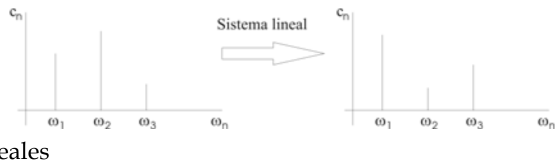
Señales a través de sistemas lineales: respuesta en frecuencia

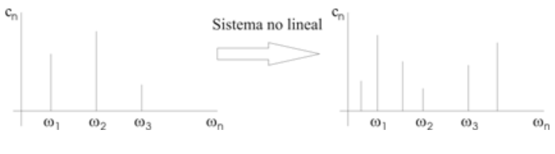
- Introducción
  - Usando la transformada de Fourier y el ancho de banda se pueden conocer los efectos del paso de las señales de comunicación a través de los sistemas o medios de transmisión (respuesta en frecuencia)
  - Razón por la que el concepto de frecuencia se utiliza ampliamente en comunicaciones
- Objetivos
  - Analizar la respuesta en frecuencia de los sistemas lineales
  - Estudiar los efectos (distorsionantes) que los sistemas producen en las señales que se transmiten por ellos
- Tipos de distorsión
  - Deseable
    - Filtros diseñados para producir formas de señal deseadas
  - No deseable o inevitable
    - Transmisión de varias señales por un medio de transmisión

Señales a través de sistemas lineales: respuesta en frecuencia

- Tipos de sistemas
  - Sistemas lineales
    - La respuesta del sistema contiene la mismas componentes de frecuencia que la señal aplicada



  - No lineales
    - La respuesta contiene nuevas componentes de frecuencia

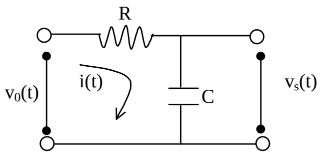


Señales a través de sistemas lineales: respuesta en frecuencia

- Se considerarán sistemas lineales
  - Simplicidad en el análisis
  - Permiten conocer los efectos que los sistemas producen sobre las señales en términos de respuesta en frecuencia
- Sistema lineal estacionario
  - Se puede modelar bajo un sistema de ecuaciones lineales con operaciones como suma, resta, diferenciación, integración y multiplicación y división por una constante
  - Definido por ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes

Sistemas lineales estacionarios

- Función de transferencia
  - Un sistema lineal estacionario se puede caracterizar por medio de su función de transferencia *H(w)*
  - *H(w)* función en el dominio de la frecuencia que relaciona la salida del sistema con su entrada
  - Ejemplo: Red RC



$$v_0(t) = Ri(t) + \frac{1}{C}\int i dt$$

$$v_s(t) = \frac{1}{C}\int i dt$$

Ecuaciones del modelo matemático del sistema

$$\left.\begin{aligned} V_0(\omega) &= RI(\omega) + \frac{I(\omega)}{j\omega C} \\ V_s(\omega) &= \frac{I(\omega)}{j\omega C} \end{aligned}\right\} \Longrightarrow \quad \frac{V_s(\omega)}{V_0(\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \qquad H(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Función de transferencia del sistema

Sistemas lineales estacionarios

- Teorema de la respuesta lineal
  - Si a un sistema caracterizado por una función de transferencia *H(w)* se le aplica una señal del tipo $f(t) = e^{j\omega_0 t}$ la salida *g(t)* será una señal de la misma frecuencia que la entrada pero atenuada y desfasada por *H(w)*

$$g(t) = |H(\omega_0)| e^{j(\omega_0 t + \theta(\omega_0))}$$ donde

$|H(\omega_0)|$ módulo de función transferencia en $\omega = \omega_0$

$\theta(\omega_0)$ fase de función de transferencia en $\omega = \omega_0$

Ejemplo 1: $f(t) = e^{j2\pi 50t}$

$$g(t) = 10e^{j(100\pi + \pi/4)}$$

$$\boxed{\begin{array}{ll} |H(100\pi)| = 10 & \theta(100\pi) = \frac{\pi}{4} \\ |H(-100\pi)| = 10 & \theta(-100\pi) = -\frac{\pi}{4} \end{array}}$$

