

4. Capítulo 4: Transmisión de datos

Los términos analógico y digital corresponden, aproximadamente, a continuo y discreto, respectivamente. Estos dos términos se usan con frecuencia en comunicaciones de datos en al menos tres contextos: datos, señalización y transmisión.

Brevemente, se definen los datos como entidades que transmiten significado o información. Las señales son representaciones eléctricas o electromagnéticas de datos. La señalización es lo físico, incluye la propagación de la señal a lo largo de un medio adecuado. La transmisión es la comunicación de datos por propagación y procesamiento de señales.

En lo que sigue, se van aclarar estos conceptos abstractos discutiendo los términos analógico y digital aplicado a datos, señales y transmisión.

4.1. Datos analógicos y digitales

Los conceptos de datos analógicos y digitales son lo suficientemente simples. Los datos analógicos adquieren valores continuos en algún intervalo. Por ejemplo, la voz y el video son continuamente patrones variables de intensidad. La mayoría de los datos recopilados por los sensores, como la temperatura y presión, se valoran continuamente. Los datos digitales toman valores discretos; ejemplos son el texto y los valores enteros.

El ejemplo más conocido de datos analógicos es el audio, el cual, en forma de ondas sonoras acústicas, puede ser percibido directamente por los seres humanos. La figura 4.1.1 muestra el espectro acústico para el habla humana. Componentes de frecuencia típica del habla se puede encontrar entre aproximadamente los 100 Hz y 7 kHz. A pesar de que gran parte de la energía en el habla se concentra en las frecuencias más bajas, las pruebas han demostrado que las frecuencias por debajo de 600 o 700 Hz agregan muy poco a la inteligibilidad de discurso al oído humano. El habla típica tiene un rango dinámico de aproximadamente 25 dB¹; lo que implica que la potencia del grito más fuerte puede ser hasta 300 veces mayor, que el del menor susurro.

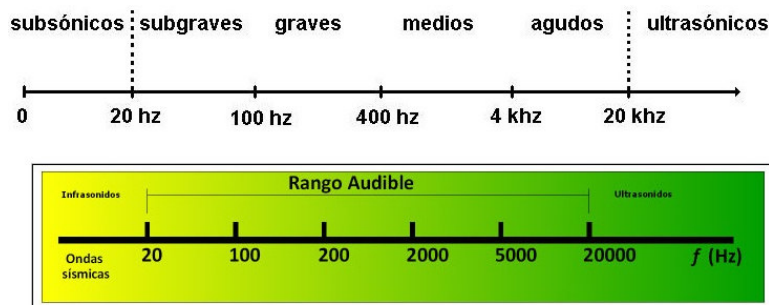


Figura 4.1.1: Espectro acústico para el habla humana

Un ejemplo familiar de datos digitales son las cadenas de texto o la cadena de caracteres. Mientras el dato en forma de texto es lo mejor para los seres humanos, estos

¹ dB, decibelio, es una unidad que se utiliza para expresar la relación entre dos valores de presión sonora, o tensión y potencia eléctrica (no es una unidad de medida)

no pueden almacenarse o ser transmitidos fácilmente. Los sistemas están diseñados para datos binarios.

Así, se han ideado varios códigos, por el cual los caracteres están representados por una secuencia de bits. Quizás el primer y más común ejemplo de esto es el código Morse. Hoy, el código de texto más utilizado es el Alfabeto internacional de referencia (IRA). Cada carácter en este código está representado por un patrón único de 7 bits; así se pueden representar 128 caracteres diferentes (Figura 4.1.2). Este es un número mayor que el necesario, y algunos de los patrones representan caracteres de control invisibles. Los caracteres codificados con IRA casi siempre se almacenan y son transmitidos utilizando 8 bits por carácter. El octavo bit es un bit de paridad usado para la detección de errores. Este bit se establece en valor 1 cuando el número total de 1 binarios en cada octeto es impar (si se utiliza paridad impar) o cuando sea par (si se utiliza paridad par). Por lo tanto, un error de transmisión que se pueden detectar cambios de un solo bit, o cualquier número impar de bits.

				b7	0	0	0	0	1	1	1	1
				b6	0	0	1	1	0	0	1	1
				b5	0	1	0	1	0	1	0	1
b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1						
0	0	0	0	0	0	0	NUL	DLE	SP	0	@	P
0	0	0	0	1	0	0	SOH	DC1	!	1	A	Q
0	0	0	1	0	0	0	STX	DC2	"	2	B	R
0	0	0	1	1	0	0	ETX	DC3	#	3	C	S
0	1	0	0	0	0	0	EOT	DC4	\$	4	D	T
0	1	0	0	1	0	0	ENQ	NAK	%	5	E	U
0	1	1	0	0	0	0	ACK	SYN	&	6	F	V
0	1	1	1	0	0	0	BEL	ETB	'	7	G	W
1	0	0	0	0	0	0	BS	CAN	(8	H	X
1	0	0	0	1	0	0	HT	EM)	9	I	Y
1	0	0	1	0	0	0	LF	SUB	*	:	J	Z
1	0	0	1	1	0	0	VT	ESC	+	;	K	[
1	1	0	0	0	0	0	FF	FS	,	<	L	\
1	1	0	0	1	0	0	CR	GS	-	=	M]
1	1	1	0	0	0	0	SO	RS	.	>	N	^
1	1	1	1	0	0	0	SI	US	/	?	O	_
1	1	1	1	1	0	0						DEL

Figura 4.1.2: Alfabeto internacional IRA

La transmisión de video lleva secuencias de imágenes en el tiempo. En esencia, el video utiliza una secuencia de imágenes de barrido de trama. Aquí es más fácil caracterizar los datos en términos de la televisión o el monitor de la computadora del espectador (destino) en lugar de la escena original (fuente) grabada por la cámara de video.

El video puede ser capturado por grabadoras de video analógicas o digitales. El video que se captura puede transmitirse usando señales continuas (analógico) o discretas (digital); pueden ser recibidas por dispositivos de visualización analógicos o digitales, y pueden almacenarse en formatos de archivo analógico o digital.

Los primeros televisores y monitores de computadora utilizaron un tubo de tecnología de rayos catódicos (CRT). Estos son dispositivos inherentemente analógicos que usan una pistola de electrones para pintar imágenes en la pantalla. El arma emite un haz de electrones que escanea a través de la superficie de la pantalla de izquierda a derecha y de arriba a abajo. Para la televisión en blanco y negro, la cantidad de iluminación producida (en una escala de negro a blanco) en cualquier punto es proporcional a la intensidad del haz cuando pasa ese punto. Así en cualquier instante, el

haz adquiere un valor analógico de intensidad, lo que permite producir el brillo deseado. Además, a medida que el haz escanea, el valor analógico cambia. Por lo tanto, la imagen de video puede considerarse como una señal analógica que varía con el tiempo.

El término video digital se refiere a la captura, manipulación y almacenamiento de video en formatos digitales. Las videocámaras digitales capturan imágenes en movimiento digitalmente. En esencia, esto se hace tomando una serie de fotografías digitales, a una velocidad de al menos 30 cuadros por segundo.

4.2. Señales Analógicas y Digitales

En un sistema de comunicaciones, los datos se propagan de un punto a otro por medios de señales electromagnéticas. Una señal analógica es una onda electromagnética que varía continuamente que se puede propagar a través de una variedad de medios, dependiendo del espectro. Ejemplos de medios guiados son: el cable par trenzado, el cable coaxial y la fibra óptica; mientras que ejemplos de medios no guiados son la atmósfera o la propagación espacial.

Una señal digital es una secuencia de pulsos de voltaje que pueden transmitirse a través de un medio guiado; por ejemplo, un nivel de voltaje positivo constante puede representar 0 binario y un nivel de voltaje negativo para representar un 1 binario.

Las principales ventajas de la señalización digital son que generalmente es más barata que la señalización analógica y es menos susceptible a la interferencia de ruido. La desventaja principal es que las señales digitales sufren más de atenuación que las señales analógicas.

La figura 4.2.1 muestra una secuencia de pulsos de voltaje, generados por una fuente emisora que utiliza dos niveles de voltaje, los cuales recorren una distancia a través de un medio conductor y luego son recibidos por una fuente receptora. Debido a la atenuación, o reducción, de la intensidad de la señal a frecuencias más altas, los pulsos se vuelven redondeados y más pequeños. Debe quedar claro que esta atenuación puede conducir bastante rápido a la pérdida de la información contenida en la señal propagada.

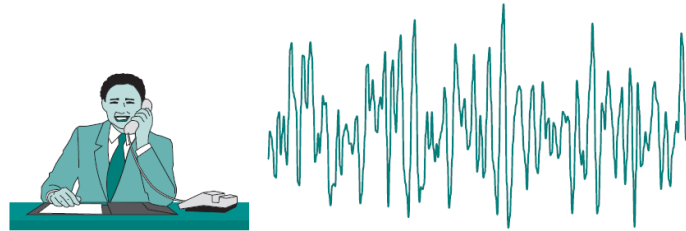
En lo que sigue, primero veremos algunos ejemplos específicos de tipos de señales y luego se discutirá la relación entre datos y señales.



Figura 4.2.1: Atenuación de una señal digital

Primero, consideramos la información de audio o acústica. Una forma de información acústica, por supuesto, es el habla humana. Esta forma de información se

convierte fácilmente a una señal electromagnética para la transmisión (Figura 4.2.2). En esencia, todas las frecuencias del sonido, cuya amplitud se mide en términos de volumen, se convierten en frecuencias electromagnéticas, cuya amplitud se mide en voltios. El teléfono contiene un mecanismo simple para realizar dicha conversión.



En este gráfico de una señal de voz analógica típica, las variaciones en amplitud y frecuencia transmiten el grado de volumen y tono en el habla o la música. Se utilizan señales similares para transmitir imágenes en televisión, pero usando frecuencias mucho más altas.

Figura 4.2.2: Entrada de voz, salida de señal analógica

En el caso de los datos acústicos (voz), los datos se pueden representar directamente por una señal electromagnética que ocupa el mismo espectro. Sin embargo, hay que atender a una relación “costo/beneficio”, entre el costo de transmisión y la fidelidad del sonido transmitido eléctricamente, ya que, a mayor ancho de banda, más alto es el costo del servicio. Como se mencionó, el espectro del habla es de aproximadamente de 100 Hz a 7 kHz, aunque es con un ancho de banda mucho más estrecho que se puede reproducir voz en una forma aceptable. El espectro estándar para un canal de voz es de 300 a 3400 Hz. Esto es adecuado para la transmisión del habla, minimiza la capacidad de transmisión requerida y permite el uso de aparatos telefónicos de bajo costo. El transmisor telefónico convierte la voz acústica entrante en una señal electromagnética en el rango de 300 a 3400 Hz. Esta señal luego se transmite a través del sistema telefónico a un receptor, que lo reproduce como sonido acústico.

Se analiza ahora la señal de video. Para producir una señal de video, se usa una cámara de TV, la cual realiza funciones similares a la del receptor de TV. Un componente de la cámara es una placa fotosensible, sobre la cual se enfoca ópticamente una escena. Un rayo de electrones barre la placa de izquierda a derecha y de arriba a abajo. Con el barrido de rayos, se desarrolla una señal eléctrica analógica proporcional al brillo de la escena en un lugar particular. Mencionamos que se escanean un total de 483 líneas a una velocidad de 30 escaneos completos por segundo. Este es un número aproximado teniendo en cuenta el tiempo perdido durante el intervalo de retroceso vertical. El estándar actual de Argentina (NTSC, National Television System Committee) tiene 525 líneas, pero de estas aproximadamente 42 se pierden durante el retroceso vertical. Así, la frecuencia de escaneo horizontal es de $(525 \text{ líneas}) \times (30 \text{ escaneos}) = 15,750 \text{ líneas por segundo}$, o $63,5 \mu\text{s} / \text{línea}$. De los $63,5 \mu\text{s}$, se usan aproximadamente $11 \mu\text{s}$ para el retroceso horizontal, dejando un total de $52,5 \mu\text{s}$ por línea de video.

Con estos datos se está en condiciones de estimar el ancho de banda requerido para la señal de video. Para hacer esto debemos estimar los valores: superior

(máximo) e inferior (mínimo) de frecuencia de la banda. Utilizamos el siguiente razonamiento para llegar a la frecuencia máxima:

- La frecuencia máxima ocurriría durante la exploración horizontal si la escena alternaría entre blanco y negro lo más rápido posible. Podemos estimar este valor máximo considerando la resolución de la imagen de video. En la dimensión vertical hay 483 líneas, por lo que la resolución vertical máxima sería 483. Los experimentos han demostrado que la resolución subjetiva real es aproximadamente el 70% de ese número, o sea alrededor de 338 líneas. En aras de una imagen equilibrada, las resoluciones horizontal y vertical deben ser casi iguales. Dado que una resolución típica de pantalla de TV de ancho a alto es 4:3, la resolución horizontal debe ser aproximadamente $4/3 * 338 = 450$ líneas.
- En el peor de los casos, una línea de escaneo estaría formada por 450 elementos alternando en blanco y negro. El escaneo resultaría en una onda, y cada ciclo de la onda consistiría de un nivel de voltaje más alto (negro) y uno más bajo (blanco). Por lo tanto, habría que calcular $450/2 = 225$ ciclos de la onda en 52.5 ms, para una frecuencia máxima de aproximadamente 4.2 MHz.

Este razonamiento aproximado, de hecho, es bastante preciso. El límite inferior es una componente de continua o frecuencia cero, donde la componente de continua representa a la iluminación promedio de la escena (el valor promedio por el cual el brillo excede el nivel de referencia de negro). Por lo tanto, el ancho de banda de la señal de video es de aproximadamente $4 \text{ MHz} - 0 = 4 \text{ MHz}$.

La discusión anterior no consideró los componentes de color o audio de la señal. Resulta que, con estos incluidos, el ancho de banda sigue siendo de aproximadamente 4 MHz.

Finalmente, el tercer ejemplo descrito es el caso general de los datos binarios. Los datos binarios son generados por terminales, computadoras y otros equipos de procesamiento de datos y luego se convierten en pulsos de voltaje digital para la transmisión, como se ilustra en la Figura 4.2.3. Una señal de uso común para dichos datos utiliza dos niveles de voltajes constantes: un nivel para binario 1 y un nivel para binario 0. (En el próximo capítulo veremos que esta es solo una alternativa, conocida como no retorno a cero (NRZ).) Nuevamente, se está interesado en conocer el ancho de banda de la señal. Esto dependerá, en cualquier caso, en la forma exacta de la forma de onda y la secuencia de 1s y 0s. Se puede tener cierta comprensión al considerar la Figura 3.1.3.2 en comparación con la Figura 3.1.2.2. Como se puede ver, cuanto mayor sea el ancho de banda de la señal, más fielmente se aproxima un flujo de pulso digital

Datos y señales

En la discusión anterior, hemos analizado las señales analógicas, usadas para representar datos analógicos y señales digitales, usadas para representar datos digitales. En general, los datos analógicos son una función del tiempo y ocupan un espectro de frecuencia limitada; tales datos pueden ser representados por una señal electromagnética que ocupa el mismo espectro. Los datos digitales pueden ser

representados por señales digitales, con un diferente nivel de voltaje para cada uno de los dos dígitos binarios

En la Figura 4.2.3 se puede observar que la entrada del usuario en una PC se convierte en un flujo de dígitos binario (1s y 0s). En este gráfico de una señal digital típica, el uno binario está representado por -5 voltios y el cero binario es representado por $+5$ voltios. La señal para cada bit tiene una duración de 0.02 ms, dando una velocidad de datos de $50,000$ bits por segundo (50 kbps).

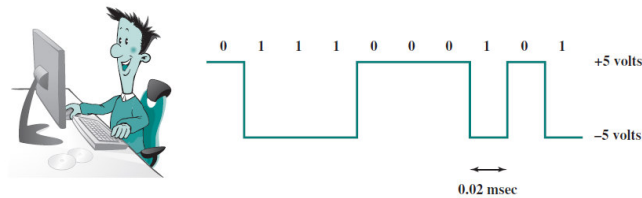


Figura 4.2.3: Conversión de una entrada en el teclado en una señal digital

Como ilustra la figura 4.2.4, estas no son las únicas posibilidades. Datos digitales pueden también ser representados mediante señales analógicas haciendo uso de un módem (modulador / demodulador).

El módem convierte una serie de pulsos de voltaje binarios (dos valores) en una señal analógica al codificar los datos digitales en una frecuencia portadora. La señal resultante ocupa un cierto espectro de frecuencia centrada en la portadora y puede propagarse a través de un medio adecuado para ese portador. Los módems más comunes representan datos digitales en el espectro de voz y, por lo tanto, permiten que esos datos se propaguen a través de líneas telefónicas ordinarias con calidad de voz. En el otro extremo de la línea, otro módem demodula la señal para recuperar los datos originales.

En una operación muy similar a la realizada por un módem, los datos analógicos pueden estar representado por señales digitales. El dispositivo que realiza esta función para la voz se llama códec (codificador-decodificador). En esencia, el códec toma una señal analógica que representa directamente los datos de voz y aproxima esa señal a un flujo de bits. En el extremo receptor, el flujo de bits se utiliza para reconstruir los datos analógicos.

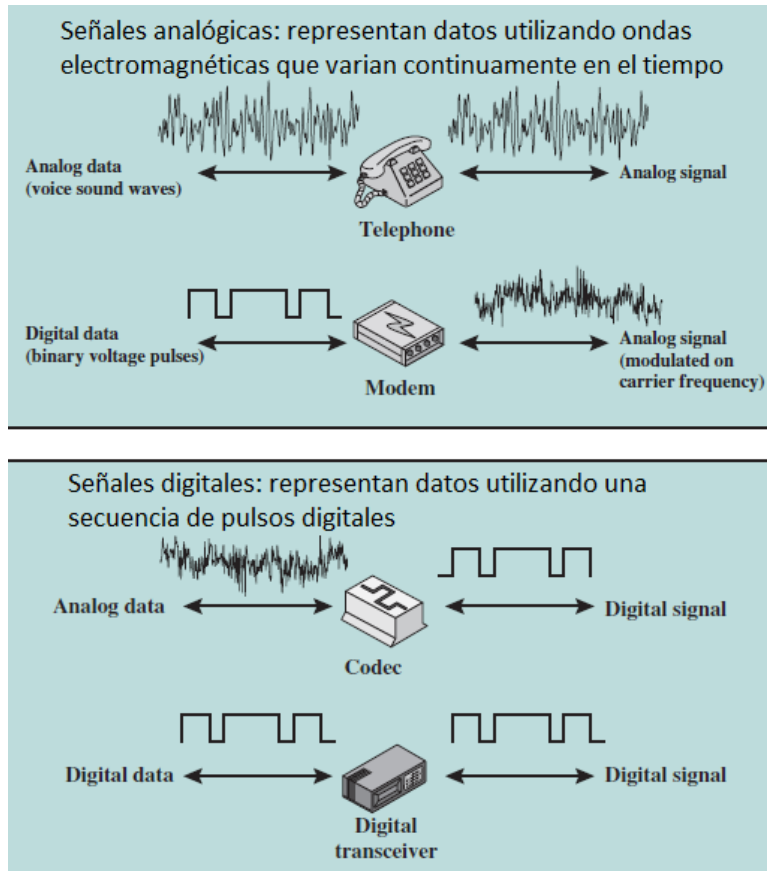


Figura 4.2.4: Generación de señales analógicas y digitales a partir de datos analógicos y digitales

4.3. Transmisión analógica y digital

Ambas señales analógicas y digitales pueden transmitirse en medios de transmisión adecuados. La forma en que se tratan estas señales es una función del sistema de transmisión. La Tabla 4.2.5 resume los métodos de transmisión de datos.

(a) Datos y Señales

	Señal Analógica	Señal Digital
Dato Analógico	Dos alternativas: (1) señal ocupa el mismo espectro que los datos analógicos (2) datos analógicos están codificados para ocupar una diferente porción del espectro.	Los datos analógicos se codifican usando un código para producir un flujo de bits digital.
Dato Digital	Los datos digitales se codifican usando un módem para producir señal analógica.	Dos alternativas: (1) la señal consta de dos voltajes niveles para representar los dos valores binarios; (2) digital los datos se codifican para producir una señal digital con propiedades deseadas

(b) Tratamiento de la Señal

	Transmisión Analógica	Transmisión Digital
Señal Analógica	Se propaga a través de amplificadores; mismo tratamiento si la señal es utilizado para representar datos analógicos o información digital.	Asume que la señal analógica representa digital datos. La señal se propaga a través de repetidores; a cada repetidor, los datos digitales se recuperan de señal de entrada y se utiliza para generar un nuevo análogo señal de salida
Señal Digital	No usado	La señal digital representa un flujo de 1s y 0s, que puede representar datos digitales o puede ser un codificación de datos analógicos. La señal se propaga a través de repetidores; en cada repetidor, flujo de 1s y 0s se recupera de la señal entrante y se utiliza para generar una nueva señal de salida digital.

Tabla 4.2.5: Resumen de los métodos de transmisión de datos

La transmisión analógica es un medio de transmitir señales analógicas sin tener en cuenta su contenido; las señales pueden representar datos analógicos (por ejemplo, voz) o datos digitales (por ejemplo, datos binarios que pasan a través de un módem). En cualquier caso, la señal analógica se debilitará (atenuará) después de cierta distancia. Para alcanzar distancias más largas, el sistema de transmisión analógica incluye amplificadores que aumentan la energía en la señal. Figura 4.2.6. Desafortunadamente, el amplificador también aumenta los componentes de ruido. Con amplificadores en cascada para alcanzar largas distancias, la señal se vuelve más y más distorsionada. Para datos analógicos, como voz, se puede tolerar algún grado de distorsión, los datos seguirán siendo inteligibles. