así se consigue transmitir la mayor parte del espectro efectivo de la señal, y
 - Se consigue una tasa de error aceptable ($BER < 10^{-10}$).

Teorema de Nyquist (3)

- El Teorema de Nyquist no pone en realidad un límite a la capacidad teórica de un canal, ya que usando N estados o niveles podemos transmitir **varios bits por baudio** (p.e., N=8 permite 3 bits/baudio)
- Por tanto, la **velocidad máxima teórica** de transmisión de datos en un canal ideal de ancho de banda H sería:

$$V_{\max} = 2H * \log_2 N \quad (\text{bps})$$

Con:

- N = n° de estados diferentes que puede adoptar la señal
- $\log_2 N$ = n° de bits por baudio.
- Sin embargo, en la práctica no podemos aumentar ilimitadamente el número de estados N en un canal real.

noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

19

Problemas de un canal real

- **Ruido:** presencia de una señal espúrea, distinta a la transmitida, que se superpone a ella.
 - Ruido térmico (“ruido blanco”). Es el más importante.
 - Distribuido uniformemente por todo el espectro: la cantidad de ruido presente en un ancho de banda H es proporcional a H y a la temperatura.
 - Unidades de W/Hz (“densidad de potencia del ruido”)
 - Otros tipos de ruido:
 - Diafonía (acoplamiento entre medios en telefonía)
 - Intermodulación (entre frecuencias diferentes)
 - Impulsivo (picos)
 - De cuantización (en conversiones Digital-Analógico)

noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

20

Problemas de un canal real (2)

- **SNR = Relación Señal/Ruido:** cociente de las potencias de la señal y del ruido (también “S/N”).
 - El valor de SNR se suele proporcionar en escala logarítmica (en unidades de **decibelios, dB**):
$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 * \log_{10}(\text{SNR}) \quad (\text{dB})$$

(Ejemplo: $\text{SNR}_{\text{dB}} = 30 \text{ dB} \rightarrow \text{SNR} = 1000$)
 - Cuanto mayor sea SNR, menor será el efecto distorsionador del ruido sobre la señal original
 - Necesitamos un valor mínimo de SNR en el receptor para interpretar correctamente la señal.

Problemas de un canal real (3)

- **Atenuación:** pérdida de potencia de la señal con la distancia.
 - Disminución en dB de la SNR por unidad de longitud (típicamente 100m. ó 1km.).
 - Limita la longitud máxima de un canal.
- **Distorsión:** deformación de la forma de onda con la distancia.
 - **Por atenuación:** la atenuación depende de la frecuencia, luego afecta de forma distinta a cada componente del espectro.
 - **Por retardo:** el retardo de propagación también depende de la frecuencia.
 - Limita la longitud máxima del canal y/o la velocidad máxima de transmisión: Transmisión a mayores velocidades a distancias más cortas, o al revés.

Teorema de Shannon

- Capacidad máxima de transmisión de datos de un **canal real**, con **ruido**, de ancho de banda H:

$$V_{\max} = H * \log_2(1+\text{SNR}) \quad (\text{bps})$$

con SNR = Relación Señal/Ruido.

- Tiene en cuenta que la cantidad de ruido aumenta al hacerlo el ancho de banda usado.
- El teorema de Shannon acota en la práctica el número de estados posibles de la señal que podemos utilizar en el teorema de Nyquist.

Sincronismo

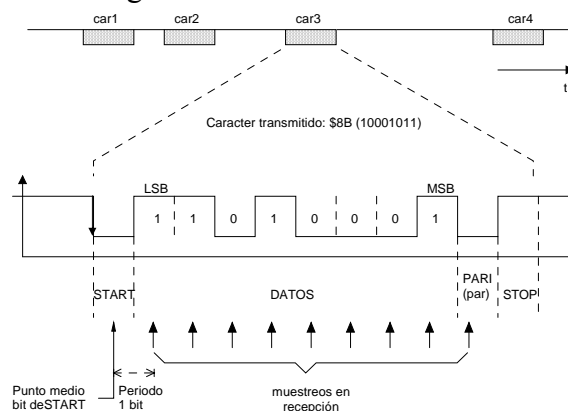
- Sincronismo: forma de garantizar que el receptor pueda detectar la ocurrencia de sucesos clave de la comunicación.
- Tres clases de sincronismo:
 - Sincronismo de bit
 - Sincronismo de byte o caracter
 - Sincronismo de trama o bloque

Sincronismo de bit

- Método usado para que el receptor R calcule correctamente cada intervalo de bit en la señal procedente del emisor E.
- Dos alternativas:
 - **Transmisión asíncrona:** uso de señales de reloj diferentes en E y R, pero ajustadas a la misma frecuencia.
 - Pérdida de sincronización después de unos pocos bits: adecuada sólo para la transmisión de caracteres.
 - **Transmisión síncrona:** uso de la misma señal de reloj.
 - Misma señal física en E y R: distancias muy cortas.
 - Señal de reloj incorporada a los datos en forma de **transiciones: codificaciones que garanticen una transición cada uno o varios bits.**
 - No se pierde la sincronización nunca: orientada a la transmisión de tramas de miles de bits.

Sincronismo de carácter

- Usado en transmisión asíncrona (orientada a carácter):
 - Detección del comienzo de un nuevo carácter mediante transición negativa: bit de “start”



Sincronismo de trama o bloque

- Usado en transmisión síncrona (orientada al bloque):
 - Detección del comienzo de una nueva trama mediante código de sincronización reservado:
 - a) BISYNC: varios caracteres reservados “SYNC” consecutivos.
 - b) HDLC: byte reservado denominado “flag” (“01111110”)

SYNC	SYNC	SOH	Cabecera	STX	Bloque datos	ETX	Checksum
------	------	-----	----------	-----	--------------	-----	----------

a)

01111110	Dirección	Control	Bloque datos	Checksum	01111110
----------	-----------	---------	--------------	----------	----------

b)

noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

27

Analógico vs Digital

Datos -> Tr. Señales -> Medio -> Rec. Señales -> Datos

- Datos analógicos/señales analógicas:
 - Teléfono, radio o videodifusión tradicionales.
- Datos analógicos/señales digitales:
 - **Digitalización** previa de los datos analógicos (códecs de audio y video: PCM, MPEG...).
- Datos digitales/señales digitales:
 - **Codificación** de los bits de datos en señales digitales.
- Datos digitales/señales analógicas:
 - **Modulación** de una señal analógica: onda portadora (modificación de su amplitud, frecuencia, fase).

(OJO: No es cierto digital=moderno, analógico=anticuado)

noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

28

Técnicas de codificación

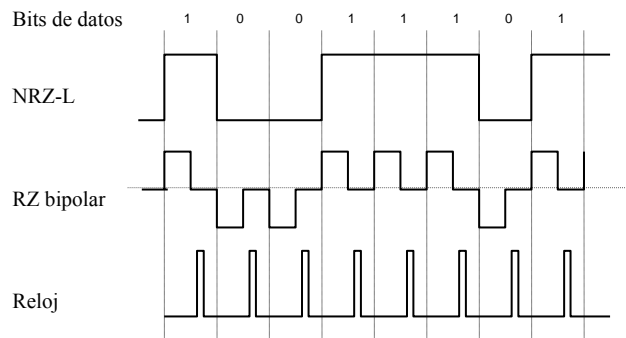
- Codificaciones de línea (para generación de la forma de onda de la señal):
 - Basadas en:
 - Niveles: El nivel de la señal determina el valor del bit.
 - Transiciones: El valor del bit va asociado a una transición.
 - De acuerdo a la naturaleza de la señal:
 - Unipolar: niveles 0 y +V (tiene componente DC)
 - Polar: niveles -V y +V.
 - Bipolar: niveles -V, 0 y +V.
 - De acuerdo al número de niveles usados:
 - Binaria, ternaria, cuaternaria...
 - Diferencial:
 - La señal depende del nivel en el bit o baudio anterior.

Técnicas de codificación (2)

- Codificaciones basadas en niveles:
 - NRZ-L (Non Return to Zero-Level): Sin retorno a cero.
 - Señal unipolar (0, V) o polar (-V, V).
 - No adecuada para sincronismo de bit: no hay garantía de transiciones.
 - RZ (Return to Zero) bipolar: Con retorno a cero antes de finalizar el periodo del bit.
 - Señal ternaria, tres niveles (-V, 0, +V)
 - Garantizadas dos transiciones por bit.

Técnicas de codificación (3)

– Ejemplos codificaciones por niveles:



noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

31

Técnicas de codificación (4)

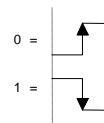
• Codificaciones basadas en transiciones:

– NRZ-I (Non Return to Zero-Inversion):

- Es un código diferencial
 - 0: transición al principio del bit.
 - 1: no transición al principio del bit.
- No hay transiciones garantizadas para sincronismo de bit.

– Manchester (usada en 802.3):

- Transición para sincronismo siempre en medio del bit.
- Valor del bit: sentido de la transición del medio del bit:
 - 0: transición positiva (LH)
 - 1: transición negativa (HL)
 - Violaciones de código: LL o HH.
- Código “bifase”: dos transiciones por bit.



noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

32

Técnicas de codificación (5)

- Manchester diferencial (usada en 802.5):
 - Separa la transición de sincronismo (medio del bit) del valor:
 - 0: presencia de transición al principio del bit
 - 1: ausencia de transición al principio del bit
- AMI (Alternate Mark Insertion):
 - Señal ternaria y bipolar (-V, 0, +V)
 - 0: nivel cero
 - 1: transición de signo opuesto a la última.
 - Técnicas de sustitución de ceros consecutivos por código especial:
 - » B8ZS, AMI que sustituye grupos de 8 ceros.
 - » HDB3, AMI que sustituye grupos de 4 ceros.
- MLT-3 (Multi-Level Transition):
 - Señal ternaria y bipolar (-V, 0, +V)
 - 0: no hay transición
 - 1: hay transición al nivel contiguo (va oscilando entre los tres niveles posibles: -V, 0, +V, 0, -V, 0, etc...)

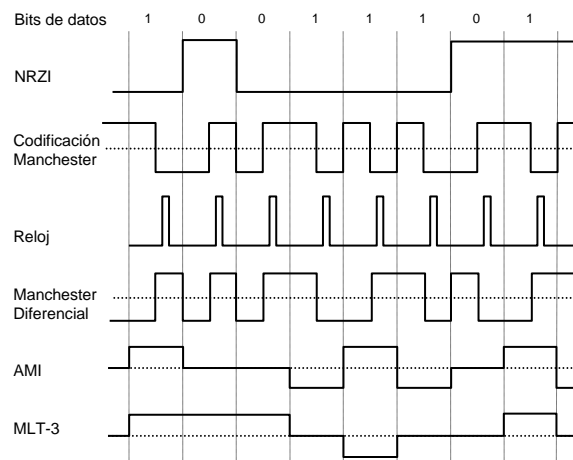
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

33

Técnicas de codificación (6)

- Ejemplos codificaciones por transiciones:



noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

34

Técnicas de codificación (7)

- Codificaciones de bloque:
 - Se codifican grupos de bits conjuntamente, y a cada grupo se le asigna un código (grupo de símbolos), que es el que realmente se transmite.
 - Necesitan una codificación final de línea (suele ser NRZL o NRZI) para la transmisión del código.
 - Permiten eludir las codificaciones con grupos de bits problemáticos para el sincronismo (p.e., sin transiciones)
 - “**nBmS**”:
 - n = nº de bits que se codifican conjuntamente
 - B=Indica que los datos de partida son binarios
 - m = nº de símbolos que se corresponden con los n bits.
 - S=tipo de señal usada para codificar los m símbolos (B=binaria, T=ternaria, Q=cuaternaria)

noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

35

Técnicas de codificación (8)