Ejemplo 2: $f(t) = V\sin(2\pi 50t) = \frac{V}{2j}\left(e^{j2\pi 50t} - e^{-j2\pi 50t}\right)$

$$g(t) = \frac{V}{2j}\left(10e^{j2\pi 50t + \pi/4} - 10e^{-j2\pi 50t - \pi/4}\right) = 10\mathrm{V}\sin\left(2\pi 50t + \pi/4\right)$$

Transmisión de Datos Tema 2: Señales y sistemas 37

Sistemas lineales estacionarios

- Propiedades de un sistema lineal estacionario
  - Principio de superposición
    - La respuesta a una suma de excitaciones es igual a la suma de las respuestas a esas mismas excitaciones consideradas de forma separada
    - Si una entrada $f_1(t)$ produce una salida $g_1(t)$ y una entrada $f_2(t)$ produce una salida $g_2(t)$ entonces la entrada $a\, f_1(t) + b\, f_2(t)$ producirá una salida $ag_1(t) + b\, g_2(t)$
  - Condición de invarianza en el tiempo
    - Las relaciones entre la entrada y la salida son invariantes en el tiempo
      - Los elementos del sistema no se modifican con el tiempo
    - Si una entrada $f_1(t)$ produce una salida $g_1(t)$ entonces la entrada $f_1(t-\tau)$ producirá una salida $g_1(t-\tau)$
    - El sistema no tiene memoria
      - Para una entrada dada produce siempre la misma salida, sin tener en cuenta estados anteriores
- Resultado
  - Las dos propiedades permiten que el análisis de Fourier juegue un papel muy importante en el estudio de los medios lineales estacionarios

Transmisión de Datos Tema 2: Señales y sistemas 38

Sistemas lineales estacionarios

- Importancia del análisis de Fourier
  - Obtener la salida *g(t)* de un sistema ante una señal de entrada *f(t)* genérica
    - *f(t)* se expresa (por transformada inversa de Fourier) como una suma (integral) de infinitos términos de la forma

$$\frac{1}{2\pi}F(\omega)e^{j\omega t}$$

    - Cada uno de ellos produce una salida

$$\frac{H(\omega)}{2\pi}F(\omega)e^{j\omega t}$$

    - Por superposición se obtiene la salida *g(t)* como la suma de infinitas respuestas, teniendose

$$g(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{H(\omega)}{2\pi}F(\omega)e^{j\omega t}d\omega=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}G(\omega)e^{j\omega t}d\omega$$

  - Se obtiene que $G(\omega)=H(\omega)F(\omega)$

donde $G(\omega)$ es la transformada de Fourier de la salida *g(t)*

Sistemas lineales estacionarios

- Importancia de la relación $G(\omega)=H(\omega)F(\omega)$
  - Muy útil y responsable del uso amplio del concepto de frecuencia en el análisis y diseño de los sistemas de comunicación
  - Permite determinar el efecto exacto del medio sobre las señales de entrada y analizar los cambios concretos que experimentan las señales a medida que se transmiten por los medios
  - Permite conocer con rapidez el efecto aproximado que tiene un sistema lineal sobre las señales que pasan por él
    - El ancho de banda juega un papel primordial
      - utilizando los espectros se puede determinar con rapidez el efecto distorsionador de un sistema o especificar los filtros necesarios para obtener determinadas formas de onda

Unidades de Medida de Potencia

- Unidad de Potencia básica → Watio (W)
  - Unidad demasiado grande para la medida de potencia de señales
    - Normalmente se utiliza el mW
- En muchos caso no se utiliza una media absoluta sino relativa
  - El oído no es capaz de determinar la intensidad de un sonido pero si la relación que hay entre dos sonidos
  - Relación entre dos potencias → PA/PB
  - El oído no sigue una relación lineal sino logarítmica → $\log_{10}(P_A / P_B)$
    - Belio (B) en honor a Graham Bell
    - Unidad demasiado grande
  - deciBelio (dB) $10\log_{10}(P_A / P_B)$
- Otras unidades relacionadas
  - dBw → Valor de potencia con respecto a un Watio
  - dBm → Valor de potencia con respecto a un mili Watio

