

CAPÍTULO 3

Datos y señales

Uno de los aspectos fundamentales del nivel físico es transmitir información en forma de señales electromagnéticas a través de un medio de transmisión. Tanto si se están recolectando estadísticas numéricas de otra computadora, como si se están enviando gráficos animados desde una estación de diseño o haciendo sonar una campana en un centro de control distante, se está realizando transmisión de **datos** a través de conexiones de red.

Generalmente, los datos que utiliza una persona o una aplicación no están en un formato que se pueda transmitir por la red. Por ejemplo, una fotografía debe convertirse primero a un formato que el medio de transmisión pueda aceptar. El medio de transmisión funciona conduciendo energía a través de un camino físico.

Para ser transmitidos, los datos deben ser convertidos a señales electromagnéticas.

3.1 ANALÓGICO Y DIGITAL

Tanto los datos como las señales que los representan pueden estar en forma *analógica o digital*.

Datos analógicos y digitales

Los datos pueden ser analógicos o digitales. El término **datos analógicos** se refiere a información que es continua; el término **datos digitales** indica algo que tiene estados discretos. Por ejemplo, un reloj analógico, que tiene agujas para horas, minutos y segundos, da información de forma continua; los movimientos de las agujas son continuos. En el lado contrario, un reloj digital que marca las horas y los minutos cambiará repentinamente de las 8:05 a las 8:06.

Los **datos analógicos**, como el sonido de la voz humana, toman valores continuos. Cuando alguien habla, se crea una onda continua en el aire. Esta onda puede ser capturada por un micrófono y convertida en una señal analógica o muestreada y convertida a una señal digital.

Los **datos digitales** toman valores discretos. Por ejemplo, los datos se almacenan en la memoria de una computadora en forma de ceros y unos. Se pueden convertir a señales digitales o ser modulados en una señal analógica para su transmisión a través de un medio.

Los datos pueden ser analógicos o digitales. Los datos analógicos son continuos y toman valores continuos. Los datos digitales tienen estados discretos y toman valores discretos.

Señales analógicas y digitales

Al igual que la información que representan, las **señales** pueden ser también analógicas o digitales. Una **señal analógica** es una forma de onda continua que cambia suavemente en el tiempo. A medida que la onda se mueve de A a B, pasa a través de, e incluye un número infinito de valores en, su camino. Por el contrario, una **señal digital** solamente puede tener un número de valores definidos. Aunque cada valor puede ser cualquier número, a menudo es tan simple como cero y uno.

La forma más sencilla de representar las señales es dibujarlas sobre un par de ejes perpendiculares. El eje vertical representa el valor o la potencia de la señal. El eje horizontal representa el paso del tiempo. La Figura 3.1 ilustra una señal analógica y una señal digital. La curva que representa la señal analógica es suave y continua, pasando a través de un número infinito de puntos. Sin embargo, las líneas verticales de la señal digital demuestran que hay un salto repentino entre un valor y otro de la señal.

Las señales pueden ser analógicas o digitales.
Las señales analógicas pueden tener un número infinito de valores dentro de un rango;
las señales digitales solamente pueden tener un número limitado de valores.

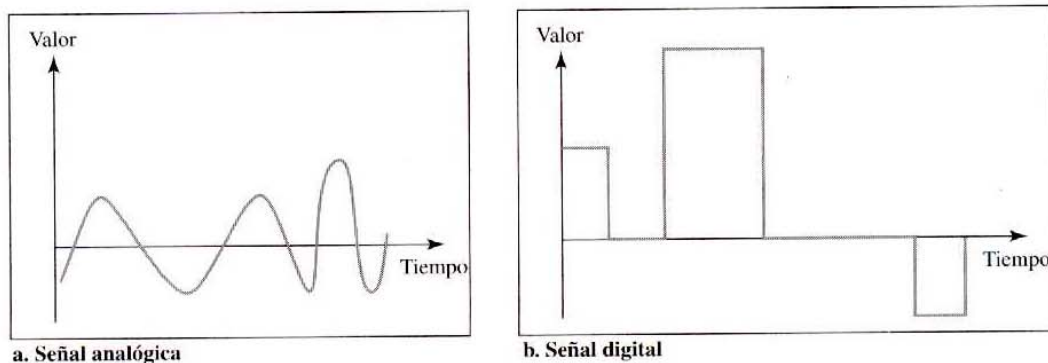
Señales periódicas y aperiódicas

Tanto las señales analógicas como las digitales pueden ser de dos formas: *periódicas* y *aperiódicas* (no periódicas).

Una señal es **periódica** si completa un patrón dentro de un marco de tiempo medible, denominado un **periodo**, y repite ese patrón en periodos idénticos subsecuentes. Cuando se completa un patrón completo, se dice que se ha completado un **ciclo**. Una señal **aperiódica**, o no periódica, cambia sin exhibir ningún patrón o ciclo que se repita en el tiempo.

Tanto las señales analógicas como las digitales pueden ser periódicas y aperiódicas. En transmisión de datos se usa habitualmente señales analógicas periódicas (porque necesitan menos ancho de banda, como se

Figura 3.1 Comparación entre señales analógicas y digitales.



verá en el Capítulo 5) y señales digitales aperiódicas (porque pueden representar variaciones en los datos, como se verá en el Capítulo 6).

En transmisión de datos se usa habitualmente señales analógicas periódicas y señales digitales aperiódicas.

3.2 SEÑALES ANALÓGICAS PERIÓDICAS

Las señales analógicas se pueden clasificar en simples o compuestas. Una señal analógica simple, u **onda seno**, no puede ser descompuesta en señales más simples. Una señal analógica compuesta está formada por múltiples ondas seno.

Onda seno

La onda seno es la forma más fundamental de una señal analógica periódica. Visualizada como una única curva oscilante, su cambio a lo largo del curso de un ciclo es suave y consistente, un flujo continuo. La Figura 3.2 muestra una onda seno. Cada ciclo está formado por un único arco sobre el eje del tiempo seguido por un único arco por debajo de él.

En el Apéndice C, en el CD-ROM, se presenta una aproximación matemática a las ondas seno.

Una onda seno se puede describir completamente mediante tres características: *amplitud pico*, *periodo* o *frecuencia* y *fase*.

Amplitud pico

La **amplitud pico (máxima)** de una señal en un grafo es el valor absoluto de su intensidad más alta, proporcional a la energía que transporta. En las señales eléctricas, la amplitud pico se mide normalmente en voltios. La Figura 3.3 muestra dos señales y sus amplitudes pico.

Ejemplo 3.1

La potencia de su casa se puede representar mediante una onda seno con una amplitud pico de 230 a 260 V. Sin embargo, es de conocimiento común que la potencia en los hogares de Europa está entre 210 y 220 V.

Figura 3.2 Una onda seno.

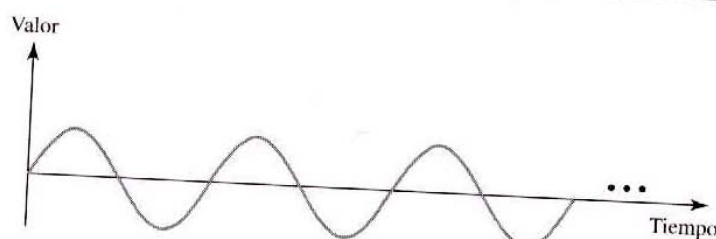
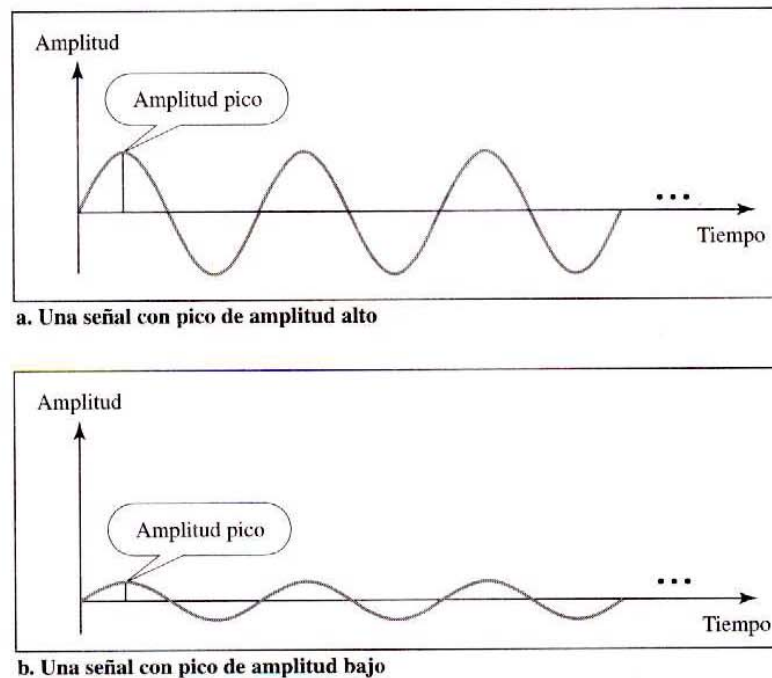


Figura 3.3 Dos señales con las misma fase y frecuencia pero distinta amplitud.

Esta discrepancia se debe al hecho de que estos son valores con raíces cuadráticas medias (rms, *root mean square*). La señal se hace cuadrada y luego se calcula el valor medio. El valor pico es igual a $2^{1/2} \times \text{rms}$.

Ejemplo 3.2

El voltaje de la batería es una constante; este valor constante se puede considerar una onda seno, como veremos más tarde. Por ejemplo, el valor pico de una batería AA es normalmente 1,5 V.

Periodo y frecuencia

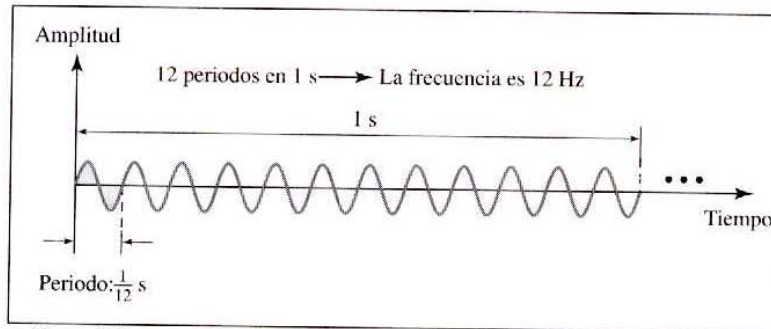
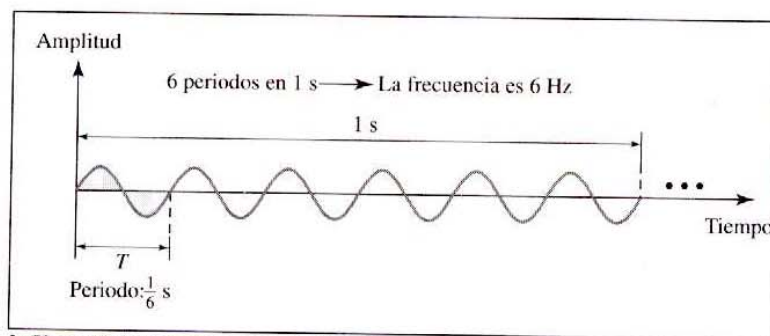
El **periodo** se refiere a la cantidad de tiempo, en segundos, que necesita una señal para completar un ciclo. La Frecuencia indica el número de periodos en un segundo. La **frecuencia** de una señal es su número de ciclos por segundo. Observe que el periodo y la frecuencia son la misma característica definida de dos formas distintas. El periodo es el inverso de la frecuencia y la frecuencia es la inversa del periodo, como muestran las fórmulas siguientes.

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{y} \quad T = \frac{1}{f}$$

La frecuencia y el periodo son inversos entre sí.

La Figura 3.4 muestra dos señales y sus frecuencias.

El periodo se expresa formalmente en segundos. La frecuencia se expresa en Herzios (Hz), que son ciclos por segundo. Las unidades del periodo y la frecuencia se muestran en la Tabla 3.1.

Figura 3.4 Dos señales con la misma amplitud y fase pero distinta frecuencia.**a.** Una señal con una frecuencia de 12 Hz**b.** Una señal con una frecuencia de 6 Hz**Tabla 3.1** Unidades del periodo y la frecuencia.

Unidad	Equivalente	Unidad	Equivalente
Segundos	1 s	Herzio (Hz)	1 Hz
Milisegundos (ms)	10^{-3} s	Kiloherzio (kHz)	10^3 Hz
Microsegundos (μ s)	10^{-6} s	Megahertzio (MHz)	10^6 Hz
Nanosegundos (ns)	10^{-9} s	Gigahertzio (GHz)	10^9 Hz
Picosegundos (ps)	10^{-12} s	TeraHerzio (THz)	10^{12} Hz

Ejemplo 3.3

La potencia eléctrica que se usa en casa tiene una frecuencia de 60 Hz (50 Hz en Europa). El periodo de esta onda seno se puede determinar como sigue:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 0,0166\text{ s} = 0,0166 \times 10^3 \text{ ms} = 16,6 \text{ ms}$$

Esto significa que el periodo de la electricidad para nuestra luz es de 0,0116 s, o 16,6 ms. Nuestros ojos no son suficientemente sensibles para distinguir cambios tan rápidos de amplitud.

Ejemplo 3.4

Expresa un periodo de 100 milisegundos en microsegundos.

Solución

En la Tabla 3.1 se puede ver que los equivalentes de 1 ms (1 ms es 10^{-3} s) y 1 s (1 s es 10^6 μ s). Se pueden hacer las sustituciones siguientes:

$$100 \text{ ms} = 100 \times 10^{-3} \text{ s} = 100 \times 10^{-3} \times 10^6 \mu\text{s} = 10^5 \mu\text{s}$$

Ejemplo 3.5

El periodo de una señal es de 100 ms. ¿Cuál es su frecuencia en Kilohercios?

Solución

Primero se cambian los 100 ms a segundos y luego se calcula la frecuencia a partir del periodo (1 Hz es 10^{-3} kHz).

$$100 \text{ ms} = 100 \times 10^{-3} \text{ s} = 10^{-1} \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10^{-1}} \text{ Hz} = 10 \text{ Hz} = 10 \times 10^{-3} \text{ kHz} = 10^{-2} \text{ kHz}$$

Más sobre la frecuencia

Ya se sabe que la frecuencia es la relación de una señal con el tiempo y que la frecuencia de una onda es el número de ciclos que completa por segundo. Pero otra forma de mirar la frecuencia es usarla como una medida de la velocidad de cambio. Las señales electromagnéticas son formas de onda oscilatoria; es decir, señales que fluctúan de forma continua y predecible por encima y por debajo de un nivel de energía medio. La velocidad a la que se mueve una onda seno desde su nivel más bajo a su nivel más alto es su frecuencia. Una señal de 40 Hz tiene la mitad de frecuencia que una señal de 80 Hz; es decir, completa un ciclo en el doble de tiempo que la señal de 80 Hz, por lo que cada ciclo tarda el doble de tiempo para ir de su nivel de voltaje mínimo al máximo. Por tanto, la frecuencia, aunque descrita en ciclos por segundo (Hz), es una medida general de la velocidad de cambio de una señal con respecto al tiempo.

La frecuencia es la velocidad de cambio respecto al tiempo. Los cambios en un espacio de tiempo corto indican frecuencia alta. Los cambios en un gran espacio de tiempo indican frecuencia baja.

Si el valor de una señal cambia en un espacio muy corto de tiempo, su frecuencia es alta. Si cambia en un espacio de tiempo largo, su frecuencia es baja.

Dos extremos

¿Qué ocurre si una señal no cambia en absoluto? ¿Qué pasa si mantiene un nivel de voltaje constante durante todo su tiempo de actividad? En ese caso, su frecuencia es 0. Conceptualmente, esta idea es sencilla. Si una señal no cambia en absoluto, nunca completa un ciclo, por tanto su frecuencia es 0 Hz.

Pero ¿qué pasa si una señal cambia instantáneamente? ¿Qué pasa si salta de un nivel a otro instantáneamente? En ese caso, su frecuencia es infinita. En otras palabras, cuando una señal cambia instantáneamente, su periodo es 0; puesto que la frecuencia es el inverso del periodo, entonces, en este caso, la frecuencia es $1/0$ o infinito (no acotado).

**Si una señal no cambia en absoluto, su frecuencia es 0.
Si una señal cambia instantáneamente, su frecuencia es infinita.**

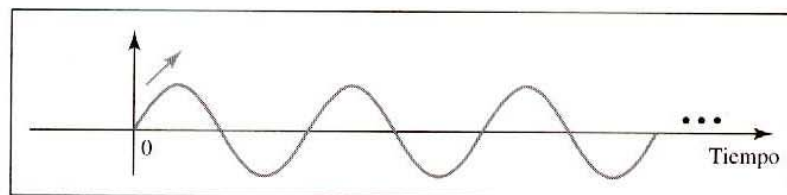
Fase

El término fase describe la posición de la onda relativa al instante de tiempo 0. Si se piensa en la onda como algo que se puede desplazar hacia delante o hacia atrás a lo largo del eje del tiempo, la fase describe la magnitud de ese desplazamiento. Indica el estado del primer ciclo.

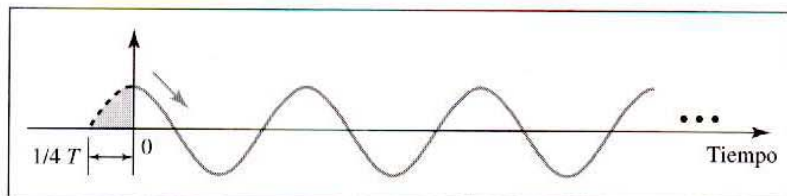
La fase describe la posición de la forma de onda relativa al instante de tiempo 0.

La fase se mide en grados o radianes (360 grados son 2π radianes). Un desplazamiento de fase de 360 grados corresponde a un desplazamiento de un periodo completo; un desplazamiento de fase de 180 grados corresponde a un desplazamiento de la mitad del periodo; un desplazamiento de fase de 90 grados corresponde a un desplazamiento de un cuarto de periodo (véase la Figura 3.5).

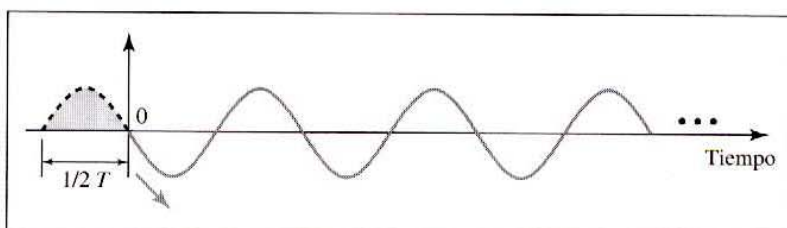
Figura 3.5 Tres ondas seno con la misma amplitud y frecuencia, pero distintas fases.



a. 0 grados



b. 90 grados



c. 180 grados

Si observamos la Figura 3.5 podemos deducir:

1. Una onda seno con una fase de 0° comienza en el tiempo 0 con una amplitud de cero. La amplitud es creciente.
2. Una onda seno con una fase de 90° comienza en el tiempo 0 con una amplitud máxima. La amplitud es decreciente.
3. Una onda seno con una fase de 180° comienza en el tiempo 0 con una amplitud de cero. La amplitud es decreciente.

Otra forma de comprender la fase en términos de desplazamiento es la siguiente:

1. Una onda seno con una fase de 0° no tiene desplazamiento.
2. Una onda seno con una fase de 90° es desplazada a la izquierda un $\frac{1}{4}$ de ciclo. Sin embargo, la señal no existe realmente en el tiempo 0.
3. Una onda seno con una fase de 180° es desplazada a la izquierda $\frac{1}{2}$ de ciclo. Sin embargo, la señal no existe realmente en el tiempo 0.

Ejemplo 3.6

Una onda seno está desplazada $\frac{1}{6}$ de ciclo respecto a tiempo 0. ¿Cuál es su fase en grados y radianes?

Solución

Sabemos que un ciclo completo son 360 grados. Por tanto, $\frac{1}{6}$ de ciclo es

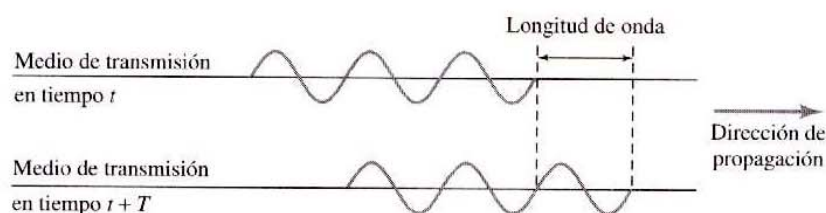
$$\frac{1}{6} \times 360 = 60^\circ = 60 \times \frac{2\pi}{360} \text{ rad} = \frac{\pi}{3} \text{ rad} = 1,046 \text{ rad}$$

Longitud de onda

La longitud de onda es otra característica de una señal que viaja a través de un medio de transmisión. La longitud de onda enlaza el periodo o la frecuencia de una única onda seno a la velocidad de propagación del medio (véase la Figura 3.6).

Mientras la frecuencia de una señal es independiente del medio, la longitud de onda depende de la frecuencia y del medio. La longitud de onda es una propiedad de cualquier tipo de señal. En la transmisión de

Figura 3.6 Longitud de onda y periodo.



datos, se usa a menudo la longitud de onda para describir la transmisión de la luz en una fibra óptica. La longitud de onda es la distancia que una señal simple puede viajar en un periodo.

La longitud de onda se puede calcular si se conoce la velocidad de propagación (la velocidad de la luz) y el periodo de la señal. Sin embargo, puesto que la frecuencia y el periodo están relacionados entre sí, si se representa la longitud de onda por λ , la velocidad de propagación por c (velocidad de la luz) y la frecuencia f , se obtiene

$$\text{Longitud de onda} = \text{velocidad de propagación} \times \text{periodo} = \frac{\text{velocidad de propagación}}{\text{frecuencia}}$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

La velocidad de propagación de las señales electromagnéticas depende del medio y de la frecuencia de la señal. Por ejemplo, en el vacío, la luz se propaga a una velocidad de 3×10^8 m/s. Esta velocidad es menor en el aire y todavía menor en un cable.

La longitud de onda se mide normalmente en micrometros (micrones) en lugar de metros. Por ejemplo, la longitud de onda de la luz roja (frecuencia = 4×10^{14}) en el aire es

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 10^{14}} = 0,75 \times 10^{-6} \text{ m} = 0,75 \mu\text{m}$$

Sin embargo, en un cable coaxial o de fibra óptica, la longitud de onda es más corta ($0,5 \mu\text{m}$) porque la velocidad de propagación disminuye en el cable.

Dominios del tiempo y la frecuencia

Una onda seno queda completamente definida mediante su amplitud, frecuencia y fase. Hasta ahora se ha estado mostrando la onda seno mediante lo que se llama una traza en el **dominio del tiempo**. La traza del dominio del tiempo muestra los cambios de la amplitud de la señal con respecto al tiempo (es una traza de la amplitud en función del tiempo). La fase no se mide explícitamente en una traza del dominio del tiempo.

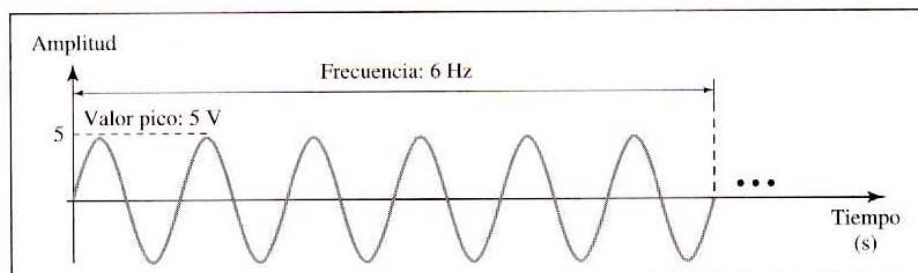
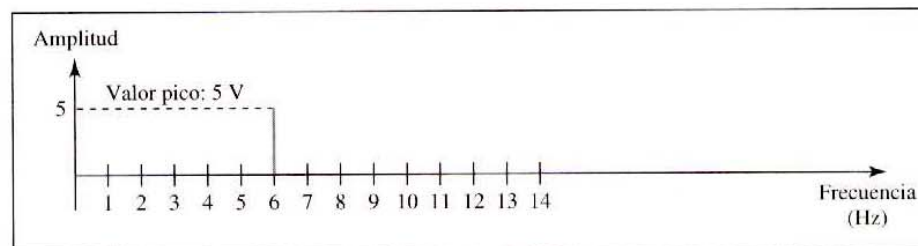
Para mostrar la relación entre amplitud y frecuencia, se puede usar lo que se denomina una traza en el **dominio de la frecuencia**. Un gráfico de esta clase tiene que ver sólo con el valor de pico y la frecuencia. La Figura 3.7 compara el dominio del tiempo y de la frecuencia.

Es obvio que en el dominio de frecuencia es más fácil dibujar y representar información que en una gráfica en el dominio del tiempo. La ventaja del dominio de frecuencia es que se puede ver inmediatamente los valores pico de frecuencia y amplitud. Una onda seno completa se representa mediante una barra. La posición de la barra muestra la frecuencia, su altura muestra la amplitud pico.

Una onda seno completa en el dominio del tiempo se puede representar mediante una única barra en el dominio de frecuencia.

Ejemplo 3.7

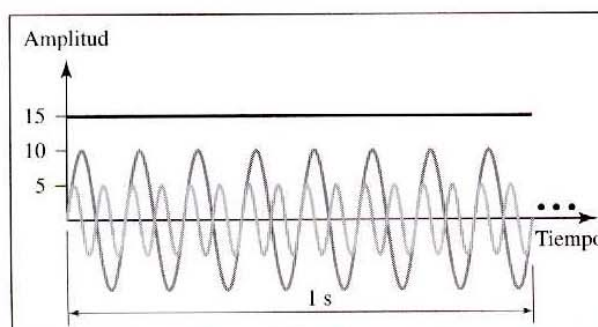
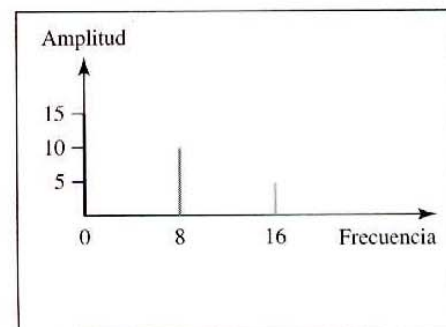
El dominio de frecuencia es más compacto y útil cuando se trabaja con más de una onda seno. La Figura 3.8 muestra tres ondas seno con frecuencias y amplitudes variables ejemplos de las trazas en el dominio del tiempo y en el de la frecuen-

Figura 3.7 Gráfica del dominio del tiempo y la frecuencia para una onda seno.**a.** Una onda seno en el dominio del tiempo (valor pico: 5 V, frecuencia: 6 Hz)**b.** La misma onda seno en el dominio de frecuencia (valor pico: 5 V, frecuencia: 6 Hz)

cia de tres señales con frecuencias y amplitudes distintas. Todas se pueden representar mediante tres barras en el dominio de frecuencia.

Señales compuestas

Hasta ahora, hemos centrado nuestra atención sobre señales periódicas simples (ondas seno). Este tipo de ondas tiene muchas aplicaciones en la vida diaria. Se puede enviar una señal seno simple para llevar energía eléctrica de un lugar a otro. Por ejemplo, la compañía eléctrica envía una onda seno con una frecuencia de 60 Hz para distribuir la energía eléctrica a hogares y negocios. Otro ejemplo es enviar una onda seno para transmitir una alarma a un centro de seguridad cuando un ladrón abre una puerta o ventana de una casa. En el primer caso, la onda seno transporta energía; en el segundo caso la onda seno es una señal de peligro.

Figura 3.8 Dominios del tiempo y la frecuencia para tres ondas seno.**a.** Representación en dominio del tiempo de tres ondas seno con frecuencias 0, 8 y 16**b.** Representación en dominio de frecuencia de las mismas tres señales

Si tuviéramos una única onda seno para transportar una conversación telefónica, no tendría sentido y no transportaría información. Sólo oiríamos un zumbido. Como se verá en los Capítulos 4 y 5, es necesario enviar una señal compuesta para comunicar datos.

Pero ¿qué ocurre con las señales periódicas que no son ondas seno? Hay muchas formas de onda útiles que no cambian de forma suave en una única curva entre una amplitud máxima y mínima; en lugar de eso saltan, se desplazan, se bambolean, tienen picos y presentan depresiones. Pero siempre que las irregularidades sean consistentes para cada ciclo, una señal sigue siendo periódica y lógicamente debe ser describible en los mismos términos que los usados para las ondas seno. De hecho, se puede demostrar que cualquier señal periódica, sin importar su complejidad, se puede descomponer en una colección de ondas seno, cada una de las cuales tiene una amplitud, frecuencia y fase que se puede medir. Una **señal compuesta** está formada por varias ondas seno simples.

Una onda seno de frecuencia única no es útil para transmitir datos; es necesario usar una señal compuesta, una señal formada por múltiples ondas seno.

A principios de 1900, el matemático francés Jean Baptiste Fourier demostró que cualquier señal compuesta es realmente una combinación de ondas simples con distintas frecuencias, amplitudes y fases. El análisis de Fourier se trata en el Apéndice C del CD-ROM; aquí sólo se presenta el concepto

De acuerdo con el Análisis de Fourier, cualquier señal compuesta es realmente una combinación de ondas simples con distintas frecuencias, amplitudes y fases. El análisis de Fourier se trata en el Apéndice C.

Una señal compuesta puede ser periódica o aperiódica. Una señal compuesta periódica se puede descomponer en una serie de ondas seno con frecuencias discretas —frecuencias con valores enteros (1, 2, 3, etc.). Una señal compuesta aperiódica se puede descomponer en una combinación o un número infinito de ondas seno simples con frecuencias continuas, frecuencias con valores reales.

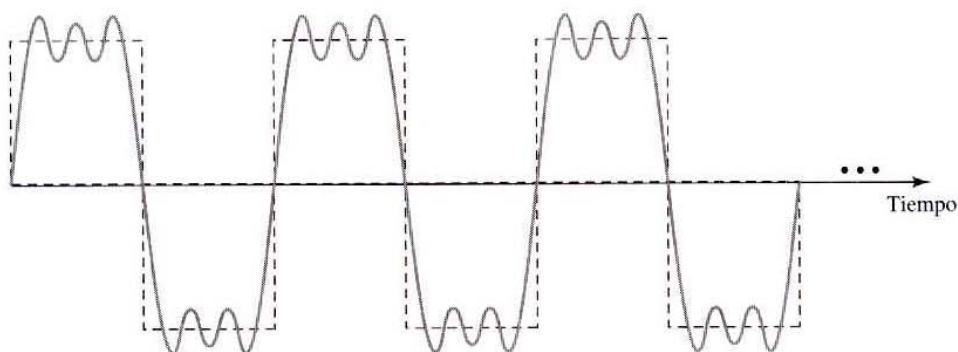
Si la señal compuesta es periódica, la descomposición da una serie de señales con frecuencias discretas; si la señal compuesta es aperiódica, la descomposición da una combinación de ondas seno con frecuencias continuas.