- Ejemplos de codificaciones de bloque: 4B5B, 4B3T, 2B1Q, PAM5
- 4B5B
 - Usada en FDDI y Fast Ethernet, en combinación con NRZI.
 - Objetivo:
 - Garantizar en la cadena de símbolos al menos una transición de sincronismo cada 4 bits.
 - Se elimina la posibilidad de transmitir más de tres 0's consecutivos.
 - Grupo de 4 bits de datos -> código o grupo de 5 símbolos binarios

noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

36

Técnicas de codificación (9)

- Códigos de símbolos para 4B5B:

Códigos de datos

Datos	Código	Datos	Código
0000	11110	1000	10010
0001	01001	1001	10011
0010	10100	1010	10110
0011	10101	1011	10111
0100	01010	1100	11010
0101	01011	1101	11011
0110	01110	1110	11100
0111	01111	1111	11101

Códigos de control

Datos	Código
Q (Quiet)	00000
I (Idle)	11111
H (Halt)	00100
J (start delimiter)	11000
K (start delimiter)	10001
T (end delimiter)	01101
S (Set)	11001
R (Reset)	00111

noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

37

Técnicas de codificación (10)

- **Balance de DC:** elección de las combinaciones no sólo para sincronismo, sino también para equilibrado de la tensión de la línea (señales polares y bipolares).
- **Rendimiento:** $R = 100 * \text{Bits de datos} / \text{Baudio}$
 - NRZI, NRZL, AMI, MLT3: 100%
 - Manchester, Manchester Diferencial: 50%
 - 4B5B: 80%
 - 8B6T: 133%
 - 2B1Q, PAM5: 200%
- **“Scrambling”:** mezclado de los bits para convertir la secuencia original en una pseudoaleatoria, y minimizar la probabilidad de secuencias de 0's o 1's consecutivos.
- **Consideraciones espectrales:** mejor cuanto menos componentes de alta frecuencia tenga la señal (p.e., MLT3 o AMI mejores que Manchester)

noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

38

Técnicas de modulación

- **Modulación:** Modificación de las propiedades de una señal ondulatoria: la **onda portadora**.
- Características de una señal ondulatoria senoidal:

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi_0)$$

- Amplitud máxima: A
- Frecuencia: $f = 1/T$
- Fase: $\phi = (2\pi ft + \phi_0) = (2\pi t/T + \phi_0) \rightarrow$ Es la responsable de la evolución en el tiempo de la señal.

noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

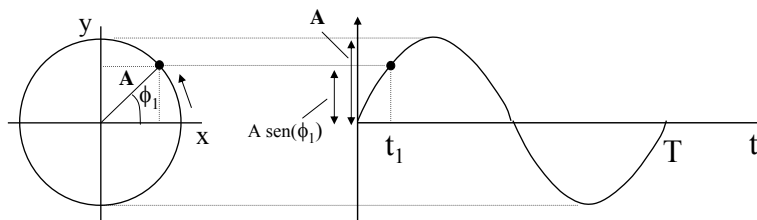
39

Técnicas de modulación (2)

- Visión de la onda senoidal como proyección de un movimiento circular uniforme:

$$y(t) = A \sin(2\pi ft + \phi_0), \quad x(t) = A \cos(2\pi ft + \phi_0)$$

- Radio: Amplitud máxima A
- Velocidad angular: $2\pi f = 2\pi/T$
- Fase: $\phi_1 = 2\pi t_1/T \rightarrow$ corresponde al ángulo girado hasta el instante t_1 (suponemos aquí $\phi_0 = 0$).



noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

40

Técnicas de modulación (3)

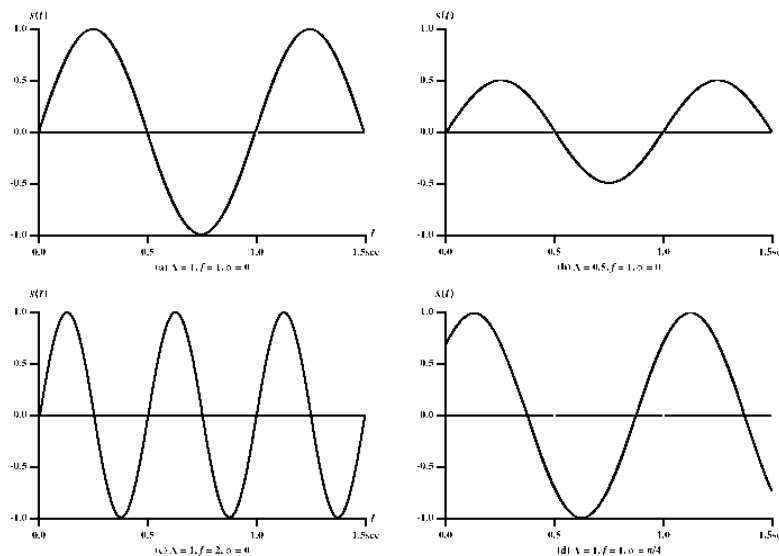
- Posibilidades de variar los diferentes parámetros con una frecuencia de modulación F_{mod} (distinta de la frecuencia original de la onda portadora, f_p):
 - A y f (o T) permanecen estables: pueden sustituirse por otros valores.
 - ϕ va variando con el tiempo t: puede incrementarse su valor en $\Delta\phi$.
- Ejemplos de variaciones (transparencia siguiente):
 - (a) $A = 1, f = 1 \text{ Hz}, \phi_0 = 0$; por tanto $T = 1 \text{ s}$
 - (b) Reducción de la amplitud máxima; $A=0.5$
 - (c) Aumento de la frecuencia; $f = 2$, luego $T = \frac{1}{2}$
 - (d) $\phi_0 = \pi/4$ radianes (45 grados)
(nota: 2π radianes = $360^\circ = 1$ periodo T completo)

noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

41

Técnicas de modulación (4)



noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

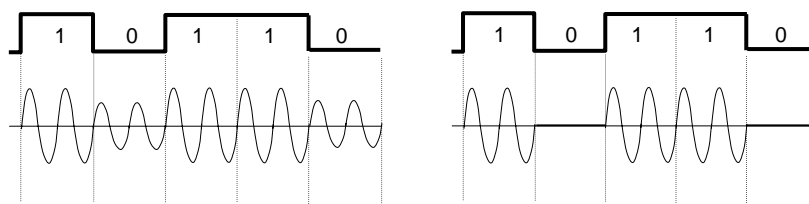
42

Técnicas de modulación (5)

- ASK (Amplitude Shift Keying): Modulación por desplazamiento de la amplitud (se conservan la fase y la frecuencia)

– Ejemplo:

- Dos amplitudes, una para el 0 y otra para el 1 (una de ellas podría ser cero).
- Frecuencia de modulación F_{mod} mitad que f_p , la frecuencia de la onda portadora



Problema: muy susceptible a la atenuación

noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

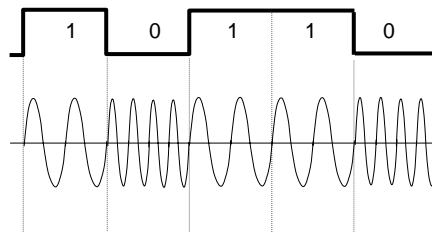
43

Técnicas de modulación (6)

- FSK (Frequency Shift Keying): Modulación por desplazamiento de la frecuencia de la portadora (se conservan la amplitud y la fase)

– Ejemplo:

- Dos frecuencias de portadora, una para el 0 ($4 \cdot F_{\text{mod}}$) y otra para el 1 ($2 \cdot F_{\text{mod}}$). En un caso real la variación no sería tan grande.



Problema: número de frecuencias alternativas reducido (2, 4), luego permite transmitir pocos bits por baudio.

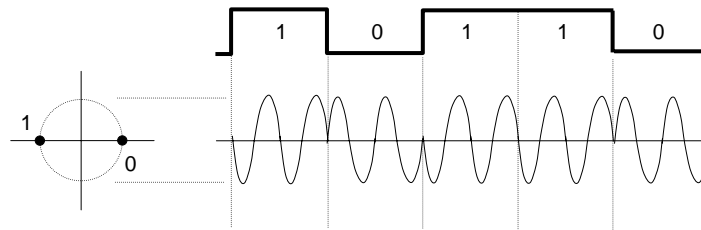
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

44

Técnicas de modulación (7)

- PSK (Phase Shift Keying): Modulación por desplazamiento de la fase al valor asignado al nuevo estado.
 - Muy robusta frente a ruidos y distorsiones
 - Permite muchos estados diferentes (16, 32, etc).
 - Ejemplo simple:
 - Dos fases, $\phi_0 = 0^\circ$, $\phi_1 = 180^\circ$
 - $F_{\text{mod}} = f_p/2$



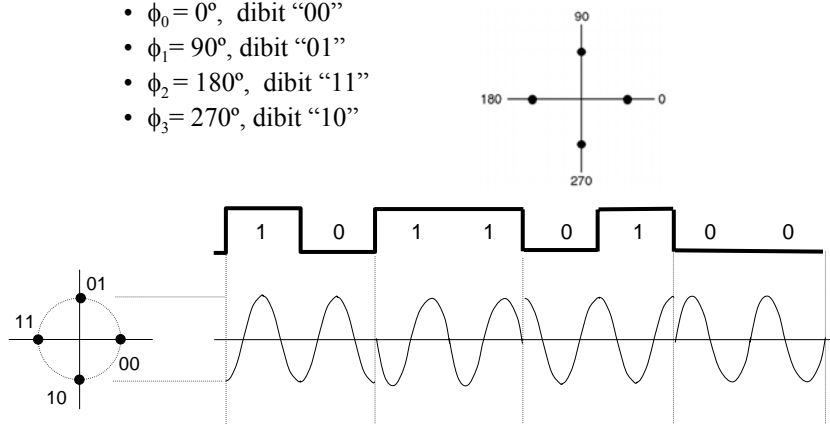
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

45

Técnicas de modulación (8)

- Ejemplo: 4-PSK, “constelación” de 4 estados
 - Cada estado se asigna a un “dibit” (2 bits de datos)
 - $\phi_0 = 0^\circ$, dibit “00”
 - $\phi_1 = 90^\circ$, dibit “01”
 - $\phi_2 = 180^\circ$, dibit “11”
 - $\phi_3 = 270^\circ$, dibit “10”



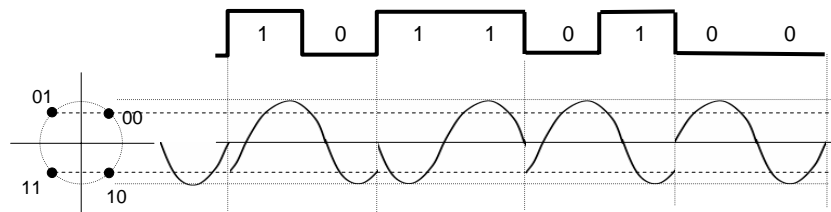
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

46

Técnicas de modulación (9)

- **PSK Diferencial (DPSK):** El estado de la constelación representa un incremento de la fase, con respecto al valor de la fase de la portadora en el instante de modulación: ϕ' (después de la modulación) = $\phi + \Delta\phi$
 - Depende del estado anterior de la portadora.
- 4-DPSK: “constelación” de 4 estados. Cada estado (que ahora representa un incremento de la fase) se asigna igualmente a un “dibit” (2 bits de datos). Suponemos $F_{\text{mod}} = f_p$.
 - $\Delta\phi_0 = 45^\circ$, dibit “00”
 - $\Delta\phi_1 = 135^\circ$, dibit “01”
 - $\Delta\phi_2 = 225^\circ$, dibit “11”
 - $\Delta\phi_3 = 315^\circ$, dibit “10”



noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

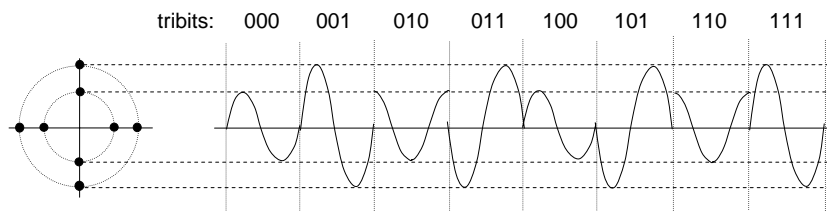
47

Técnicas de modulación (10)