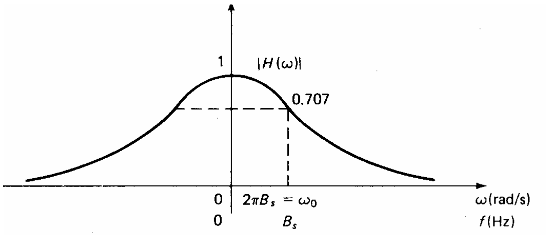
Transmisión de Datos · Tema 2: Señales y sistemas · 41

Estudio cualitativo de respuesta en frecuencia

- Suponer un sistema caracterizado por *H(ω)* centrada en el origen y con ancho de banda B_s

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + j\,\omega/\omega_0}$$

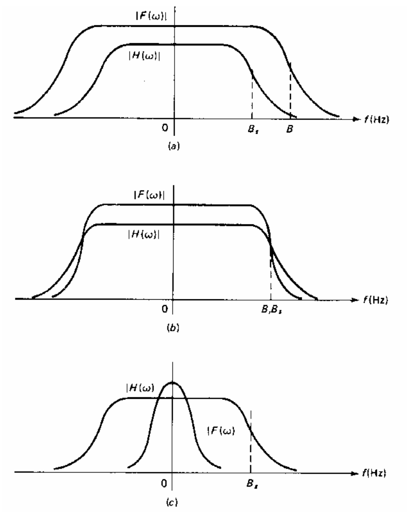
- Se trata de una red RC con $RC=1/w_0$
- Con el criterio de 3dB se tiene que $2\pi B_s = w_0$



- Se aplica a la entrada de *H(ω)* una señal *f(t)* con un espectro similar y con ancho de banda *B*
- Se consideran tres casos
  - $B > B_s$
  - $B \sim B_s$
  - $B < B_s$

Transmisión de Datos · Tema 2: Señales y sistemas · 42

Estudio cualitativo de respuesta en frecuencia



RESULTADOS

La salida fuertemente distorsionada

Las características de la entrada desaparecen: la forma de la señal de salida está determinada por las características del sistema y el ancho de banda será Bs

Situación intermedia

La salida está distorsionada pero recuerda a la entrada

La salida será una réplica sin distorsión de la entrada *f(t)*

Estudio cualitativo de respuesta en frecuencia

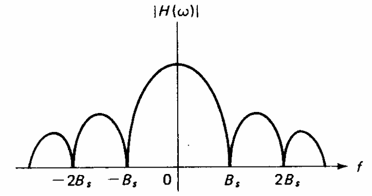
- Resultados
  - Previos obtenidos con el producto de los dos espectros $G(\omega) = H(\omega)F(\omega)$
  - Para tener una distorsión relativamente pequeña en una señal que se transmite por un sistema de comunicaciones, su A.B debe ser pequeño frente al del sistema
  - Ejemplos:
    - Sistema de alta fidelidad con A.B = 20 kHz para reproducir las señales con la debida fidelidad
    - Filtros de sistema telefónico se ajustan para AB = 4kHz
      - La voz y la música transmitidas por teléfono no tienen calidad de alta fidelidad
    - Receptores AM tienen AB=2.5kHz
      - respuesta en frecuencia inferior a la alta fidelidad
      - recepción pobre de AM

Estudio cuantitativo de respuesta en frecuencia

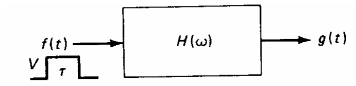
- Sistema lineal caracterizado por

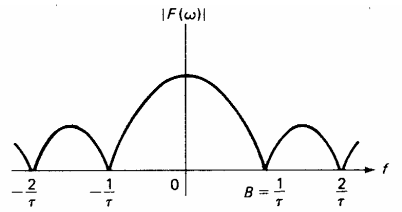
$$H(\omega)=\frac{sin(\omega/2B_s)}{\omega/2B_s}e^{-j\omega/2B_s}$$