Ejemplo 3.8

La Figura 3.9 muestra una señal compuesta periódica con frecuencia f . Ese tipo de señal no es típica de las que se encuentran en transmisión de datos. Consideremos que puede ser tres sistemas de alarma, cada uno con frecuencia distinta. El análisis de esta señal nos puede dar una buena comprensión de cómo descomponer señales.

Es muy difícil descomponer manualmente esta señal en una serie de ondas seno. Sin embargo, hay herramientas, tanto hardware como software, que nos pueden ayudar con este trabajo. No es tema del libro saber cómo se hace; sólo nos interesan los resultados. La Figura 3.10 muestra el resultado de descomponer la señal anterior en los dominios de tiempo y frecuencia.

La amplitud de la onda seno con frecuencia f es casi la misma que la amplitud pico de la señal compuesta. La amplitud de la onda seno con frecuencia $3f$ es un tercio que la de la primera y la amplitud de la onda seno con frecuencia $9f$ es un noveno que la de la primera. La frecuencia de la onda seno con frecuencia f es la misma que la de la señal compuesta; se llama **frecuencia fundamental**, o primer **armónico**. La onda seno con frecuencia $3f$ tiene una frecuencia que es 3 veces la frecuencia fundamental; se denomina tercer armónico. La tercera onda seno con frecuencia $9f$ tiene una frecuencia 9 veces la frecuencia fundamental; se denomina noveno armónico.

Figura 3.9 Una señal compuesta periódica.

Observe que la descomposición en frecuencia de la señal es discreta; tiene frecuencias f , $3f$ y $9f$. Debido a que f es un número entero, $3f$ y $9f$ también lo son. No hay frecuencias tales como $1,2f$ o $2,6f$. El dominio de frecuencia de una señal periódica compuesta está siempre formada por barras discretas.

Ejemplo 3.9

La Figura 3.11 muestra una señal compuesta aperiódica. Puede ser la señal creada por un micrófono o un aparato de teléfono cuando se pronuncian una o dos palabras. En este caso, la señal compuesta no puede ser periódica, porque eso implica que estaríamos repitiendo la misma palabra o palabras exactamente con el mismo tono.

En una representación en dominio del tiempo de esta señal compuesta hay un número infinito de frecuencias de onda seno simples. Aunque el número de frecuencias de la voz humana es infinito, el rango es limitado. Un humano normal puede crear un rango continuo de frecuencias desde 0 hasta 4 kHz.

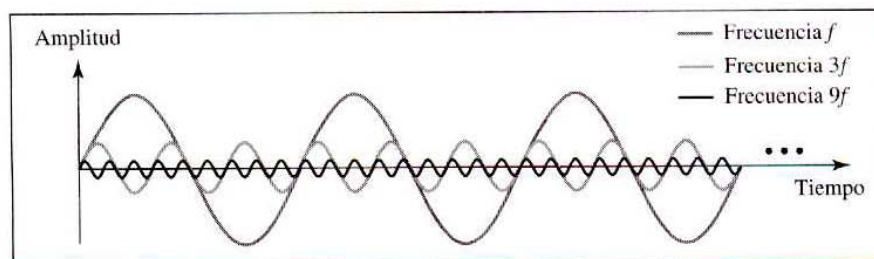
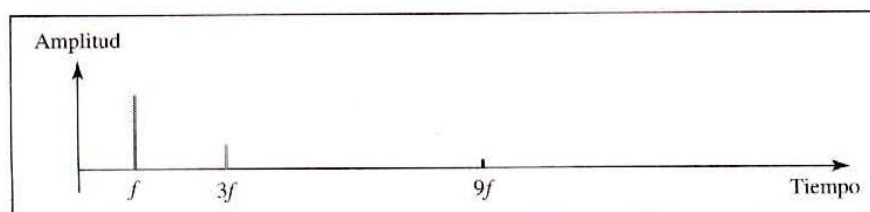
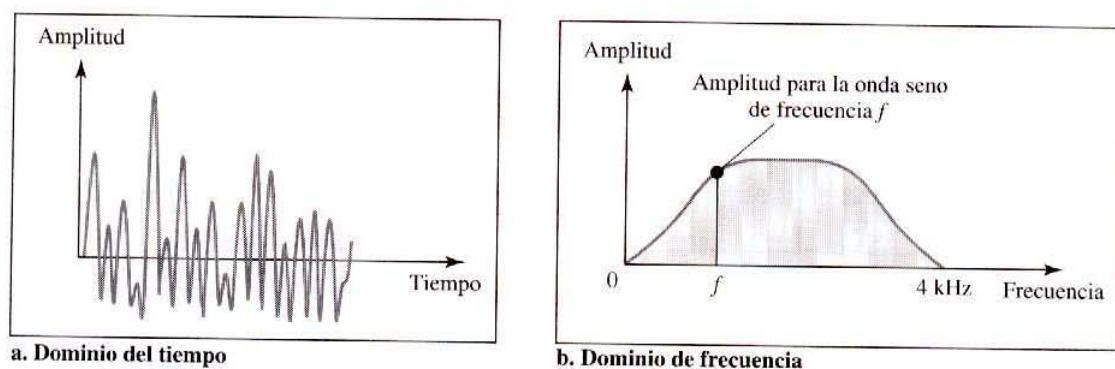
Figura 3.10 Descomposición de una señal compuesta periódica en los dominios de tiempo y frecuencia.**a.** Descomposición en dominio del tiempo de una señal compuesta**b.** Descomposición en dominio de frecuencia de la señal compuesta

Figura 3.11 Descomposición de una señal compuesta aperiódica en los dominios de tiempo y frecuencia.

Observe que la descomposición en frecuencia de la señal conduce a una curva continua. Hay un número infinito de frecuencias entre 0,0 y 4000,0 (valores reales). Para hallar la amplitud relacionada con la frecuencia f , se dibuja una recta vertical en f hasta que interseca con la curva envolvente. La altura de la línea vertical es la amplitud de la frecuencia correspondiente.

Ancho de banda

El rango de frecuencias contenido en una señal compuesta es su ancho de banda. El ancho de banda es normalmente la diferencia entre dos valores. Por ejemplo, si una señal compuesta contiene frecuencias entre 1000 y 5000, su ancho de banda es $5000 - 1000$ o 4000.

El ancho de banda de una señal compuesta es la diferencia entre la frecuencia más alta y más baja contenidas en la señal.

La Figura 3.12 muestra el concepto de ancho de banda. Esta figura muestra dos señales compuestas, una periódica y una aperiódica. El ancho de banda de la señal periódica contiene todas las frecuencias enteras entre 1000 y 5000 (1000, 1001, 1002,...). El ancho de banda de la señal aperiódica tiene el mismo rango, pero sus frecuencias son continuas.

Ejemplo 3.10

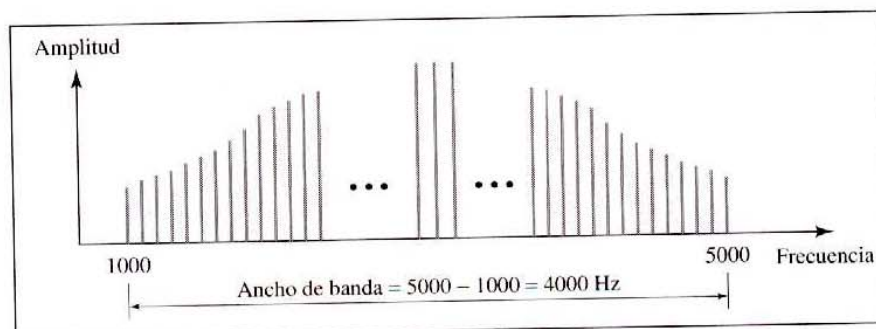
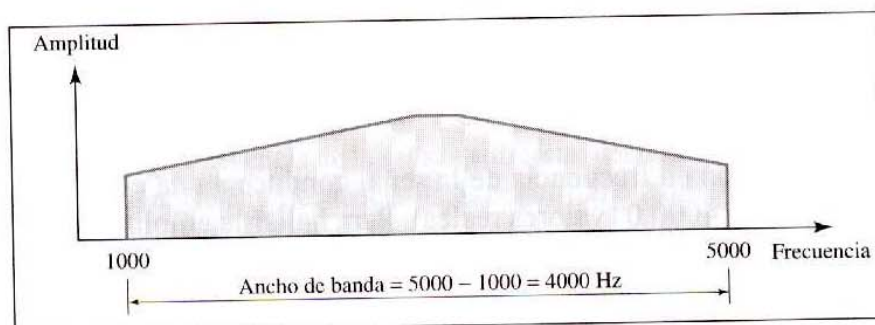
Si se descompone una señal periódica en cinco ondas seno con frecuencias 100, 300, 500, 700 y 900 Hz, ¿cuál es su ancho de banda?. Dibuje el espectro, asumiendo que todos los componentes tienen una amplitud máxima de 10 voltios.

Solución

Sea f_h la frecuencia más alta, f_l y B el ancho de banda. Entonces,

$$B = f_h - f_l = 900 - 100 = 800 \text{ Hz}$$

El espectro tiene solamente cinco barras, en 100, 300, 500, 700 y 900 (véase la Figura 3.13).

Figura 3.12 Ancho de banda de señales compuestas periódicas y aperiódicas.**a.** Ancho de banda de una señal periódica**b.** Ancho de banda de una señal no periódica**Ejemplo 3.11**

Una señal tiene un ancho de banda de 20 Hz. La frecuencia más alta es 60 Hz. ¿Cuál es la frecuencia más baja? Dibuje el espectro si la señal contiene todas las frecuencias integrales de la misma amplitud.

Solución

Sea f_h la frecuencia más alta, f_l la frecuencia más baja y B el ancho de banda. Entonces,

$$B = f_h - f_l \Rightarrow 20 = 60 - f_l \Rightarrow f_l = 60 - 20 = 40 \text{ Hz}$$

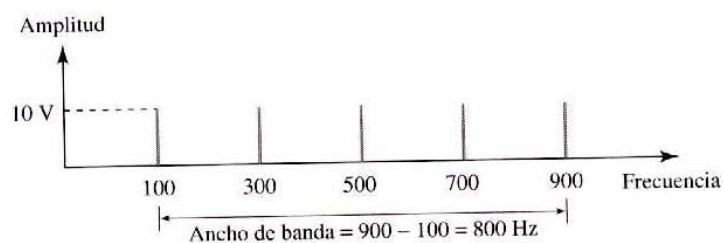
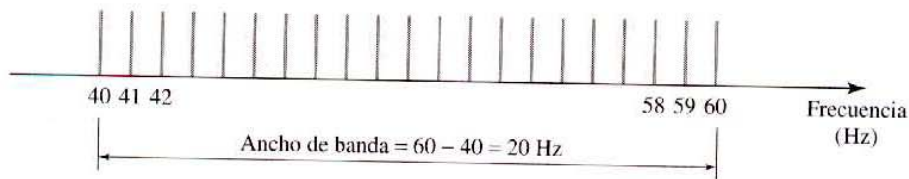
Figura 3.13 El ancho de banda del Ejemplo 3.10.

Figura 3.14 El ancho de banda del Ejemplo 3.11.

El espectro contiene todas las frecuencias integrales. Se muestran mediante una serie de barras (véase la Figura 3.14).

Ejemplo 3.12

Una señal compuesta aperiódica tiene un ancho de banda de 200 kHz, con una frecuencia media de 140 kHz y una amplitud pico de 20 V. Las dos frecuencias extremas tienen una amplitud de 0. Dibuje el dominio de frecuencia de la señal.

Solución

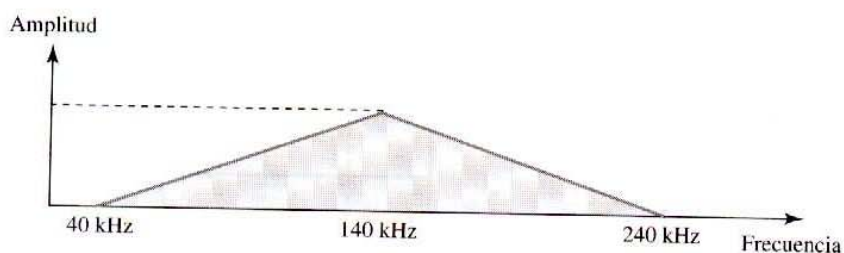
La frecuencia más baja debe estar en 40 kHz y la más alta en 240 kHz. La Figura 3.15 muestra el dominio de frecuencia y el ancho de banda.

Ejemplo 3.13

Un ejemplo de señal aperiódica compuesta es la señal propagada por una estación de radio AM. En Estados Unidos, cada estación de radio AM tiene asignado un ancho de banda de 10 kHz. El ancho de banda total dedicado a estaciones AM va desde los 530 hasta los 1700 kHz. Se verá la razón del ancho de banda de 10 kHz en el Capítulo 5.

Ejemplo 3.14

Otro ejemplo de señal compuesta aperiódica es la señal propagada por una estación de radio FM. En Estados Unidos, cada estación de radio FM tiene asignado un ancho de banda de 200 kHz. El ancho de banda total dedicado a estaciones FM va desde los 88 hasta los 108 MHz. Se verá la razón del ancho de banda de 200 kHz en el Capítulo 5.

Figura 3.15 El ancho de banda del Ejemplo 3.12.

Ejemplo 3.15

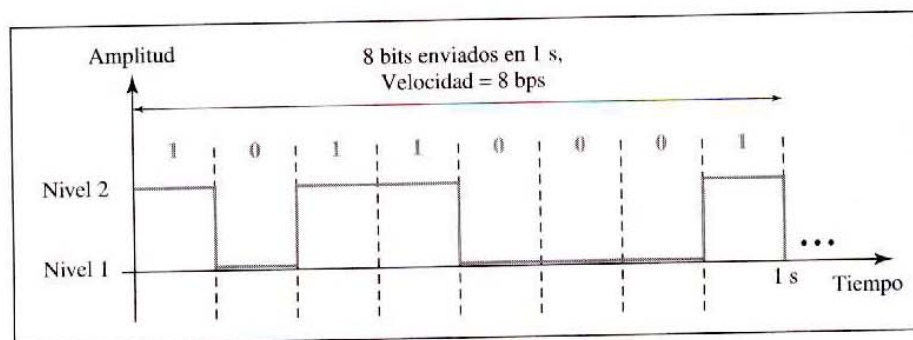
Otro ejemplo de señal compuesta aperiódica es la señal recibida por un viejo televisor en blanco y negro. La pantalla del televisor está formada por píxeles (picture elements), cada uno de los cuales es blanco o negro. La pantalla se refresca 30 veces por segundo (realmente se refresca 60 veces por segundo, pero las líneas impares se refrescan en un turno y las impares en otro de forma entrelazada). Si asumimos una resolución de 525×700 (525 líneas verticales y 700 horizontales), que es una proporción de 3:4, se tienen 367.500 píxeles por pantalla. Si se refresca 30 veces por segundo, son $367.500 \times 30 = 11.025.000$ píxeles por segundo. El escenario con el caso peor es alternar píxeles blancos y negros. En este caso, es necesario representar un color con la amplitud mínima y el otro con la amplitud máxima. Se pueden enviar 2 píxel por ciclo. Por tanto, son necesarios $11.025.000 / 2 = 5.512.500$ ciclos por segundo, o Hz. El ancho de banda necesario es 5,5125 MHz. Este escenario de caso peor tiene pocas posibilidades de ocurrir, por lo que se puede asumir que se necesita alrededor de 3,85 MHz de ancho de banda. Puesto que también se necesitan señales de audio y sincronización, se reserva un ancho de banda de 4 MHz. Para cada canal de TV en blanco y negro. Un canal analógico de TV en color tiene un ancho de banda de 6 MHz.