- **QAM (Modulación en Amplitud de Cuadratura):** Modificación simultánea de la amplitud y la fase.
 - Combinación de ASK y PSK/DPSK.
- Ejemplo: 2 amplitudes y 4 fases (DPSK), $F_{\text{mod}} = f_p$:

$\Delta\phi_0 = 0^\circ$, $\Delta\phi_1 = 90^\circ$, $\Delta\phi_2 = 180^\circ$, $\Delta\phi_3 = 270^\circ$
 $\bullet A_0$, $\bullet A_1$
 -> Constelación de 8 estados (3 bits/baudio)

$\bullet A_0/\phi_0$ = tribit “000”
 $\bullet A_1/\phi_0$ = tribit “001”
 $\bullet A_0/\phi_1$ = tribit “010”
 $\bullet A_1/\phi_1$ = tribit “011”
 ...
 $\bullet A_1/\phi_3$ = tribit “111”



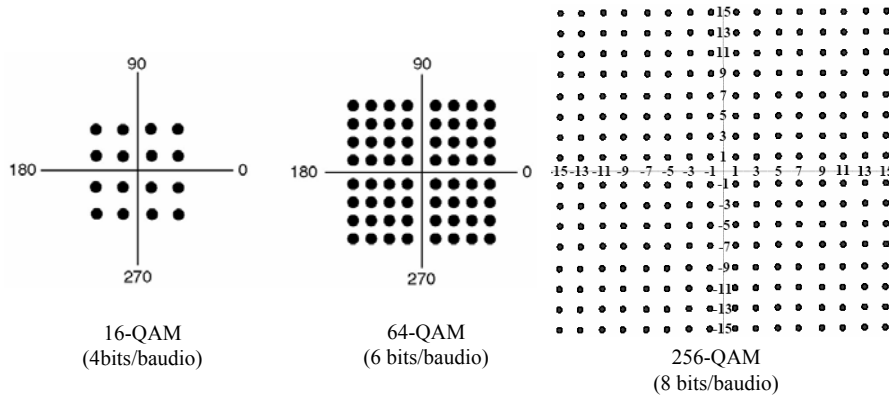
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

48

Técnicas de modulación (11)

- QAM permite un número muy grande de estados (símbolos):



- TCM (Modulación Código Trellis): QAM con 2^N estados \rightarrow N bits/baudio, N-1 bits para datos, 1 bits redundante para FEC (corrección de errores)

noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

49

Técnicas de digitalización

- **Digitalización:** Datos analógicos \rightarrow Datos digitales
- **Objetivo de la digitalización:** reconstrucción de la información analógica en el receptor con la calidad (=fidelidad) deseada.
- **Alternativas:**
 - Datos estáticos (p.e., imágenes, fotografía digital): nº de bits \rightarrow necesidades de almacenamiento.
 - Flujo de datos (p.e., voz, audio, video): bps transmitidos \rightarrow necesidades de ancho de banda del canal utilizado.
- **Compromiso:** nº de bits o V. en bps / calidad de reconstrucción.
- **Técnicas de digitalización: “códecs”**
 - Códecs de voz: pe. PCM, ADPCM, CLPC...
 - Códecs de audio: pe. WAV, MP3, WMA
 - Códecs imagen: pe. BMP, JPEG
 - Códecs de video: pe. MPEG-2

noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

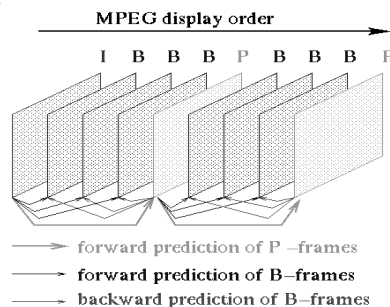
50

Técnicas de digitalización (2)

- Códecs de video: MPEG-2, 4: Motion Picture Encoding Group.
 - Audio (MPEG-2 sección 3: “MP3”): destinado al oído humano (0-22 KHz)
 - Tasas de bit desde 32 kbps.
 - Compresión de silencios
 - Imagen: destinada al ojo humano (retina: 96×10^6 bastones, $4,5 \times 10^6$ conos)
 - Frecuencia : imágenes (“frames”) por segundo (fps), p.e., 24 fps.
 - Digitalización de cada imagen (“frame”) a matriz de píxeles.
 - Propiedades de cada píxel (dominio Y-Cr):
 - Y (Luminancia): representa la intensidad del píxel, relacionada con los bastones.
 - Cb y Cr (Crominancias): componentes de color, relacionadas con los conos.

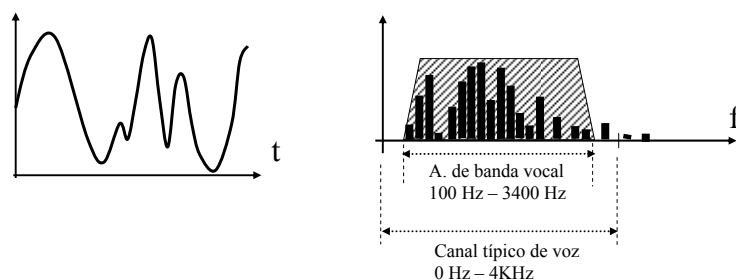
Técnicas de digitalización (3)

- Compresión: no se transmiten todas las frames completas. Hay varios tipos que se entrelazan:
 - I-frames: frames completas. Para referencia del resto.
 - P-frames: frames predictivas. Predicen (a partir de tramas anteriores) el movimiento espacial (“Vector de movimiento”) de macrobloques de $n \times n$ píxeles
 - B-frames: frames bidireccionales. Se relacionan con tramas anteriores y posteriores.



Técnicas de digitalización (4)

- Códecs de voz
- Ancho de banda vocal: 0 – 4 KHz.
 - Concentra la mayor parte de la energía (= espectro efectivo) de una señal de voz convencional.
 - Voz reconocible con la denominada “calidad telefónica”.
 - Utilizada como norma desde la telefonía analógica.



noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

53

Técnicas de digitalización (5)

- Tipos de códec de voz:
 - Códecs de forma de onda: intentan reproducir la forma de onda original:
 - En el dominio del tiempo: muestreo periódico de la señal.
 - En el dominio de la frecuencia: codifican independientemente las distintas componentes del espectro de la señal.
 - Buena calidad, tasa de bit elevada (32-64 Kbps)
 - Vocoder: sintetizan la señal de voz a partir de un modelo, y transmiten los valores de determinados parámetros del modelo.
 - Técnicas predictivas. (p.e., CELP: Code Excited Linear Prediction, G.728, 729)
 - Baja calidad, velocidad baja (hasta 2,4 Kbps)
 - Híbridos: técnica mixta
 - Calidad razonable a velocidades intermedias (< 8Kbps)

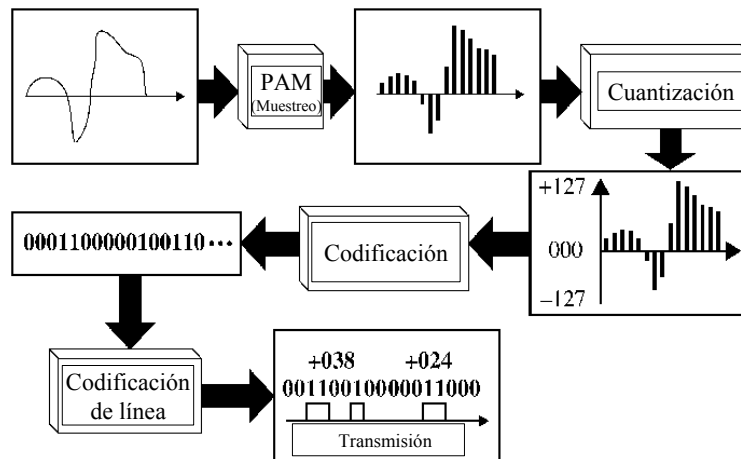
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

54

Técnicas de digitalización (6)

- Etapas de un códec de voz (dominio del tiempo):



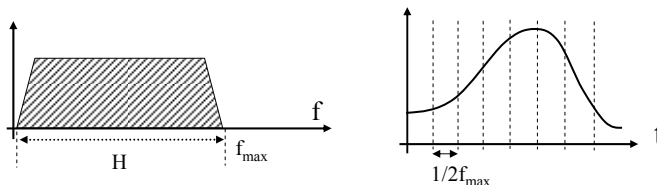
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

55

Técnicas de digitalización (7)

- A) **Muestreo** (PAM: Pulse Amplitude Modulation)
 - Teorema del muestreo = Teorema de Nyquist:
 - $F_{\text{mod}} \leq 2 H$, da la frecuencia máxima con la que puede cambiar una señal que se propaga a través de un medio de banda H (es decir, con un espectro efectivo comprendido dentro de H).
 - La frecuencia de muestreo será la frecuencia con la que registramos los cambios que tienen lugar en la señal, y debería ser:
 - $f_{\text{muestreo}} \geq 2 f_{\text{max}}$, para recuperación de todos los cambios transmitidos, según Nyquist. (Periodo de muestreo $T_m \leq 1/f_{\text{muestreo}}$)



- Ancho de banda vocal: 4 KHz. \rightarrow Frecuencia de muestreo mínima para voz: $2 \cdot 4000 = 8000$ muestras/seg. (no se dice nada sobre la precisión de cada muestra PAM)

noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

56

Técnicas de digitalización (8)

- B) **Cuantización** (digitalización): Discretización de las muestras PAM:
 - Uso de m bits para cada muestra (2^m niveles).
 - Los 2^m niveles deben cubrir todo el rango de posible variación de la señal.
 - Asignación a la muestra del valor del nivel más aproximado, en magnitud y signo.
 - La aproximación introduce el error denominado “**ruido de cuantización**”. Es mayor cuanto menor es el valor de m .
- C) **Codificación**: generación de la señal transmitida finalmente.

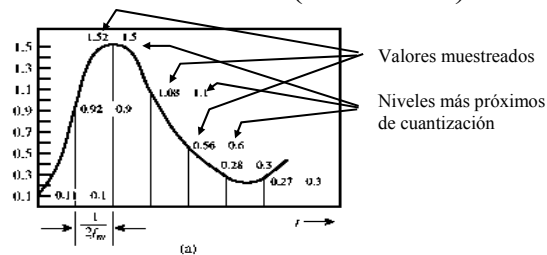
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

57

Técnicas de digitalización (9)

- Ejemplo: cuantización a 4 bits (16 niveles):



Digit	Binary Equivalent	PCM waveform
0	0000	—
1	0001	—
2	0010	—
3	0011	—
4	0100	—
5	0101	—
6	0110	—
7	0111	—

Digit	Binary Equivalent	PCM waveform
8	1000	—
9	1001	—
10	1010	—
11	1011	—
12	1100	—
13	1101	—
14	1110	—
15	1111	—

noviembre de 2005

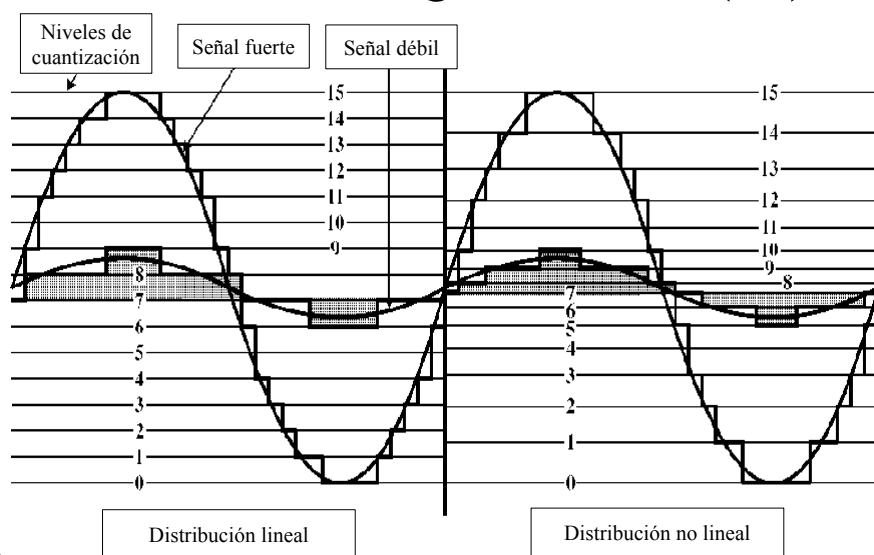
Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

58

Técnicas de digitalización (10)

- Distribución de los niveles de cuantización:
 - Lineal: espaciamiento uniforme dentro del rango.
 - Problemas para señales débiles.
 - No lineal: espaciamiento no uniforme:
 - Se asignan más intervalos de cuantización para las señales más débiles.
 - Reduce la distorsión de la señal.
 - Método más usado: codificación logarítmica.
 - Ley-A (Europa)
 - Ley- μ (USA)

Técnicas de digitalización (11)



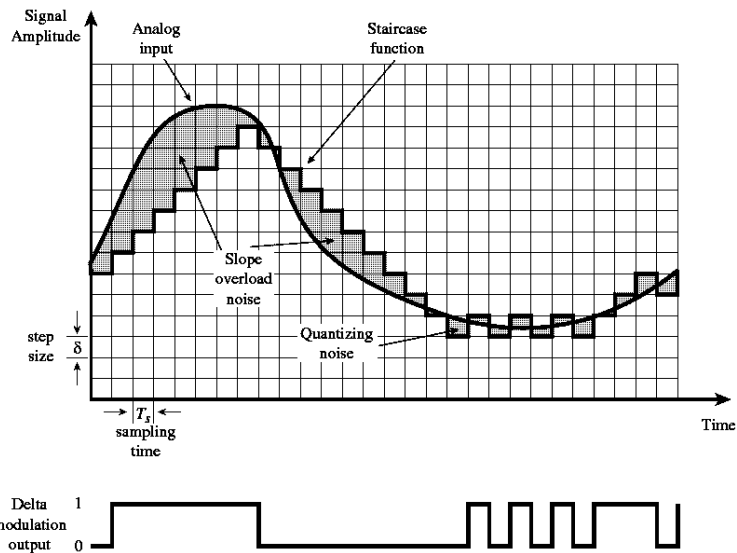
Técnicas de digitalización (12)

- PCM (Estándar G.711 de ITU):
 - 8 (7 en USA) bits / muestra \Rightarrow 256 (128) niveles de cuantización (magnitud y signo).
 - 8000 muestras/seg x 8 (7) bits/muestra = 64 (56) Kbps para cada canal de voz.
 - Codificación no lineal (logarítmica).
- DPCM:
 - Considera la diferencia entre muestras adyacentes.
 - Hace una predicción para dicha diferencia y codifica la desviación respecto de la predicción (“residuo”).
 - Necesita menos bits: p.e., 5 bits/muestra \rightarrow 40 Kbps.
- ADPCM (Estándar original G.721) :
 - Algoritmo de predicción que se ajusta a los cambios en el residuo.
 - Hasta 32 Kbps (y hasta 16 Kbps en G.726 y 727)

Técnicas de digitalización (13)

- Modulación Delta (DM):
 - La entrada analógica se aproxima mediante una función escalón:
 - Sube o baja un nivel (δ) en cada intervalo de muestreo:
 - 1 si sube
 - 0 si baja
 - Un solo bit/muestra: 8 Kbps.
 - Reacciona lentamente a los picos.
 - Parámetros ajustables:
 - Valor del nivel (δ)
 - Intervalo de muestreo (para aumentar precisión).

Técnicas de digitalización (14)



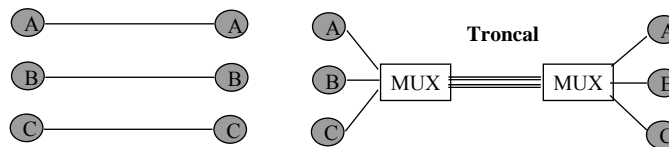
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

63

Multiplexación

- Multiplexores/Demultiplexores: Repartir la capacidad de un canal para crear múltiples subcanales, cada subcanal una comunicación diferente.



- Tipos de multiplexación:
 - FDM, División de la frecuencia
 - TDM, División del tiempo
 - WDM, División de la longitud de onda

noviembre de 2005

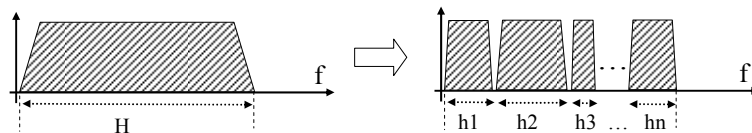
Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

64

Multiplexación (2)

- **División de la frecuencia (FDM):**

- La multiplexación se realiza en el dominio de la frecuencia.
- El reparto de la capacidad máxima de un canal entre n subcanales se hace repartiendo el ancho de banda total H en h_1, h_2, \dots, h_n .



- En cada canal se modula luego independientemente en cada subcanal a b_i bits/baudio:

- $c_1 = 2h_1 * b_1$,

- $c_2 = 2h_2 * b_2$,

....

- $c_n = 2h_n * b_n$.

$$\Rightarrow C = \sum c_i$$

noviembre de 2005

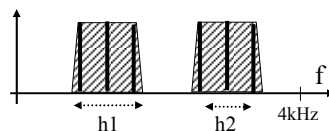
Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

65

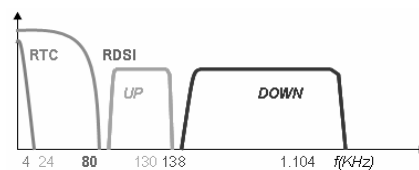
Multiplexación (3)

- **Ejemplos de FDM:**

- Transmisión FDX (2 subcanales) en módems con FSK.
 - El ancho de banda vocal se subdivide en dos subcanales, uno para cada sentido.



- Separación de canales en ADSL:



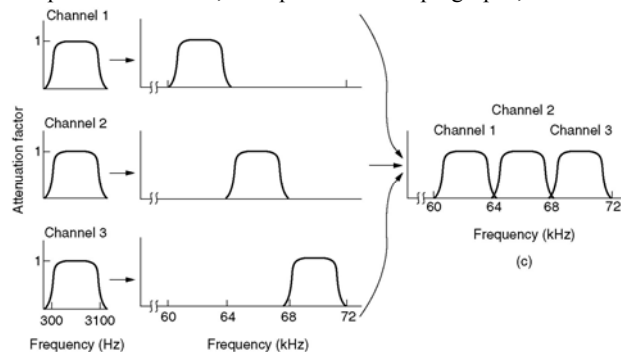
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

66

Multiplexación (4)

- Multiplexación de canales de voz (4kHz) en la RTB analógica:
 - Grupos de 12 canales, multiplexados en supergrupos, etc...



- Reparto del ancho de banda del cable coaxial en CATV, en canales de TV (6-8 MHz).
- Reparto del espectro electromagnético en bandas y canales, para todas las técnicas de transmisión inalámbrica.

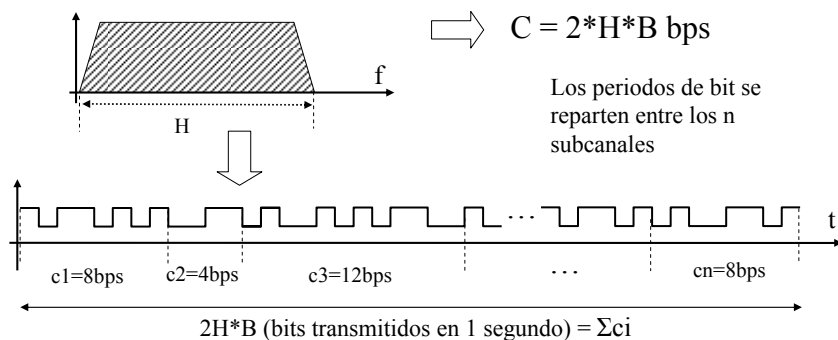
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

67

Multiplexación (5)

- **División del tiempo (TDM):**
 - La multiplexación se realiza en el dominio del tiempo.
 - El reparto de la capacidad C del canal entre n subcanales, se hace transmitiendo a la máxima velocidad posible por el canal, con B bits/baudio:



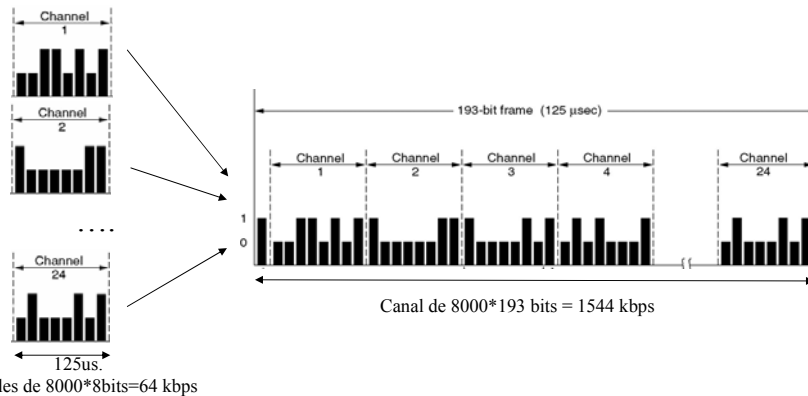
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

68

Multiplexación (6)

- Ejemplo de TDM:
 - Multiplexación de 24 canales de voz (PCM 64kbps) en la red telefónica digital (USA), denominada "portadora T1".
- Como hay que garantizar la transmisión de 1 muestra por canal cada 125 useg., este patrón de 193 bits se repite 8000 veces por segundo:



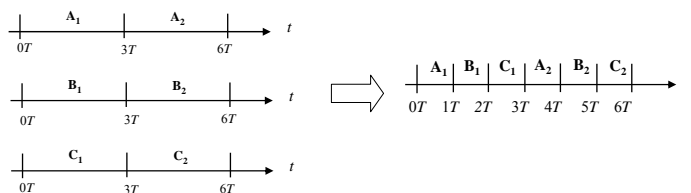
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

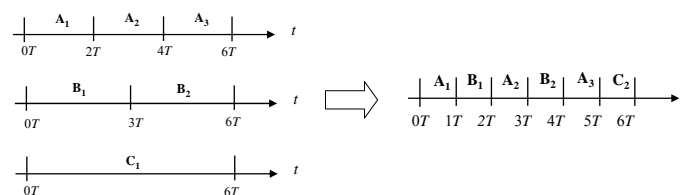
69

Multiplexación (6)

- Tipos de TDM:
 - Uniforme (síncrona): p.e., para voz PCM.



- Estadística (asíncrona): asignando a cada canal en función del tráfico que genera.



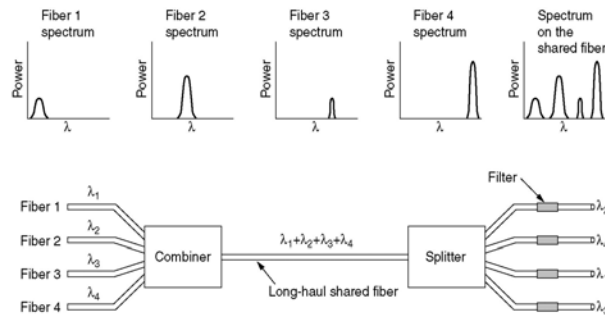
noviembre de 2005

Redes - Tema 2a (Conceptos de transmisión de datos)

70

Multiplexación (7)

- **División de longitud de onda (WDM):** FDM para fibra óptica. Uso de λ (“wavelength”) en lugar de f ($f=c/\lambda$).



- Tipos de WDM:
 - CWDM (“coarse”), pocas λ (hasta 18), separación de 20 nm.
 - DWDM (“dense”), muchas λ (> 100), separación de hasta 0,4 nm)