  - Ancho de banda : B_s



- Señal de entrada
  - Pulso rectangular de ancho τ
  - Ancho de banda: B



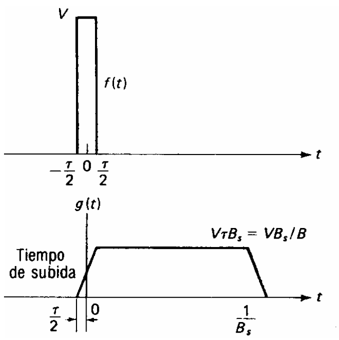


Estudio cuantitativo de respuesta en frecuencia

- B >> B_s
  - (τ << $1/B_s$) Pulso de entrada muy estrecho comparado con la respuesta temporal característica del sistema $1/B_s$
  - El producto *H(w)F(w)* determinado por la función de transferencia del sistema
  - | *F(w)* | constante e igual a $V\tau$ sobre la mayor parte del intervalo significativo de | *H(w)* |
  - Aproximación

$$G(w)=V\tau H(w)$$

  - Salida *g(t)*
    - pulso rectangular con tiempos de subida y bajada finitos relacionados con τ
    - forma de *g(t)* determinada por *H(w)* y con amplitud $V\tau B_s$
  - Respecto del sistema *f(t)* se parece a un impulso ⇒ *g(t)* es la respuesta al impulso

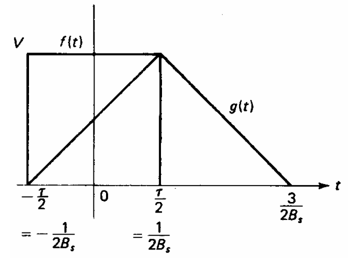


Estudio cuantitativo de respuesta en frecuencia

- $B = B_s$ $(\tau = 1/B_s)$
  - Anchos de banda del sistema y la señal iguales $\Rightarrow$ salida es una versión distorsionada de la entrada

$$G(\omega) = H(\omega)F(\omega) = V\tau\left[\frac{sin(\omega/2B_s)}{\omega/2B_s}\right]^2 e^{-j\omega/2B_s}$$

  - Representa la transformada de un pulso triangular centrado en $\tau = 1/2B_s$
  - El efecto distorsionador del sistema ha sido ensanchar el pulso rectangular a la forma triangular
  - Tiempo de subida= $1/B_s$
  - Ancho del pulso = $2/B_s$

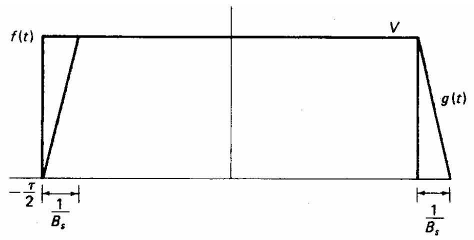


Estudio cuantitativo de respuesta en frecuencia

- $B << B_s$
  - | *F(w)* | más estrecho que | *H(w)* | $\Rightarrow$ las frecuencias menores que B_s pasan sin cambios
  - *g(t)* se parece mucho a la entrada *f(t)*
  - Aproximación

G(w)=F(w)

  - El pulso de entrada y de salida se diferencian en los tiempos de subida y bajada
  - Pulso de salida con tiempo de subida= $1/B_s$
  - Ancho del pulso $\approx \tau$



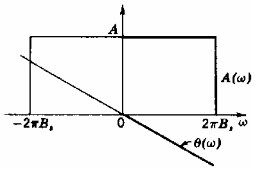
Respuesta de redes ideales

- Planteamiento inicial
  - Previamente se ha estudiado el efecto producido por un sistema ante un pulso de entrada en tres casos extremos
  - No se analizaban los casos intermedios debido a la complejidad desde el punto de vista matemático
  - Para obtener el efecto exacto de un sistema sobre una señal hay que evaluar numéricamente la expresión

$$g(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} H(\omega)F(\omega)e^{j\omega t}d\omega$$

  - Para realizar el estudio se considerará una red ideal
    - Sirve como modelo de las características de filtrado de las redes reales
    - Permite demostrar de forma cuantitativa el efecto de filtrado sobre una señal
    - Se enfoca principalmente a la variación de un parámetro, como es el ancho de banda del sistema B_s
      - Al variar B_s se puede ver el efecto del filtro sobre la señal de entrada

Respuesta de redes ideales



- Filtro ideal pasabaja

$H(\omega) = A(\omega)e^{j\theta(\omega)}$ con

$$|H(\omega)| = A(\omega) = \begin{cases} A & si \quad |\omega| \le 2\pi B_s \\ 0 & si \quad |\omega| > 2\pi B_s \end{cases} \quad \text{y} \quad \theta(\omega) = -t_0\omega$$