3.3 SEÑALES DIGITALES

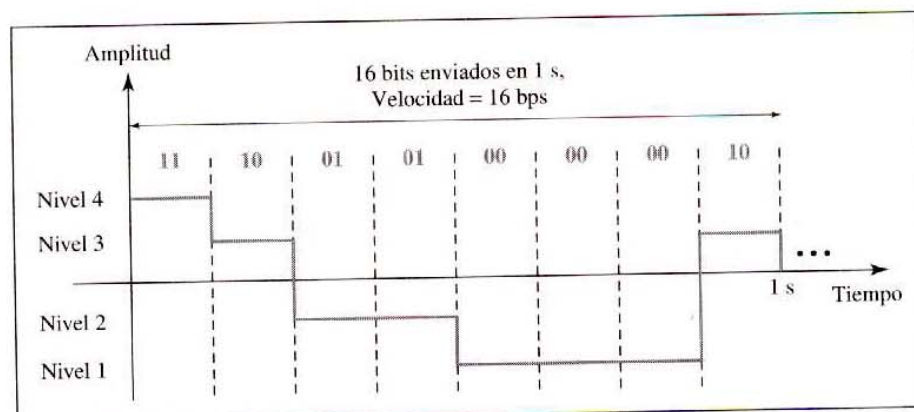
Además de poder ser representados con una señal analógica, los datos también se pueden representar mediante una señal digital. Por ejemplo, un 1 se puede codificar como un voltaje positivo y un 0 como un voltaje cero. Una señal digital puede tener más de dos niveles. En este caso, se puede enviar más de 1 bit por cada nivel. La Figura 3.16 muestra dos señales, una con dos niveles y otra con cuatro.

Se envía 1 bit por nivel en la parte a de la figura y 2 bits por nivel en la parte b de la figura. En general, si una señal tiene L niveles, cada nivel necesita $\log_2 L$ bits.

Figura 3.16 Dos señales digitales: una con dos niveles de señal y otra con cuatro niveles.



a. Una señal digital con dos niveles



b. Una señal digital con cuatro niveles

El Apéndice C del CD-ROM repasa la información sobre funciones logarítmicas y exponenciales.

Ejemplo 3.16

Una señal digital tiene ocho niveles. ¿Cuántos bits por nivel son necesarios? Se calcula el número de bits a partir de la fórmula

$$\text{Número de bits por nivel} = \log_2 8 = 3$$

Cada nivel de señal se representa por 3 bits.

Ejemplo 3.17

Una señal digital tiene 9 niveles. ¿Cuántos bits por nivel son necesarios? Se calcula el número de bits usando la fórmula. Cada nivel de señal se representa con 3,17 bits. Sin embargo, esta respuesta no es realista. El número de bits enviados por nivel tiene que ser un entero múltiplo de 2. Para este ejemplo, 4 bits pueden representar un nivel.

Tasa de bits (velocidad)

La mayoría de las señales digitales son aperiódicas y, por tanto, la periodicidad o la frecuencia no son características apropiadas. Se usa otro término para describir una señal digital: *tasa de bit* (en lugar de la frecuencia). La **tasa de bit** es el número de bits enviados en 1 s, habitualmente expresado en **bits por segundo** (bps). La Figura 3.16 muestra la tasa de bits para dos señales.

Ejemplo 3.18

Asuma que necesitamos descargar documentos de texto a una velocidad de 100 páginas por minuto. ¿Cuál es la velocidad necesaria para el canal?

Solución

Una página tiene una media de 24 líneas con 80 caracteres cada una. Si se asume que un carácter necesita 8 bits, la velocidad es

$$100 \times 24 \times 80 \times 8 = 1.636.000 \text{ bps} = 1,636 \text{ Mbps}$$

Ejemplo 3.19

Un canal de voz digitalizada, como veremos en el Capítulo 4, se forma digitalizando una señal analógica de voz de 4 kHz. Es necesario muestrear la señal al doble de su frecuencia máxima (dos muestras por herzio). Se asume que cada muestra necesita 8 bits. ¿Cuál es la velocidad necesaria?

Solución

La tasa de bits se puede calcular como

$$2 \times 4000 \times 8 = 64.000 \text{ bps} = 64 \text{ Kbps}$$

Ejemplo 3.20

¿Cuál es la velocidad necesaria para la TV de alta definición (HDTV)?

Solución

HDTV usa señales digitales para emitir señales de vídeo de alta definición. La pantalla de HDTV tiene normalmente una relación 16:9 (en contraste a 4:3 para una TV regular), lo que significa que la pantalla es mayor. Hay 1920×1080 píxeles por pantalla, y la pantalla se refresca 30 veces por segundo. Un píxel de color se representa con 24 bits. Se puede calcular la tasa de bits como

$$1920 \times 1080 \times 30 \times 24 = 1.492.992.000 \text{ bps o } 1,5 \text{ Gbps}$$

Las emisoras de TV reducen esta tasa a entre 20 y 40 Mbps usando compresión.

Intervalo de bit

Ya hemos tratado el concepto de longitud de onda para una señal analógica: la distancia que un ciclo ocupa en el medio de transmisión. Se puede definir algo similar para una señal digital: el intervalo de bit. El intervalo de bit es la distancia que ocupa un bit en el medio de transmisión.

$$\text{Intervalo de bit} = \text{velocidad de propagación} \times \text{duración del bit}$$

La señal digital como una señal analógica compuesta

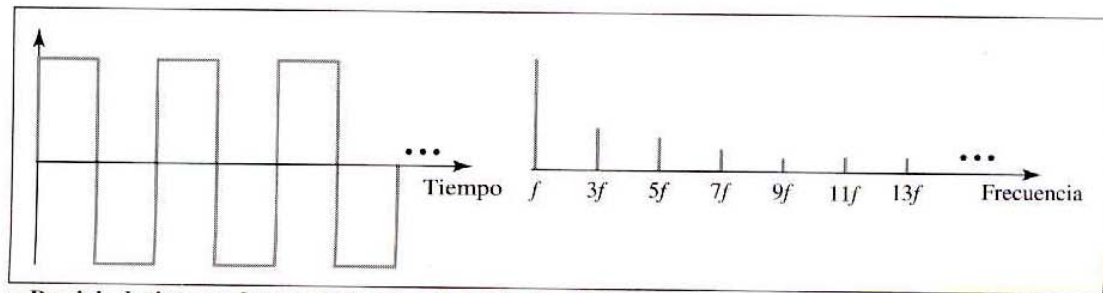
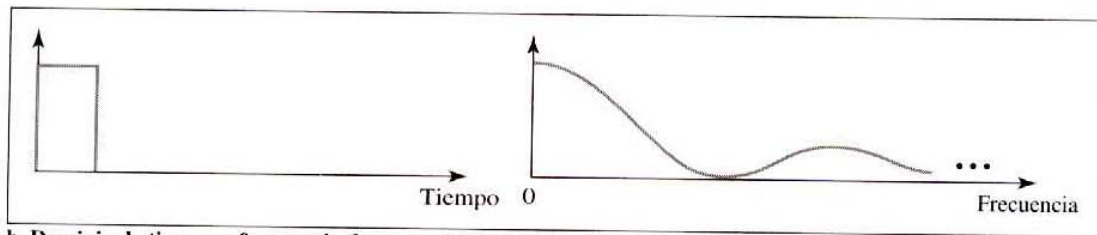
Basándose en el análisis de Fourier, una señal digital es una señal analógica compuesta. El ancho de banda es infinito, como se podría adivinar. Se puede llegar a este concepto cuando se estudia una señal digital. Una señal digital, en el dominio del tiempo, incluye segmentos horizontales y verticales conectados. Una línea vertical en el dominio de tiempo significa una frecuencia cero (no hay cambio en el tiempo). Ir de una frecuencia cero a una frecuencia infinito (y viceversa) implica que todas las frecuencias en medio son parte del dominio.

El análisis de Fourier se puede usar para descomponer una señal. Si la señal digital es periódica, lo que es raro en comunicaciones, la señal descompuesta tiene una representación en el dominio de frecuencia con un ancho de banda infinito y frecuencias discretas. Si la señal digital es aperiódica, la señal descompuesta todavía tiene un ancho de banda infinito, pero las frecuencias son continuas. La Figura 3.17 muestra una señal digital periódica y aperiódica y sus anchos de banda.

Observe que ambos anchos de banda son infinitos, pero la señal periódica tiene frecuencias discretas mientras que la aperiódica tiene frecuencias continuas.

Transmisión de señales digitales

El apartado anterior asegura que una señal digital, periódica o aperiódica, es una señal analógica compuesta con frecuencias entre cero e infinito. Para el resto de discusión, consideremos el caso de una señal digital aperiódica, similar a las que se encuentran en transmisiones de datos. La cuestión fundamental es

Figura 3.17 Dominios tiempo y frecuencia de señales digitales periódicas y aperiódicas.**a.** Dominio de tiempo y frecuencia de una señal digital periódica**b.** Dominio de tiempo y frecuencia de una señal digital aperiódica

¿cómo se puede enviar una señal digital del punto *A* al punto *B*? Se puede transmitir una señal digital usando una de las dos aproximaciones siguientes: transmisión banda base o transmisión banda ancha (usando modulación).

Transmisión banda base

La transmisión banda base significa enviar una señal digital sobre un canal sin cambiar la señal digital a una señal analógica. La Figura 3.18 muestra la transmisión **banda base**.

Una señal digital es una señal analógica compuesta con un ancho de banda infinito.

La transmisión banda base necesita la existencia de un canal paso bajo, un canal con un ancho de banda que comienza en cero. Este es el caso si se tiene un medio dedicado que tiene un único canal. Por ejemplo, todo el ancho de banda de un cable que conecta dos computadoras es un único canal. Otro ejemplo es que se pueden conectar varias computadoras a un bus, pero sólo dos se pueden comunicar al mismo tiempo. De nuevo, tenemos un canal paso bajo y se puede usar para comunicación banda base. La Figura 3.19 muestra dos canales paso bajo: uno con un ancho de banda estrecho y el otro con uno ancho. Es necesario recordar

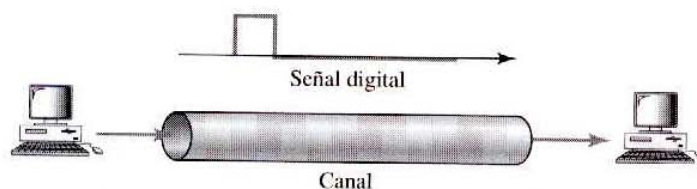
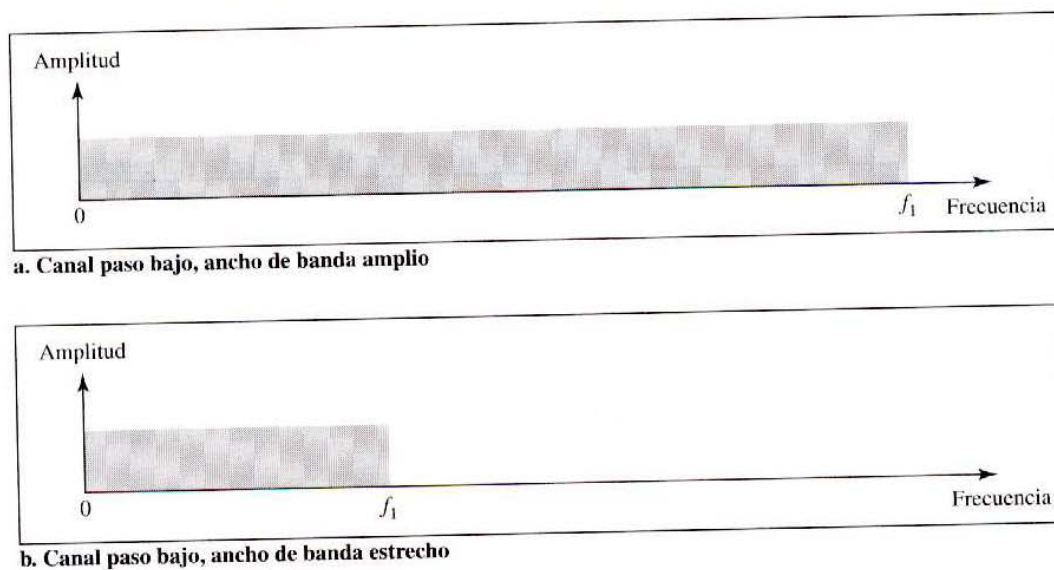
Figura 3.18 Transmisión banda base.

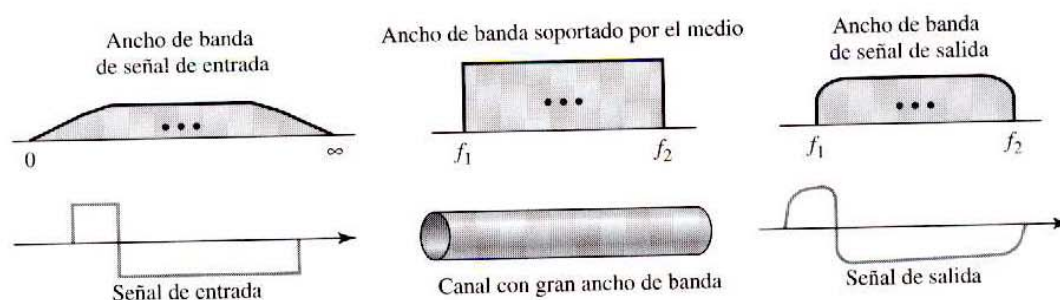
Figura 3.19 Anchos de banda de dos canales paso bajo.

que un canal paso bajo con un ancho de banda infinito es ideal, pero no se pueden tener tales canales en la vida real. Sin embargo, nos podemos aproximar.

Estudiemos dos casos de comunicación banda base: un canal paso bajo con gran ancho de banda y uno con un ancho de banda limitado.

Caso 1: Canal paso bajo con gran ancho de banda

Si se quiere conservar la forma exacta de una señal digital aperiódica con segmentos verticales y horizontales, es necesario enviar el espectro completo, el rango continuo de frecuencias entre cero e infinito. Es posible si se tiene un medio dedicado con un ancho de banda infinito entre el emisor y el receptor que conserve la amplitud exacta de cada componente de cada señal compuesta. Aunque esto es posible en una computadora (por ejemplo, entre la CPU y la memoria), no es posible entre dos dispositivos. Afortunadamente, las amplitudes de las frecuencias en los bordes del ancho de banda son tan pequeñas que se pueden ignorar. Esto significa que si hay un medio, como un cable coaxial o una fibra óptica, con un ancho de banda muy grande, dos estaciones se pueden comunicar usando señales digitales con una precisión muy grande, como se muestra en la Figura 3.20. Observe que f_1 está cerca de cero y f_2 es muy alta.

Figura 3.20 Transmisión banda base usando un medio dedicado.

Aunque la señal de salida no es una réplica exacta de la señal original, los datos todavía se pueden deducir de la señal recibida. Observe que aunque algunas frecuencias son bloqueadas por el medio, no son críticas.

La transmisión banda base de una señal digital que preserva la forma de la señal digital es posible sólo si se tiene un canal paso bajo con un ancho de banda infinito o muy grande.

Ejemplo 3.21

Un ejemplo de canal dedicado donde todo el ancho de banda del medio se usa como un único canal es una LAN. Casi cada LAN cableada usa actualmente un canal dedicado para dos estaciones que se comunican entre sí. En una LAN con topología de bus con conexiones multipunto, sólo dos estaciones se pueden comunicar entre sí simultáneamente (tiempo compartido); las otras estaciones deben evitar enviar datos. En una LAN con topología de estrella, todo el canal entre las dos estaciones y el concentrador se usa para comunicar dos entidades. Las LAN se estudian en el Capítulo 14.