  - Hay que introducir frecuencias negativas para usar la integral de Fourier
  - Este filtro es ideal y no se puede realizar físicamente
    - Hay que tener cuidado en las interpretaciones porque pueden llegar a ser absurdas
  - Objetivos
    - Calcular de forma cuantitativa la respuesta del filtro ideal para un pulso aplicado como entrada
    - Variar el ancho de banda del filtro B_s y obtener la salida *g(t)* para distintos valores de B_s

Respuesta de redes ideales

- Filtro ideal pasabaja
  - Si el pulso de entrada es rectangular de anchura τ, amplitud *V* y centrado en el origen $F(\omega) = V\tau \dfrac{sin(\omega\tau/2)}{\omega\tau/2}$
  - G(ω) será

$$G(\omega) = \begin{cases} V\tau \dfrac{sin(\omega\tau/2)}{\omega\tau/2} Ae^{-jt_0\omega} & si \quad |\omega| \le 2\pi B_s \\ 0 & si \quad |\omega| > 2\pi B_s \end{cases}$$

  - Entonces *g(t)* será

$$g(t) = \frac{AV\tau}{2\pi} \int_{-2\pi B_s}^{2\pi B_s} \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega\tau/2} e^{j\omega(t-t_0)} d\omega$$

  - Resolviendo se obtiene

$$g(t) = \frac{AV}{\pi}\left\{SI\left[2\pi B_s\left(t - t_0 + \tau/2\right)\right] - SI\left[2\pi B_s\left(t - t_0 - \tau/2\right)\right]\right\}$$

donde

$$SI[y] = \int_0^y \frac{sin(x)}{x} dx$$

se denomina *integral seno de y*

Respuesta de redes ideales

- La integral seno se corresponde con el área bajo la curva

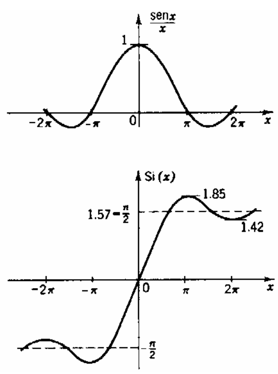
$$\frac{sin(x)}{x}$$

- *SI[y]* no puede evaluarse de forma analítica, sino de forma numérica
- La respuesta *g(t)* a un pulso rectangular de un filtro pasabaja es la diferencia de dos *SI*
  - *g(t)* no puede evaluarse analíticamente sino de forma numérica
  - *g(t)* depende del ancho de banda del sistema B_s y del ancho del pulso de entrada τ
  - Se analizarán tres casos

$B_s = 1/5\tau$ $(B_s << 1/\tau)$

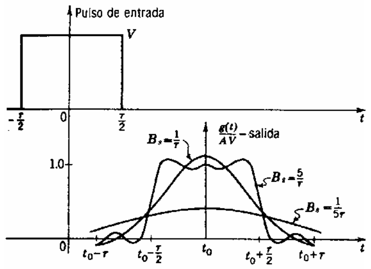
$B_s = 1/\tau$

$B_s = 5/\tau$ $(B_s >> 1/\tau)$



Respuesta de redes ideales

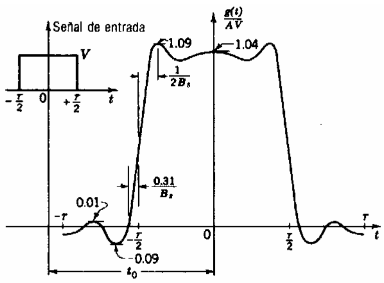
- Resultados del ejemplo
  - Todas las curvas aparecen desplazadas t_0 respecto del pulso de entrada y son simétricas respecto a $t=t_0$
    - Retardo temporal t_0 debido a la característica de fase del filtro y coincide con su pendiente
  - Las curvas corroboran los resultados previos obtenidos cualitativamente



    - B_s <<1/τ La salida es más ancha que la entrada y alcanza un máximo
      Salida fuertemente distorsionada respecto de la entrada
      Aproximación de la respuesta a un impulso del filtro
    - B_s =1/τ La salida se puede aproximar a un pulso de anchura τ
      No se asemeja a un rectángulo sino a un triángulo
      El tiempo de subida es aproximadamente de τ/2
    - B_s >>1/τ La salida se asemeja a la entrada de forma más exacta
      El ancho de la salida es τ
      Existen diferencias entre el pulso de entrada y el de salida

Respuesta de redes ideales

- Diferencias entre entrada y salida
  - Pulso de salida es una réplica retrasada de la entrada
  - Pulso de salida no tiene un tiempo de subida T_s nulo
    - T_s se define como el tiempo que toma el pulso en subir de cero hasta su valor máximo
      Tiempo subida = 0.8/ B_s
    - T_s inversamente proporcional a B_s



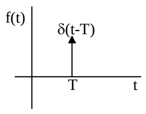
    - En algunos sistemas sólo interesa que los anchos de los pulsos de entrada y salida coincidan, sin importar la fidelidad, entonces $B_s \approx 1/\tau$
    - En otros sistemas se requiere fidelidad, entonces $B_s \approx k/\tau$
      – la constante *k* se determina mediante el tiempo de subida requerido
  - Pulso de salida presenta sobreimpulsos (overshoots) y oscilaciones que se amortiguan cerca de la región plana del pulso
    - Fenómeno característico de filtro con una característica en amplitud con un corte muy abrupto

Respuesta de redes ideales

- Diferencias entre entrada y salida
  - Pulso de salida tiene valores no nulos para $t < -\tau/2$, es decir, antes de que aparezca el pulso de entrada
    - La aparición de una salida antes de que se produzca la entrada es físicamente irrealizable
    - Debido a que la característica en amplitud propuesta no se puede realizar en la práctica
    - En el ejemplo se ha supuesto una red ideal que no se puede realizar prácticamente pero sirve para obtener conclusiones generales
- Conclusiones
  - Se ha estudiado el efecto de transmitir un pulso rectangular sobre un filtro pasabaja ideal con ancho de banda B_s , una amplitud constante para $|f| < B_s$ y una fase lineal con la frecuencia
  - TRANSMISION SIN DISTORSION
    - Una característica en amplitud plana y una característica en fase lineal sobre todas frecuencias produce una réplica retrasada de la entrada con diferente magnitud

Impulso y respuesta a un impulso

- Impulso centrado en T $\delta(t-T)$
  - Amplitud infinita , anchura nula y área unidad

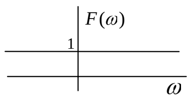


$$Area(\delta(t-T)) = \begin{cases} 1 & si \quad t = T \\ 0 & si \quad t \neq T \end{cases}$$

  - Definición

$$\int \delta(t-T)r(t)dt = r(T)$$ siendo r(t) una función cualquiera

  - Transformada de Fourier del impulso



$$\mathcal{F}\left[\delta(t)\right] = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)e^{-j\omega t}dt = e^{-j\omega t}\Big|_{t=0} = 1$$

la característica en frecuencia es constante para todas las frecuencias

- Si el impulso se aplica a un sistema lineal
  - equivale a excitar el sistema con todas las frecuencias simultáneamente

$$G(\omega) = H(\omega)F(\omega) = H(\omega)\cdot 1 \Rightarrow g(t) = h(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} H(\omega)e^{j\omega t}d\omega$$

h(t) coincide con la respuesta a un impulso

Impulso y respuesta a un impulso

- Sirve para identificar sistemas no conocidos
  - Se aplica al sistema una entrada impulso, se mide la respuesta y se calcula su transformada, obteniendose *H(w)*
  - En la práctica, el problema es aplicar un impulso
    - se aplica un pulso con B >> B_s $\Rightarrow$ $1/\tau >> B_s \Rightarrow \tau << 1/B_s$
- Las funciones impulsos se utilizan para representar señales periódicas
  - Como $\mathscr{F}[\delta(t)] = 1$ aplicando el teorema de retardo en el tiempo

$$\mathscr{F}[\delta(t-t_0)] = e^{-j\omega t_0}\mathscr{F}[\delta(t)] = e^{-j\omega t_0}$$

$$\mathscr{F}[\delta(t-t_0)] = \int_{-\infty}^{\infty}\delta(t-t_0)e^{-j\omega t}dt = e^{-j\omega t_0}$$

  - De la misma forma

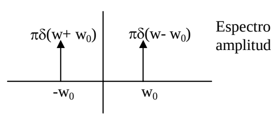
$$\mathscr{F}^{-1}[\delta(\omega-\omega_0)] = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\delta(\omega-\omega_0)e^{j\omega t}d\omega = \frac{1}{2\pi}e^{j\omega_0 t}$$

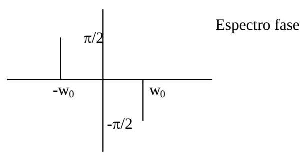
$$\boxed{\begin{array}{ll} \delta(t-t_0) \leftrightarrow e^{-j\omega t_0} & e^{j\omega_0 t} \leftrightarrow 2\pi\delta(\omega-\omega_0) \\ \delta(t+t_0) \leftrightarrow e^{+j\omega t_0} & e^{-j\omega_0 t} \leftrightarrow 2\pi\delta(\omega+\omega_0) \end{array}}$$

Impulso y respuesta a un impulso

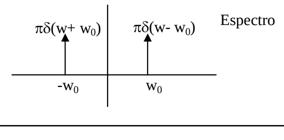
- Ejemplo: calcular las transformadas de Fourier de señales seno y coseno

$$\sin(\omega_0 t) = \frac{e^{+j\omega_0 t} - e^{-j\omega_0 t}}{2j} \Rightarrow \mathscr{F}[\sin(\omega_0 t)] = \frac{2\pi\delta(\omega-\omega_0) - 2\pi\delta(\omega+\omega_0)}{2j} =$$
$$= -j\pi[\delta(\omega-\omega_0) - \delta(\omega+\omega_0)]$$





$$\cos(\omega_0 t) = \frac{e^{+j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}}{2} \Rightarrow \mathscr{F}[\cos(\omega_0 t)] = \pi[\delta(\omega-\omega_0) + \delta(\omega+\omega_0)]$$



Perturbaciones en la transmisión de señales

- Objetivo de este apartado
  - Estudiar una serie de fenómenos, debidos al propio medio de transmisión o ajenos a él, que ocasionan que la señal recibida sea distinta de la señal emitida
    - Estos fenómenos provocan que en el extremo receptor no se pueda reproducir con absoluta fidelidad la señal que proviene del emisor
- Perturbaciones en los medios
  - Atenuación
  - Distorsión de atenuación
  - Distorsión de retardo
  - Ruido

Transmisión de Datos Tema 2: Señales y sistemas 59

Perturbaciones en la transmisión de señales

- Atenuación
  - Las señales al propagarse por un medio experimentan inevitablemente una pérdida de potencia/energía (aumenta con la distancia), que se denomina atenuación
  - Unidad de medida es decibelio (dB)
  - Se expresa como una relación logarítmica entre la potencia enviada y la potencia recibida.

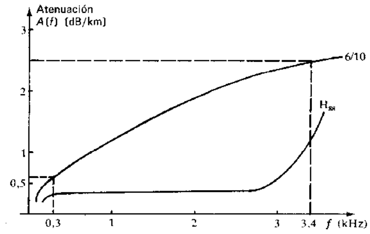
$$[N] = 10 \log_{10}\left(\frac{Potencia - enviada}{Potencia - recibida}\right)$$

  - La atenuación presenta tres problemas que hay que tener en cuenta al diseñar un sistema de transmisión
    - La señal recibida debe de sobrepasar un cierto nivel para que pueda ser detectada por la circuitería del receptor
    - La señal debe tener un nivel mayor que el ruido para garantizar la calidad de la transmisión (la relación señal/ruido debe superar un nivel)
    - La atenuación depende (aumenta) con la frecuencia
  - Los dos primeros se solucionan con repetidores o amplificadores, mientras que el tercero da lugar a la distorsión de atenuación

Transmisión de Datos Tema 2: Señales y sistemas 60

Perturbaciones en la transmisión de señales

- Distorsión de atenuación
  - Una señal compleja es la superposición de una serie, en teoría infinita, de componentes de distinta frecuencia (armónicos)
  - Los medios de transmisión presentan una atenuación distinta a cada frecuencia a causa de su propia constitución interna
  - Como consecuencia la señal reproducida en recepción no se corresponde exactamente con la original, al haberse alterado los valores no sólo absolutos, sino también relativos, de las amplitudes de sus armónicos
  - El grado en que, por esta causa, la señal recibida deja de identificarse con la de origen se denomina distorsión de atenuación
  - Se caracteriza mediante la *respuesta atenuación/frecuencia*
    - Representación de los valores de la atenuación que presenta el medio a una serie de frecuencias



Respuesta atenuación/frecuencia para un par telefónico

Perturbaciones en la transmisión de señales

  - Se soluciona con un ecualizador de atenuación, que presenta una respuesta atenuación/frecuencia que es complementaria a la de la línea de transmisión ⇒ la respuesta del conjunto es una respuesta plana
- Distorsión de retardo
  - Una señal se puede considerar como una suma infinita de armónicos de distinta frecuencia, múltiplos de la frecuencia fundamental de la señal
  - La velocidad de propagación de la señal por el medio varía con la frecuencia
  - Como consecuencia, cada armónico llegará al receptor en instante de tiempo distintos ⇒ una distorsión en la señal recibida denominada *distorsión de retardo* o *distorsión de fase*
  - Carece de importancia en la transmisión de una conversación telefónica
    - el oido humano no es capaz de apreciarlo
  - Tiene un efecto importante sobre las señales de transmisión de datos y es de vital importancia en el caso de altas velocidades
  - Se puede reducir insertando ecualizadores de retardo
    - con características de fase complementarias a las del medio

Perturbaciones en la transmisión de señales

- Ruido
  - Toda señal que se propaga por un medio se ve perturbada por la adición de procesos aleatorios denominados *ruido*
  - Tiene carácter aditivo, se superpone al nivel de la señal, tanto analógica como digital y puede producir errores en la transmisión
  - Determina la capacidad de un medio para transmitir información
    - Se mide de forma relativa respecto del nivel de la señal, y la relación se denomina *relación señal/ruido*
    - La relación señal/ruido tiene que superar un nivel umbral
      - La potencia de la señal no se puede aumentar sin más porque aumentarían las perturbaciones en líneas adyacentes, saturaría la circuitería del transmisor y los amplificadores tienen potencia limitada
  - Tipos de ruido
    - Térmico o blanco
    - Diafonía
    - Ruido impulsivo

Transmisión de Datos — Tema 2: Señales y sistemas — 63

Perturbaciones en la transmisión de señales

- Ruido térmico o ruido blanco
  - Existe en todos los medios y dispositivos electrónicos de forma inevitable y no se puede eliminar
  - Tiene un origen térmico
    - Cualquier conductor se encuentra a una determinada temperatura ⇒ lleva asociado una energía térmica ⇒ produce movimiento desordenado de portadores ⇒ ruido
  - Se denomina blanco porque su potencia está distribuida de forma uniforme en todo el espectro en frecuencias
- Diafonía o crosstalk
  - Acoplamiento indeseado de señales entre líneas próximas (interferencias electromagnéticas)
  - Aparece en Red telefónica debido al acoplamiento eléctrico entre cable de pares cercanos
  - También al captar las señales con antenas
    - la energía se dispersa durante la transmisión

Transmisión de Datos — Tema 2: Señales y sistemas — 64

Perturbaciones en la transmisión de señales

- Ruido impulsivo
  - Picos de ruido de muy corta duración y elevada amplitud
  - Se producen de forma dispersa o a ráfagas con una duración mínima
  - Numerosas fuentes de ruido impulsivo
    - Fuertes inducciones producidas por conmutaciones electromecánicas de cualquier tipo (motores, conmutadores, interruptores etc.) en su entorno
    - Tormentas atmosféricas y fallos y defectos en los sistemas de transmisión
  - No tiene mucha importancia para señales analógicas
  - Muy perjudicial en la transmisión de datos $\Rightarrow$ errores en la transmisión
    - Ejemplo: un pico de energía de 0.01s de duración no inutilizaría una señal de voz analógica pero supondría la pérdida de 50bits en una transmisión a 4800bps