Caso 2: Canal paso bajo con ancho de banda limitado

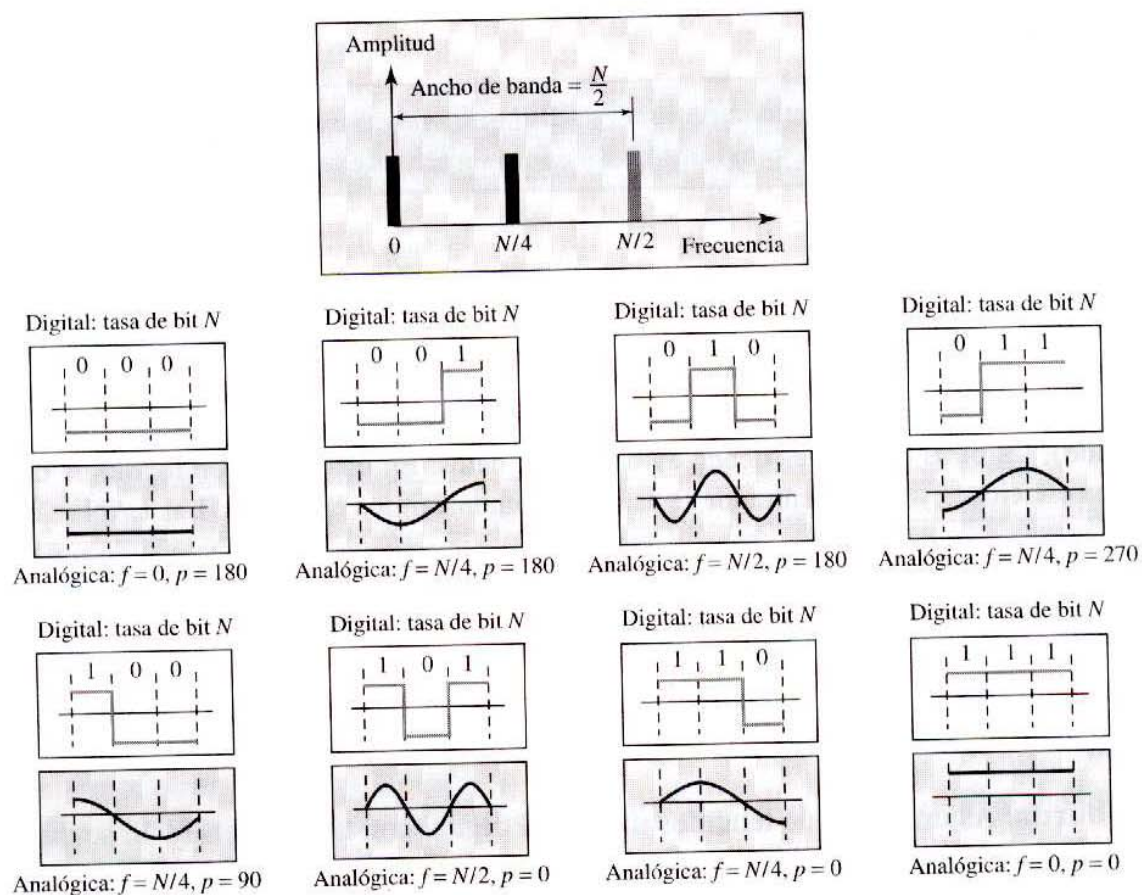
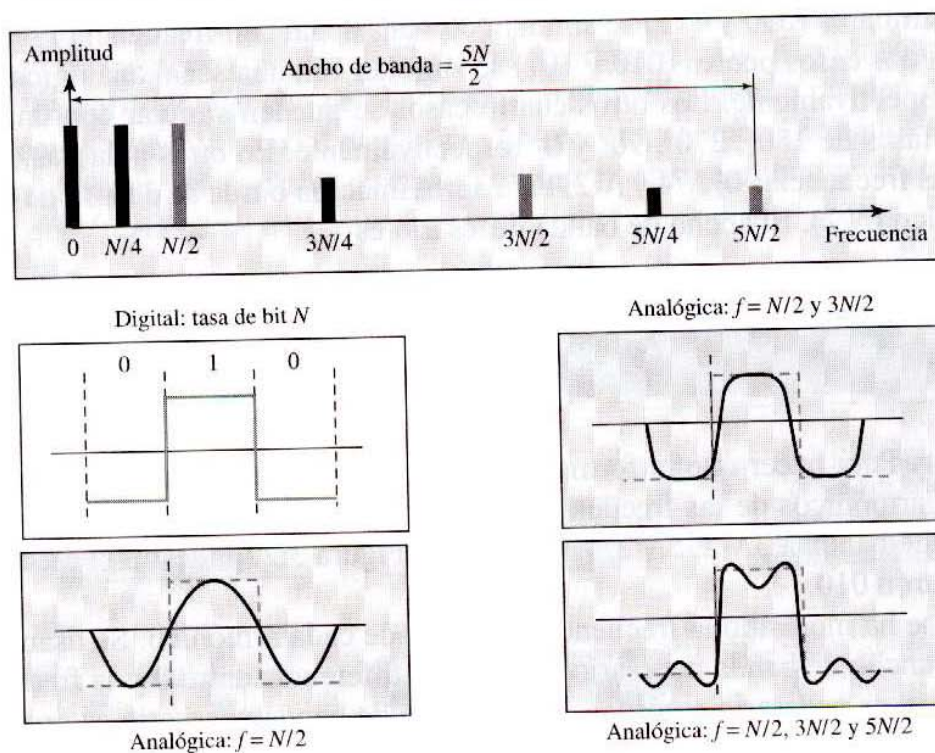
En un canal paso bajo con ancho de banda limitado, se aproxima la señal digital con una señal analógica. El nivel de aproximación depende del ancho de banda disponible.

Aproximación burda. Asumamos que tenemos una señal digital con tasa de bits N . Si se quiere enviar señales analógicas para simular aproximadamente la señal, es necesario considerar el caso peor, el número máximo de cambios en la señal digital. Esto ocurre cuando la señal lleva la secuencia 01010101... o la secuencia 10101010... Para simular estos dos casos, se necesita una señal de frecuencia $f = N/2$. Sea 1 el pico positivo y 0 el pico negativo. Se envían 2 bits por ciclo; la frecuencia de la señal analógica es la mitad de la tasa de bits, o $N/2$. Sin embargo, solo con una frecuencia no se pueden reproducir todos los patrones; se necesitan más componentes. La frecuencia máxima es $N/2$. Como ejemplo de este concepto, veamos cómo una señal digital con un patrón de 3 bits se puede simular usando señales analógicas. La Figura 3.21 muestra la idea. Los dos casos similares (000 y 111) se simulan con una señal con frecuencia $f = 0$ y fases de 180° y 0° respectivamente. Los dos casos peores (010 y 101) se simulan con una señal analógica con frecuencia $N/2$ y fases de 180° y 0° respectivamente. Los otros cuatro casos se pueden simular con una señal analógica con frecuencia $f = N/4$ y fases de 180° , 270° , 90° y 0° respectivamente. En otras palabras, necesitamos un canal que pueda manejar las frecuencias 0, $N/4$ y $N/2$. Esta aproximación burda se denomina cómo usar la frecuencia del primer armónico ($N/2$). El ancho de banda necesario es

$$\text{Ancho de banda} = \frac{N}{2} - 0 = \frac{N}{2}$$

Aproximación mejor. Para hacer que la forma de la señal analógica se parezca más a la señal digital, es necesario añadir más armónicos de las frecuencias. Es necesario incrementar el ancho de banda. Se puede incrementar el ancho de banda a $3N/2$, $5N/2$, $7N/2$, etc. La Figura 3.22 muestra el efecto de este incremento de casos peores, el patrón 010.

Observe que sólo se ha mostrado la frecuencia más alta de cada armónico. Se usan el primero, tercero y quinto armónicos. El ancho de banda necesario es $5N/2$, la diferencia entre 0 y la frecuencia más alta $5N/2$. Como se remarcó antes, es necesario recordar que el ancho de banda necesario es proporcional a la tasa de bits.

Figura 3.21 Aproximación burda de una señal digital usando el primer armónico para el caso peor.**Figura 3.22** Simulación de una señal digital con sus tres primeros armónicos.

En la transmisión banda base, el ancho de banda necesario es proporcional a la tasa de bits; si hace falta enviar los bits más rápido, se necesita más ancho de banda.

Usando este método, la Tabla 3.2 muestra cuánto ancho de banda es necesario para enviar datos a distintas velocidades.

Tabla 3.2 *Requisitos de ancho de banda.*

<i>Tasa de bit</i>	<i>Armónico 1</i>	<i>Armónico 1, 3</i>	<i>Armónico 1, 3, 5</i>
$n = 1 \text{ kbps}$	$B = 500 \text{ Hz}$	$B = 1,5 \text{ kHz}$	$B = 2,5 \text{ kHz}$
$n = 10 \text{ kbps}$	$B = 5 \text{ kHz}$	$B = 15 \text{ kHz}$	$B = 25 \text{ kHz}$
$n = 100 \text{ kbps}$	$B = 50 \text{ kHz}$	$B = 150 \text{ kHz}$	$B = 250 \text{ kHz}$

Ejemplo 3.22

¿Cuál es el ancho de banda necesario para un canal paso bajo si se necesita enviar 1 Mbps usando transmisión banda base?

Solución

La respuesta depende de la precisión deseada.

1. El ancho de banda mínimo, para una aproximación burda, es $B = \text{tasa de bit} / 2$ o 500 kHz. Se necesita un canal paso bajo con frecuencias entre 0 y 500 kHz.
2. Se consigue un mejor resultado usando los armónicos primero y tercero, siendo el ancho de banda necesario $B = 3 \times 500 \text{ kHz} = 1,5 \text{ MHz}$.
3. Se puede conseguir un resultado todavía mejor usando los armónicos primero, tercero y quinto con $B = 5 \times 500 \text{ kHz} = 2,5 \text{ MHz}$.

Ejemplo 3.23

Si se tiene un canal paso bajo con un ancho de banda de 100 kHz. ¿Cuál es el máximo ancho de banda de ese canal?

Solución

La velocidad máxima se puede conseguir usando el primer armónico. La tasa de bits es 2 veces el ancho de banda disponible, o 200 kbps.

Transmisión banda ancha (usando modulación)

La transición banda ancha o con modulación implica cambiar la señal digital a una señal analógica para su transmisión. La modulación permite usar un **canal paso banda** —un canal con un ancho de banda que no empieza en cero. Este tipo de canal está más disponible que un canal paso bajo. La Figura 3.23 muestra un canal paso banda.

Figura 3.23 Ancho de banda de un canal paso banda.

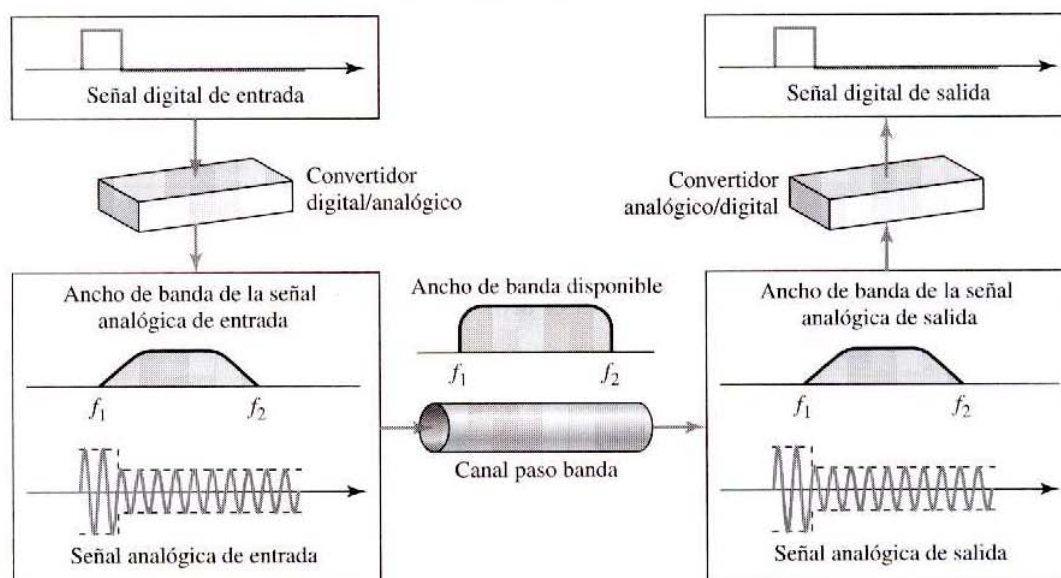
Observe que un canal paso bajo se puede considerar un canal paso banda con una frecuencia inferior que comienza en cero.

La Figura 3.24 muestra la modulación de una señal digital. En la figura, una señal digital se convierte a una señal analógica compuesta. Se ha usado una señal analógica de frecuencia única (llamada una portadora); la amplitud de la portadora se ha cambiado para que parezca como la señal digital. Sin embargo, el resultado no es una señal de frecuencia única; es una señal compuesta, como se verá en el Capítulo 5. En el receptor, la señal analógica recibida se convierte a digital, y el resultado es una réplica de lo que se ha enviado.

Si el canal disponible es un canal paso banda, no se puede enviar la señal digital directamente al canal; es necesario convertir la señal digital a una señal analógica antes de la transmisión.

Ejemplo 3.24

Un ejemplo de transmisión banda ancha usando modulación es el envío de datos de una computadora a través de una línea telefónica, la línea que conecta a un residente con la oficina central de la telefónica. Estas líneas, instaladas

Figura 3.24 Modulación de una señal digital para la transmisión sobre un canal paso banda.

hace muchos años, están diseñadas para transportar voz (una señal analógica) con un ancho de banda limitado (frecuencias entre 0 y 4 kHz). Aunque este canal se puede usar como un canal paso bajo, normalmente se considera un canal paso banda. Una razón es que el ancho de banda es tan estrecho (4 KHz) que si se trata el canal como un paso bajo y se usa transmisión banda base, la velocidad máxima que se puede conseguir es 8 kbps. La solución es considerarlo un canal paso banda, convertir la señal digital de la computadora a una señal analógica y enviar la señal analógica. Se pueden instalar dos convertidores para convertir la señal digital a analógica y viceversa en el receptor. En este caso, el convertidor se denomina MODEM (modulador/demodulador), que se estudiará en detalle en el Capítulo 5.

Ejemplo 3.25

Un segundo ejemplo es el teléfono móvil digital. Para una mejor recepción, los teléfonos móviles convierten la señal analógica de la voz a una señal digital (véase el Capítulo 16). Aunque el ancho de banda asignado a una compañía que proporciona servicios de telefonía móvil es muy grande, todavía no se puede la señal digital sin conversión. La razón es que sólo hay disponible un canal paso banda entre el que llama y el llamado. Por ejemplo, si el ancho de banda disponible es W y se permiten 1000 conversaciones simultáneas, el canal disponible es $W/1000$, sólo parte del ancho de banda total. Es necesario convertir la señal digital de voz a una señal analógica compuesta antes de enviarla. Los teléfonos móviles convierten la señal analógica de audio a una digital y luego se convierte de nuevo a una analógica para su transmisión por un canal paso banda.

Solución

3.4 DETERIORO DE LA TRANSMISION

Las señales viajan a través de medios de transmisión, que no son perfectos. Las imperfecciones pueden causar deterioros en las señales. Esto significa que la señal al principio y al final del medio es distinta. Lo que se ha enviado no es lo recibido. Habitualmente ocurren tres tipos de deterioro: atenuación, distorsión y ruido (véase la Figura 3.25).

Atenuación

La **atenuación** significa pérdida de energía. Cuando una señal, simple o compuesta, viaja a través de un medio, pierde algo de su energía para vencer la resistencia del medio. Esta es la razón por la cual los cables que llevan señales eléctricas se calientan, si no arden, después de un cierto tiempo. Parte de la energía eléctrica de la señal se convierte en calor. Para compensar esta pérdida, se usan amplificadores para amplificar la señal. La Figura 3.26 muestra el efecto de la atenuación y la amplificación.

Figura 3.25 Tipos de deterioro.

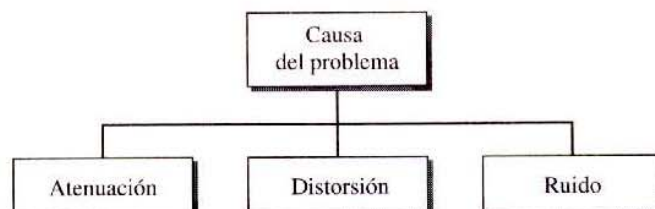
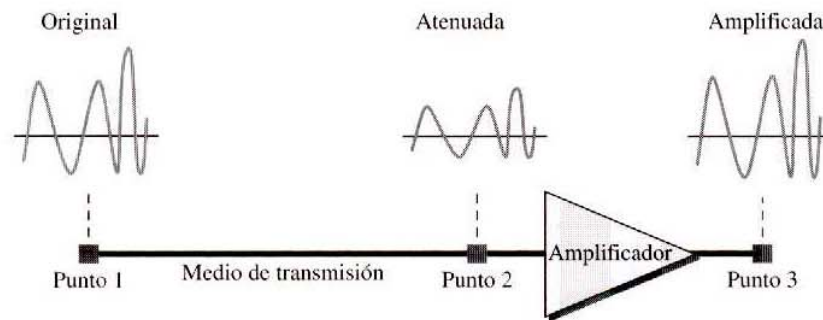


Figura 3.26 Atenuación.**Decibelio**

Para indicar que una señal ha perdido o ganado potencia, los ingenieros usan el concepto de decibelio. El decibelio (dB) mide las potencias relativas de dos señales o de una señal en dos puntos distintos. Observe que el dB es negativo si una señal se ha atenuado y positivo si una señal se ha amplificado.

$$\text{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1}$$

Las variables P_1 y P_2 son las potencias de la señal en los puntos 1 y 2, respectivamente. Observe que algunos libros de ingeniería definen el decibelio en términos de voltaje en lugar de potencia. En este caso, debido a que la potencia es proporcional al cuadrado del voltaje, la fórmula es $\text{dB} = 20 \log_{10}(V_2/V_1)$. En este texto, se expresan los dB en términos de potencia.

Ejemplo 3.26

Imagine que la señal viaja a través de un medio de transmisión y que su potencia se reduce a la mitad. Esto significa que $P_2 = (1/2) P_1$. En este caso, la atenuación (pérdida de señal) se puede calcular como

$$10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10 \log_{10} \frac{0,5 P_1}{P_1} = 10 \log_{10} 0,5 = 10(-0,3) = -3 \text{ dB}$$

Una pérdida de 3 dB (-3 dB), es equivalente a perder la mitad de potencia.

Ejemplo 3.27

Una señal pasa a través de un amplificador y su potencia se incrementa 10 veces. Esto significa que $P_2 = 10 P_1$. En este caso la amplificación (ganancia) se puede calcular como

$$10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10 \log_{10} \frac{10 P_1}{P_1} = 10 \log_{10} 10 = 10(1) = 10 \text{ dB}$$

Ejemplo 3.28

Una de las razones por la que los ingenieros usan los decibelios para medir los cambios de potencia de una señal es que los números decibelios se pueden sumar (o restar) cuando se miden varios puntos en lugar de dos (cascada). La Figura 3.27 muestra una señal que viaja una larga distancia desde el punto 1 al punto 4. La señal está atenuada para cuando alcanza el punto 2. Entre los puntos 2 y 3, se amplifica la señal. De nuevo, entre los puntos 3 y 4, la señal se atenúa. Se pueden obtener los dB resultantes para la señal sin más que sumar los dB medidos entre cada par de puntos.

En este caso, los decibelios se pueden calcular como

$$\text{dB} = -3 + 7 - 3 = +1$$

Lo que significa que la señal ha ganado potencia.

Ejemplo 3.29

A veces, el decibelio se usa para medir la potencia de la señal en milivatios. En este caso, se indica como dB_m y se calcula como $\text{dB}_m = 10 \log_{10}(P_m)$, donde P_m es la potencia en milivatios. Calcule la potencia de una señal si $\text{dB}_m = -30$.

Solución

Se calcula la potencia de la señal como

$$\begin{aligned} \text{dB}_m &= 10 \log_{10}(P_m) = -30 \\ \log_{10}(P_m) &= -3 & P_m &= 10^{-3} \text{ mW} \end{aligned}$$

Ejemplo 3.30

La pérdida en un cable se define habitualmente en decibelios por kilómetro (dB/km). Si la señal al principio del cable son $-0,3 \text{ dB/km}$ tiene una potencia de 2 mW , ¿Cuál es la potencia de la señal a los 5 km ?

Solución

La pérdida en el cable es $5 \times (-0,3) = -1,5 \text{ dB}$. Se puede calcular la potencia como

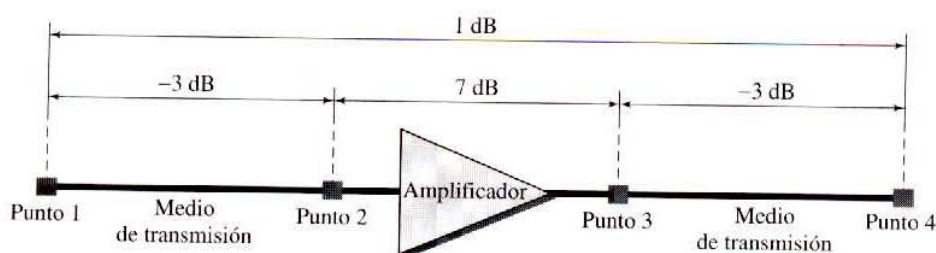


Figura 3.27 Decibelios para el ejemplo 3.28.

$$\text{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = -1,5$$

$$\frac{P_2}{P_1} = 10^{-0,15} = 0,71$$

$$P_2 = 0,71 P_1 = 0,7 \times 2 = 1,4 \text{ mW}$$

Distorsión

La distorsión significa que la señal cambia su forma de onda. La distorsión ocurre en una señal compuesta, formada por distintas frecuencias. Cada señal componente tiene su propia velocidad de propagación (vea la sección siguiente) a través del medio y, por tanto, su propio retraso en la llegada al destino final. Las diferencias en los retrasos pueden crear un desfase si el retraso no es exactamente el mismo que la duración del periodo. En otras palabras, los componentes de la señal en el receptor tienen fases distintas de las que tenían en el emisor. La forma de la señal compuesta es por tanto distinta. La Figura 3.28 muestra el efecto de la distorsión en la señal compuesta.

Ruido

El ruido es otra causa de deterioro. Hay varios tipos de ruido, como el ruido térmico, ruido inducido, cruces y ruidos de impulsos que pueden corromper una señal. El ruido térmico se debe al movimiento aleatorio de electrones en un cable que crea una señal extra no enviada originalmente por el transmisor. El ruido inducido se debe a fuentes externas tales como motores y electrodomésticos. Estos dispositivos actúan como antenas emisoras y el medio de transmisión actúa como la antena receptora. Los cruces se deben al efecto de un cable sobre otro. Un cable actúa como una antena emisora y el otro como una antena receptora. El ruido de impulso es un pico (una señal con energía alta en un periodo de tiempo muy corto) que viene de líneas de potencia, iluminación, etc. La Figura 3.29 muestra el efecto del ruido sobre una señal. El error se trata en el Capítulo 10.

Razón entre señal y ruido

Como veremos más tarde, para hallar los límites teóricos de velocidad, es necesario conocer la relación (razón) entre la potencia de la señal y del ruido. La razón señal- ruido se define como

Figura 3.28 Distorsión.

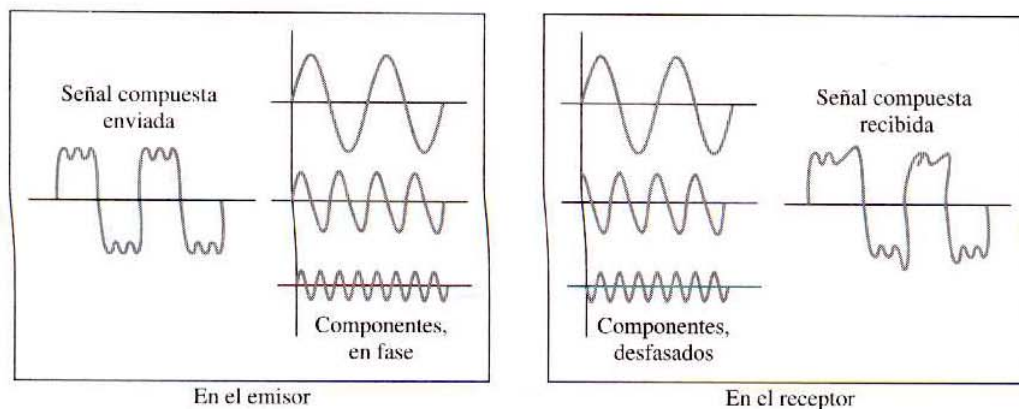
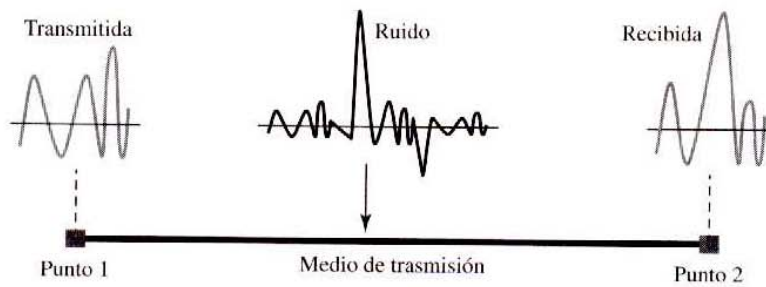


Figura 3.29 Ruido.

$$\text{SNR} = \frac{\text{potencia media de la señal}}{\text{potencia media del ruido}}$$

Es necesario considerar la potencia media de la señal y la del ruido porque la potencia puede cambiar con el tiempo. La Figura 3.30 muestra el concepto del SNR.

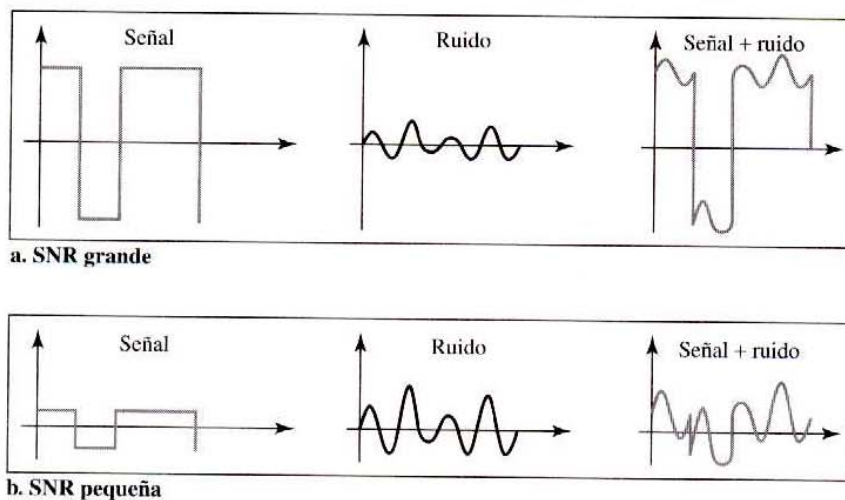
SNR es realmente la razón entre lo que se quiere (señal) y lo que no se quiere (ruido). Una SNR alta indica que la señal está menos corrompida por ruido; una SNR baja indica que la señal está muy corrompida por el ruido.

Debido a que SNR es la razón de dos potencias, se describe a menudo en decibelios, definida como

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \text{SNR}$$

Ejemplo 3.31

La potencia de una señal es 10 mW y la potencia del ruido es 1 μW ; ¿Cuáles son los valores de SNR y de SNR_{dB} ?

Figura 3.30 Dos casos de SNR: una SNR alta y una baja.

Solución

Los valores de SNR y de SNR_{dB} se pueden calcular como sigue

$$\text{SNR} = \frac{10.000 \mu\text{W}}{1 \text{ mW}} = 10.000$$

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} 10.000 = 10 \log_{10} 10^4 = 40$$

Ejemplo 3.32

Los valores de SNR y de SNR_{dB} para un canal sin ruido son

$$\text{SNR} = \frac{\text{potencia señal}}{0} = \infty$$

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \infty = \infty$$

No se puede conseguir esta ratio en la vida real; es un ideal.

3.5 LÍMITES DE LA VELOCIDAD DE DATOS

Una consideración importante en la transmisión de datos es lo rápido que se pueden enviar por un canal, en bits por segundo. La velocidad de los datos depende de tres factores:

1. El ancho de banda disponible.
2. Los niveles de señal que se usan.
3. La calidad del canal (el nivel de ruido).

Se han desarrollado dos fórmulas teóricas para calcular la tasa de datos: la de Nyquist para un canal sin ruido y la de Shannon para un canal ruidoso.

Canal sin ruido: Tasa de bits de Nyquist

La fórmula de la tasa de bits de Nyquist define la máxima velocidad teórica para un canal sin ruido

$$\text{TasadeBits} = 2 \times \text{ancho banda} \times \log_2 L$$

En esta fórmula, el ancho de banda es el ancho de banda del canal, L es el número de niveles de señal usados para representar los datos y la tasa de datos es la velocidad de los datos en bits por segundo.

De acuerdo con la fórmula, se podría pensar que, dado un ancho de banda específico, se puede conseguir cualquier velocidad incrementando el número de niveles de la señal. Aunque la idea es teóricamente correcta, en la práctica existe un límite. Cuando se incrementa el número de niveles de la señal, se impone una carga en el receptor. Si el número de niveles es sólo 2, el receptor puede distinguir fácilmente entre 0 y 1. Si los niveles de la señal son 64, el receptor debe ser muy sofisticado para distinguirlos. En otras palabras, incrementar los niveles de la señal reduce la fiabilidad del sistema.

Incrementar los niveles de la señal reduce la fiabilidad del sistema.

Ejemplo 3.33

¿Se ajusta la velocidad del teorema de Nyquist con la descrita intuitivamente en la transmisión banda base?

Solución

Coinciden cuando sólo hay dos niveles. En transmisión banda base, se dijo que la tasa de bits es 2 veces el ancho de banda sólo si se usa el primer armónico en el caso peor. Sin embargo, la fórmula de Nyquist es más general que la que se derivó intuitivamente; se puede aplicar a transmisión banda base y modulación. También se puede aplicar cuando hay dos o más niveles de señal.

Ejemplo 3.34

Considere un canal sin ruido con un ancho de banda de 3000 Hz transmitiendo una señal con dos niveles. La velocidad máxima se puede calcular como

$$T_{\text{adeBits}} = 2 \times 3000 \times \log_2 2 = 6000 \text{ bps}$$

Ejemplo 3.35

Considere el mismo canal sin ruido transmitiendo una señal con 4 niveles (por cada nivel se envían 2 bits). La velocidad máxima se puede calcular como

$$T_{\text{adeBits}} = 2 \times 3000 \times \log_2 4 = 12.000 \text{ bps}$$

Ejemplo 3.36

Necesitamos enviar 256 kbps por un canal sin ruido con un ancho de banda de 20 kHz. ¿Cuántos niveles de señal son necesarios?

Solución

Se puede usar la fórmula de Nyquist como sigue:

$$\begin{aligned} 265.000 &= 2 \times 20.000 \times \log_2 L \\ \log_2 L &= 6,625 & L &= 2^{6,625} = 98,7 \text{ niveles} \end{aligned}$$

Puesto que el resultado no es una potencia de 2, es necesario incrementar el número de niveles o reducir la velocidad. Si se tienen 128 niveles, la velocidad es de 280 kbps. Si se usan 64 niveles, la velocidad es de 240 kbps.

Canal con ruido: Capacidad de Shannon

En la realidad no se puede tener un canal sin ruido; el canal es siempre ruidoso. En 1944, Claude Shannon definió una fórmula, denominada Capacidad de Shannon, para determinar la máxima tasa de datos teórica de un canal:

$$\text{Capacidad} = \text{Ancho de banda} \times \log_2 (1 + \text{SNR})$$

En esta fórmula, ancho de banda es el ancho de banda del canal, SNR es la razón señal-ruido y Capacidad es la capacidad del canal en bits por segundo. Observe que en la fórmula de Shannon no hay indicación del nivel de señal, lo que significa que no importa los niveles que tengamos, no se puede conseguir una velocidad mayor que la capacidad del canal. En otras palabras, la fórmula define una característica del canal, no el método de transmisión.

Ejemplo 3.37

Sea un canal extremadamente ruidoso en el cual el valor de la relación señal-ruido es casi cero. En otras palabras, el ruido es tan alto que la señal es muy débil. Para este canal, la capacidad C se calcula como:

$$C = B \log_2 (1 + \text{SNR}) = B \log_2 (1 + 0) = B \log_2 1 = B \times 0 = 0$$

Esto significa que la capacidad de este canal es 0 independientemente de su ancho de banda. En otras palabras, no se pueden recibir datos a través de este canal.

Ejemplo 3.38

Vamos a calcular la tasa de bit máxima teórica para una línea telefónica regular. Una línea telefónica tiene habitualmente un ancho de banda de 3000 Hz (300 Hz a 3300 Hz). La razón ruido-señal es habitualmente 3162 (35 dB). La capacidad de este canal se calcula como

$$\begin{aligned} C &= B \log_2 (1 + \text{SNR}) = 3000 \log_2 (1 + 3162) = 3000 \log_2 (3163) \\ &= 3000 \times 11,62 = 34.860 \text{ bps} \end{aligned}$$

Esto significa que la tasa de bit máxima para una línea telefónica es 34,860 Kbps. Si se quiere enviar datos más rápido sería necesario incrementar el ancho de banda de la línea o mejorar la razón ruido-señal.

Ejemplo 3.39

La razón señal-ruido se expresa a menudo en decibelios. Asuma que $\text{SNR}_{\text{dB}} = 36$ y que el ancho de banda del canal es MHz. La capacidad teórica del canal se puede calcular como

$$\begin{aligned} \text{SNR}_{\text{dB}} &= 10 \log_{10} \text{SNR} \rightarrow \text{SNR} = 10^{\text{SNR}_{\text{dB}} / 10} \rightarrow \text{SNR} = 10^{3,6} = 3981 \\ C &= B \log_2 (1 + \text{SNR}) = 2 \times 10^6 \times \log_2 3982 = 24 \text{ Mbps} \end{aligned}$$

Ejemplo 3.40

Para propósitos prácticos, cuando el SNR es muy alto, se puede asumir que $\text{SNR} + 1$ es casi la misma que SNR. En estos casos, la capacidad teórica del canal se puede simplificar como

$$C = B \times \frac{\text{SNR}_{\text{dB}}}{3}$$

Por ejemplo, se puede calcular la capacidad teórica del ejemplo anterior como

$$C = 2 \text{ MHz} \times \frac{36}{3} = 24 \text{ Mbps}$$

Usando ambos límites

En la práctica, es necesario usar ambos métodos para encontrar los límites y los niveles de la señal. Mostremoslo con un ejemplo.

Ejemplo 3.41

Se tiene un canal con un ancho de banda de 1 MHz. El SNR de este canal es 63. ¿Cuáles son la velocidad y el nivel de la señal apropiados?

Solución

Primero se usa la fórmula de Shannon para encontrar el límite superior

$$C = B \log_2 (1 + \text{SNR}) = 10^6 \log_2 (1 + 63) = 10^6 \log_2 64 = 6 \text{ Mbps}$$

La fórmula de Shannon nos da 6 Mbps, el límite superior. Para lograr un rendimiento mejor se elige algo inferior, como por ejemplo 4 Mbps. Luego se usa la fórmula de Nyquist para hallar el número de niveles de la señal.

$$4 \text{ Mbps} = 2 \times 1 \text{ MHz} \times \log_2 L \rightarrow L = 4$$

**La capacidad de Shannon nos da el límite superior;
la fórmula de Nyquist nos dice cuántos niveles de señal son necesarios.**

3.6 PRESTACIONES

Hasta ahora se han estudiado las herramientas para transmitir datos (señales) por una red y cómo se comportan los datos. Un aspecto importante en redes son las prestaciones (rendimiento) de la red—¿cómo es de buena? En el Capítulo 24 se trata la calidad de servicio y la medida de las prestaciones globales de una red con gran detalle. En esta sección se presentan términos que se necesitarán en capítulos futuros.

Ancho de banda

Una característica que mide las prestaciones de la red es el ancho de banda. Sin embargo, el término se puede usar en dos contextos distintos con dos diferentes valores a medir para el ancho de banda: en hercios y en bits por segundo.

Ancho de banda en hercios

Ya hemos tratado este concepto. El ancho de banda en hercios es el rango de frecuencias contenidas en una señal compuesta o el rango de frecuencias que un canal puede pasar. Se puede decir, por ejemplo, que el ancho de banda de una línea telefónica de un abonado es 4 kHz.

Ancho de banda en bits por segundo

El término *ancho de banda* también se puede referir al número de bits por segundo que un canal, un enlace, o incluso una red puede transmitir. Por ejemplo, se puede decir que el ancho de banda de una red Fast Ethernet (o el enlace de esta red) es como máximo 100 Mbps. Lo que significa que esta red puede enviar 100 Mbps.

Relación

Hay una relación explícita entre ambos anchos de banda. Básicamente, un incremento del ancho de banda en hercios significa un incremento del ancho de banda en bits por segundo. Esta relación depende de si se usa transmisión banda base o transmisión con modulación. Esta relación se trata en los Capítulos 4 y 5.

En redes se usa el término *ancho de banda* en dos contextos.

- ☐ El primero, *ancho de banda en hercios*, es el rango de frecuencias contenidas en una señal compuesta o el rango de frecuencias que un canal puede pasar.
- ☐ El segundo, *ancho de banda en bits por segundo*, se puede refiere a la velocidad de transmisión de bits en un canal o enlace.

Ejemplo 3.42

El ancho de banda de una línea telefónica de abonado es 4 kHz para voz o datos. El ancho de banda de esta línea para transmisión de datos puede llegar hasta 56.000 bps usando un sofisticado MODEM para convertir la señal digital y analógica.

Ejemplo 3.43

Si la compañía telefónica mejora la calidad de la línea e incrementa el ancho de banda a 8 kHz, se pueden enviar 112.000 bps usando la misma tecnología que se explicó en el Ejemplo 3.42.

Rendimiento (Throughput)

El rendimiento mide lo rápido que se pueden enviar datos realmente a través de una red. Aunque a primera vista el ancho de banda en bits por segundo y el rendimiento parecen lo mismo, son distintos. Un enlace puede tener un ancho de banda de B bps, pero sólo se pueden enviar T bps a través de este enlace, donde T es siempre menor que B . En otras palabras, el ancho de banda es una medida potencial de un enlace; el rendimiento es la medida real de lo rápido que se pueden enviar los datos. Por ejemplo, se puede tener un enlace de 1 Mbps de ancho de banda, pero que los dispositivos de los extremos de la línea puedan manejar sólo 200 kbps. Esto significa que no se pueden enviar más de 200 kbps a través de este enlace.

Imagine una autopista diseñada para transmitir 1000 coches por minuto de un punto a otro. Sin embargo, si hay un atasco en la carretera, este número se puede reducir a 100 coches por minuto. El ancho de banda es 1000 coches por minuto; el rendimiento es 100 coches por minuto.

Ejemplo 3.44

Una red con un ancho de banda de 10 Mbps puede pasar sólo una media de 12.000 tramas por minuto, con cada trama llevando una media de 10.000 bits. ¿Cuál es el rendimiento de esta red?

Solución

Se puede calcular el rendimiento como

$$\text{Rendimiento} = 12.000 \times 10.000 / 60 = 2 \text{ Mbps}$$

En este caso, el rendimiento es casi un quinto del ancho de banda.

Latencia (Retraso)

La latencia, o retraso, define cuánto tarda un mensaje completo en llegar a su destino desde el momento en que el primer bit es enviado por el origen. Se puede decir que la latencia tiene cuatro componentes: **tiempo de propagación, tiempo de transmisión, tiempo de encolamiento y retraso de procesamiento.**

$$\text{Latencia} = \text{tiempo de propagación} + \text{tiempo de transmisión} + \text{tiempo de encolamiento} + \text{retraso de procesamiento}$$

Tiempo de propagación

El tiempo de propagación mide el tiempo necesario para que un bit viaje del origen al destino. El tiempo de propagación se calcula dividiendo la distancia por la velocidad de propagación.

$$\text{Tiempo de propagación} = \frac{\text{Distancia}}{\text{Velocidad de propagación}}$$

La velocidad de propagación de las señales electromagnéticas depende del medio y de la frecuencia de la señal. Por ejemplo, en el vacío la luz se propaga con una velocidad de 3×10^8 m/s. Es menor en el aire y mucho menor en un cable.

Ejemplo 3.45

¿Cuál es el tiempo de propagación si la distancia entre dos puntos es 12.000 km? Asuma que la velocidad de propagación es $2,4 \times 10^8$ m/s en el cable.

Solución

Se puede calcular el tiempo de propagación como

$$\text{Tiempo de propagación} = \frac{12.000 \times 1000}{2,4 \times 10^8} = 50 \text{ m}$$

El ejemplo muestra que un bit puede cruzar el Océano Atlántico en sólo 50 ms si hay un cable directo entre el origen y el destino.

Tiempo de transmisión

En transmisión de datos no solo se envía un bit, se envía un mensaje. El primer bit puede tardar tanto como el tiempo de propagación para llegar al destino; el último bit también puede tardar la misma cantidad de tiempo. Sin embargo, hay un tiempo entre el primer bit que sale del origen y el último bit que llega al destino. El primer bit sale antes y llega antes; el último bit sale más tarde y llega más tarde. El tiempo necesario para la transmisión de un mensaje depende del tamaño del mensaje y del ancho de banda del canal.

$$\text{Tiempo de propagación} = \frac{\text{Tamaño del mensaje}}{\text{Ancho de banda}}$$

Ejemplo 3.46

¿Cuál es el tiempo de propagación y el de transmisión para un mensaje de 2,5 kbytes (un e-mail) si el ancho de banda de la red es 1 Gbps? Asuma que la distancia entre el emisor y el receptor es 12.000 km y que la luz viaja a $2,4 \times 10^8$ m/s.

Solución

Se pueden calcular los tiempos de propagación y el de transmisión como

$$\begin{aligned}\text{Tiempo de propagación} &= \frac{12.000 \times 1000}{2,4 \times 10^8} = 50 \text{ ms} \\ \text{Tiempo de transmisión} &= \frac{2.500 \times 8}{10^9} = 0,020 \text{ ms}\end{aligned}$$

Observe que en este caso, debido a que el mensaje es corto y el ancho de banda es alto, el factor dominante es el tiempo de propagación, no el tiempo de transmisión. El tiempo de transmisión se puede ignorar.

Ejemplo 3.47

¿Cuál es el tiempo de propagación y el de transmisión para un mensaje de 5 Mbytes (una imagen) si el ancho de banda de la red es 1 Mbps? Asuma que la distancia entre el emisor y el receptor es 12.000 km y que la luz viaja a $2,4 \times 10^8$ m/s.

Solución

Se pueden calcular los tiempos de propagación y el de transmisión como

$$\begin{aligned}\text{Tiempo de propagación} &= \frac{12.000 \times 1000}{2,4 \times 10^8} = 50 \text{ ms} \\ \text{Tiempo de transmisión} &= \frac{5.000.000 \times 8}{10^6} = 40 \text{ s}\end{aligned}$$

Observe que en este caso, debido a que el mensaje es muy largo y el ancho de banda no es muy alto, el factor dominante es el tiempo de transmisión, no el tiempo de propagación. El tiempo de propagación se puede ignorar.

Tiempo de encolamiento

El tercer componente de la latencia es el tiempo de encolamiento., es decir, el tiempo necesario para que cada dispositivo intermedio o terminal mantenga el mensaje en espera antes de que pueda ser procesado. El tiempo de encolamiento no es un factor fijo; cambia con la carga impuesta sobre la red. Cuando hay un tráfico pesado en la red, el tiempo de encolamiento aumenta. Un dispositivo intermedio, como un enrutador, encola los mensajes que llegan y los procesa uno por uno. Si hay muchos mensajes, todos los mensajes tendrán que esperar.

Producto ancho de banda – Retraso

El ancho de banda y el retraso son dos medidas de rendimiento de un enlace. Sin embargo, como veremos en este capítulo y los futuros, lo que es importante en transmisión de datos es el producto de ambos, es decir el producto ancho de banda-retraso. Pensemos en este tema usando dos ejemplos hipotéticos.

❑ **Caso 1.** La Figura 3.31 muestra el caso 1.

Asumamos que tenemos un enlace con un ancho de banda de 1 bps (no realista pero bueno a efectos demostrativos). Asumamos también que el retraso del enlace es 5 s (también poco realista). Queremos ver qué significa el producto ancho de banda-retraso en este caso. Mirando a la figura, se puede decir que este producto 1×5 es el máximo número de bits que pueden llenar el enlace. No puede haber más de 5 bits simultáneamente en el enlace.

❑ **Caso 2.** Asuma ahora que se tiene un ancho de banda de 4 bps. La Figura 3.32 muestra que hay un máximo de $4 \times 5 = 20$ bits en la línea. La razón es que, por cada segundo, hay 4 bits en la línea; la duración de cada bit es de 0,25 s.

Los dos casos anteriores muestran que el producto del ancho de banda y el retraso es el número de bits que pueden llenar el enlace. Esta medida es importante si necesitamos enviar datos en ráfagas y esperar la confirmación de cada ráfaga antes de enviar la siguiente. Para usar la máxima capacidad del enlace es necesario hacer que el tamaño de cada ráfaga sea 2 veces el producto del ancho de banda y el retraso; es necesario rellenar el canal duplex (dos direcciones). El emisor debería enviar una ráfaga de datos de $(2 \times \text{ancho de banda} \times \text{retraso})$ bits. El emisor debe esperar después la confirmación del receptor de esa ráfaga antes de

Figura 3.31 Llenando el enlace de bits para el caso 1.

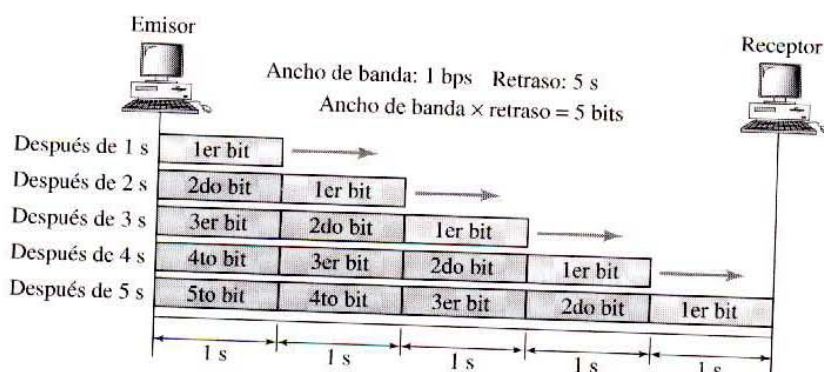
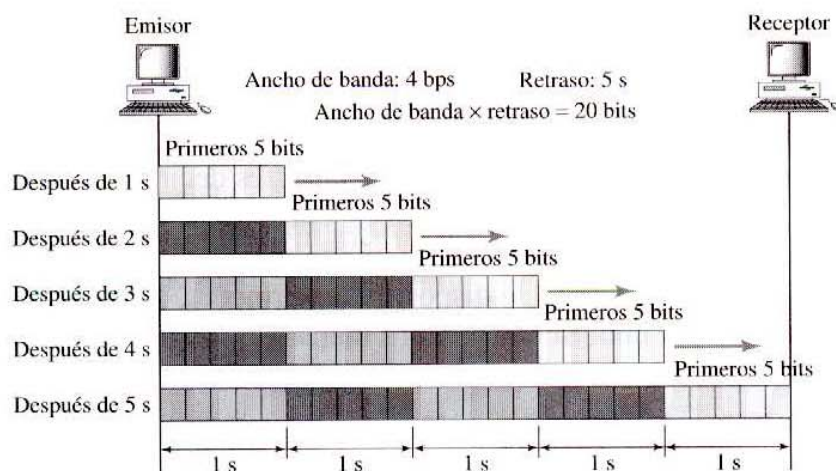


Figura 3.32 Llenando el enlace de bits para el caso 2.

enviar otra. La cantidad $2 \times \text{ancho de banda} \times \text{retraso}$ es el número de bits que se pueden transmitir en cualquier instante.

El producto ancho de banda-retraso define el número de bits que pueden llenar el canal.

Ejemplo 3.48

Se puede pensar en el enlace entre dos puntos como en una tubería. La sección transversal de la tubería representa el ancho de banda y la longitud el retraso. Se puede decir que el volumen de la tubería define el producto ancho de banda-retraso, como se muestra en la Figura 3.33.

Retraso variable (Jitter)

Otra medida de rendimiento relacionada con el retraso es el jitter. A groso modo se puede decir que el **jitter** es un problema si distintos paquetes de datos llegan con distintos retrasos y la aplicación que usa los datos en el lado del receptor es sensible al tiempo (por ejemplo, datos de audio y vídeo). Si el retraso del primer paquete es 20 ms, el del segundo es 45 ms y el tercero es 40 ms, entonces la aplicación de tiempo real que usa los paquetes debe hacer frente al retraso variable. El jitter se trata con más detalles en los últimos capítulos del libro.

Figura 3.33 Concepto del producto ancho de banda-retraso.

3.7 LECTURAS RECOMENDADAS

Para obtener más detalles sobre los temas tratados en este capítulo, se recomiendan los siguientes libros y sitios Web. Los elementos entre corchetes [...] se refieren a la lista de referencias que hay al final del libro.

Libros

Los datos y las señales se tratan de forma elegante en los Capítulos 1 a 6 de [Pea92]. [Cou01] da una cobertura excelente sobre las señales en el Capítulo 2. En [Ber96] se puede encontrar material más avanzado. [Hus03] presenta una buena aproximación matemática a las señales. Una cobertura completa del análisis de Fourier se puede encontrar en [Spi74]. Los datos y las señales se tratan en el Capítulo 3 de [Sta04] y la Sección 2.1 de [Tan03].

3.8 TÉRMINOS Y CONCEPTOS CLAVE

amplitud pico	jitter (retraso variable)
análisis de Fourier	longitud de onda
analógico	onda seno
ancho de banda	periodo
atenuación	razón señal-ruido (SNR)
bits por segundo (bps)	rendimiento
canal paso banda	retraso de procesamiento
canal paso bajo	ruido
capacidad de Shannon	señal
ciclo	señal compuesta
datos analógicos	señal digital
datos digitales	señal periódica
decibelio (dB)	señal aperiódica
digital	tasa de bit
distorsión	tasa de bit de Nyquist
dominio de frecuencia	tasa de bits
dominio del tiempo	tiempo de encolamiento
fase	tiempo de propagación
frecuencia	tiempo de transmisión
frecuencia fundamental	transmisión banda base
armónico	transmisión banda ancha
herzio (Hz)	velocidad de propagación

3.9 RESUMEN

- ❑ La información se debe transformar en señales electromagnéticas antes de enviarla a través de una red.
- ❑ Los datos pueden ser analógicos o digitales. Los datos analógicos son continuos y toman valores continuos. Los datos digitales son discretos y toman valores discretos.
- ❑ Las señales pueden ser analógicas o digitales. Las señales analógicas pueden tener un número infinito de valores en su rango. Las señales digitales sólo pueden tener un número limitado de valores.

- ☐ En transmisión de datos, se usan frecuentemente señales analógicas periódicas y señales aperiódicas digitales.
- ☐ La frecuencia y el periodo son inversos entre sí.
- ☐ La frecuencia indica la velocidad de cambio respecto al tiempo.
- ☐ La fase describe la posición de la onda en el instante 0.
- ☐ Una onda seno completa en el dominio del tiempo se puede representar con una barra en el dominio de la frecuencia.
- ☐ Una única onda seno no es única para transmisión de datos; se necesita una señal compuesta, una señal formada por muchas ondas seno.
- ☐ De acuerdo con el análisis de Fourier, cualquier señal compuesta es una combinación de ondas seno simples con distintas frecuencias, amplitudes y fases.
- ☐ El ancho de banda de la señal compuesta es la diferencia entre las frecuencias más alta y más baja contenidas en la señal.
- ☐ Una señal digital es una señal analógica compuesta con un ancho de banda infinito.
- ☐ La transmisión banda base de una señal digital que conserva la forma de la señal digital es posible solamente si se tiene un canal paso bajo con un ancho de banda infinito o muy grande.
- ☐ Si el canal disponible es un canal paso banda, no se puede enviar una señal digital directamente al canal; es necesario convertir la señal digital a una señal analógica antes de transmitirla.
- ☐ Para un canal sin ruido, la fórmula de Nyquist define la máxima velocidad teórica. Para un canal ruidoso, es necesario usar la capacidad de Shannon para hallar la velocidad máxima.
- ☐ La atenuación, distorsión y el ruido pueden deteriorar una señal.
- ☐ La atenuación es la pérdida de energía de una señal debido a la resistencia del medio.
- ☐ La distorsión es la alteración de una señal debida a las distintas velocidades de propagación de cada una de las frecuencias que forman la señal.
- ☐ El ruido es la energía externa que corrompe una señal.
- ☐ El producto ancho de banda-retraso define el número de bits que pueden rellenar el enlace.

3.10 MATERIAL PRÁCTICO

Preguntas de revisión

1. ¿Cuál es la relación entre periodo y frecuencia?
2. ¿Qué mide la amplitud de una señal? ¿Y la frecuencia? ¿Y la fase?
3. ¿Cómo se puede descomponer una señal en sus frecuencias individuales?
4. Indique tres tipos de deterioro de la transmisión.
5. Distinga entre transmisión banda base y banda ancha.
6. Distinga entre un canal paso bajo y un canal paso banda.
7. ¿Qué relación tiene el teorema de Nyquist con las comunicaciones?
8. ¿Qué relación tiene el teorema de Shannon con las comunicaciones?
9. ¿Por qué las señales ópticas que se usan en fibras ópticas tienen una longitud de onda muy corta?
10. ¿Se puede saber si una señal es periódica o aperiódica mirando su dominio de frecuencia? ¿Por qué?
11. ¿Es el dominio de frecuencia de la voz discreto o continuo?
12. ¿Es el dominio de frecuencia de un sistema de alarma discreto o continuo?
13. Si se envía una señal de voz desde un micrófono o una grabadora, ¿es transmisión banda base o banda ancha?
14. Si se envía una señal digital desde una estación o LAN a otra, ¿es transmisión banda base o banda ancha?
15. Si se modulan varias señales de voz y se envían a través del aire, ¿es transmisión banda base o banda ancha?

Ejercicios

16. Dadas las frecuencias que se listan a continuación, calcule sus periodos correspondientes.
 - a. 24 Hz
 - b. 8 MHz
 - c. 140 kHz
17. Dados los siguientes periodos, calcule sus frecuencias correspondientes.
 - a. 5 s
 - b. 12 μ s
 - c. 220 ns
18. ¿Cuál es el desplazamiento de fase de las siguientes opciones?
 - a. Una onda seno con una amplitud máxima en tiempo cero
 - b. Una onda seno con una amplitud máxima después de $\frac{1}{4}$ de ciclo
 - c. Una onda seno con una amplitud cero después de $\frac{3}{4}$ de ciclo y en fase creciente
19. ¿Cuál es el ancho de banda de una señal que se puede descomponer en cinco ondas seno con frecuencias 0, 20, 50, 100 y 200 Hz? Todas las amplitudes pico son iguales. Dibuje el ancho de banda.
20. Una señal periódica compuesta con un ancho de banda de 2.000 Hz está compuesta por dos ondas seno. La primera tiene una frecuencia de 100 Hz con una amplitud máxima de 20 voltios; la segunda tiene una amplitud máxima de 5 voltios. Dibuje el ancho de banda.
21. ¿Qué señal tiene mayor ancho de banda: una señal que cambia 100 veces por segundo o una señal que cambia 200 veces por segundo?
22. ¿Cuál es la tasa de bit para cada una de las señales siguientes?:
 - a. Una señal en la cual un bit dura 0,001 segundo
 - b. Una señal en la cual un bit dura 2 milisegundos
 - c. Una señal en la cual 10 bits duran 20 microsegundos
23. Un dispositivo está enviando datos con una tasa de 1000 bps.
 - a. ¿Cuánto cuesta enviar 10 bits?
 - b. ¿Cuánto cuesta enviar un carácter (8 bits)?
 - c. ¿Cuánto cuesta enviar un archivo de 100.000 caracteres?
24. ¿Cuál es la tasa de bit en la Figura 3.34?
25. ¿Cuál es la frecuencia de la señal en la Figura 3.35?
26. ¿Cuál es el ancho de banda de la señal compuesta que se muestra en la Figura 3.36?
27. Una señal periódica compuesta contiene frecuencias desde 10 kHz a 30 kHz, cada una de ellas con una amplitud de 10 voltios. Dibuje el espectro de frecuencia.
28. Una señal compuesta aperiódica contiene frecuencias que van desde los 10 kHz a los 30 kHz. La amplitud es 0 para las señales más altas y más bajas y 30 voltios para la señal de 20 kHz. Asumiendo que la amplitud cambia gradualmente del mínimo al máximo, dibuje el espectro de frecuencia.
29. Un canal de TV tiene un ancho de banda de 6 MHz. Si se envía una señal usando un canal, ¿cuál es la velocidad si se usa un armónico, 3 armónicos y 5 armónicos?
30. Una señal viaja del punto A al punto B. En el punto A, la potencia de señal es 100 vatios. En el punto B, la potencia de señal es 90 vatios. ¿Cuál es la atenuación en dB?

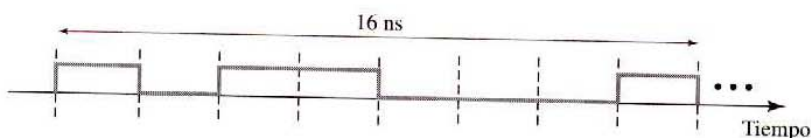
Figura 3.34 Ejercicio 24.

Figura 3.35 Ejercicio 25.

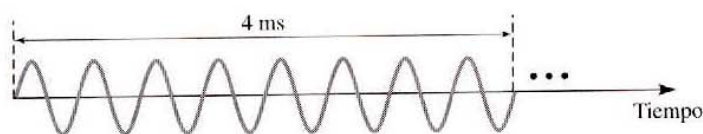
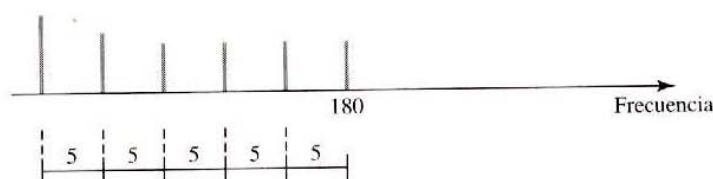


Figura 3.36 Ejercicio 26.



31. La atenuación de una señal es -10 dB. ¿Cuál es la potencia final de la señal si originalmente tenía 5 vatios?
32. Una señal ha pasado a través de tres amplificadores en cascada, cada uno de los cuales tenía una ganancia de 4 dB. ¿Cuál es la ganancia total? ¿Cuánto se ha amplificado la señal?
33. Si el rendimiento de la conexión entre un dispositivo y un medio de transmisión es 5 Kbps, ¿cuánto tiempo le costaría a este dispositivo enviar 100.000 bits?
34. La luz del sol tarda aproximadamente 8 minutos en llegar a la tierra. ¿Cuál es la distancia entre la tierra y el sol?
35. Una señal tiene una longitud de onda de $1 \mu\text{m}$ en el aire. ¿Cuánta distancia puede recorrer la onda durante 1000 periodos?
36. Una línea tiene una razón señal-ruido de 1000 y un ancho de banda de 4000 kHz. ¿Cuál es la tasa de datos máxima soportada por esta línea?
37. Se mide el rendimiento de una línea telefónica (4 kHz de ancho de banda). Cuando la señal es 10 voltios, el ruido es 5 milivoltios. ¿Cuál es la tasa de datos máxima soportada por esta línea telefónica?
38. Un archivo contiene 2 millones de bytes. ¿Cuánto tiempo cuesta descargar este archivo por un canal de 56 kbps? ¿Y por uno de 1 Mbps?
39. El monitor de una computadora tiene una resolución de 1200 por 1000 píxeles. Si cada píxel usa 1024 colores, ¿Cuántos bits son necesarios para enviar todos los contenidos de una pantalla?
40. Una señal con una potencia de 200 milivatios pasa a través de 10 dispositivos, cada uno con un ruido medio de 2 microvatios. ¿Cuál es el valor de SNR? ¿Y el de SNR_{dB} ?
41. Si el voltaje pico del valor de una señal es 20 veces el valor del voltaje pico del valor del ruido, ¿Cuál es el valor de SNR? ¿Y el de SNR_{dB} ?
42. ¿Cuál es la capacidad teórica de un canal en cada uno de los casos siguientes?
 - a. Ancho de banda: 20 kHz $\text{SNR}_{\text{dB}} = 40$
 - b. Ancho de banda: 200 kHz $\text{SNR}_{\text{dB}} = 4$
 - c. Ancho de banda: 1 MHz $\text{SNR}_{\text{dB}} = 20$

43. Se necesita actualizar un canal para tener mayor ancho de banda, responda a las cuestiones siguientes:
- ¿Cómo mejora la velocidad si se dobla el ancho de banda?
 - ¿Cómo mejora la velocidad si se dobla el ancho de banda la SNR?
44. Se tiene un canal con un ancho de banda de 4 kHz. Si se quiere enviar datos a 100 kbps. ¿Cuál es el mínimo SNR_{dB} ? ¿Y el SNR?
45. ¿Cuál es el tiempo de transmisión de un paquete enviado a una estación si la longitud del paquete es de 1 millón de bytes y el ancho de banda del canal es 200 kbps?
46. ¿Cuál es el intervalo de bit en un canal con una velocidad de propagación de 2×10^8 m/s si el ancho de banda del canal es?
- 1 Mbps.
 - 10 Mbps
 - 100 Mbps.
47. ¿Cuántos bits caben en un canal con un retraso de 2 ms. si el ancho de banda del enlace es?
- 1 Mbps.
 - 10 Mbps
 - 100 Mbps.
48. ¿Cuál es el retraso total (latencia) de una trama de 5 millones de bits que se envía por un enlace con 10 enrutadores, cada uno de los cuales tiene un tiempo de encolamiento de $2 \mu\text{s}$ y un tiempo de procesamiento de $1 \mu\text{s}$? La longitud del enlace es de 2000 km. La velocidad de la luz dentro del enlace es 2×10^8 m/s. El enlace tiene un ancho de banda de 5 Mbps. ¿Qué componente del retraso total es dominante? ¿Cuál es despreciable?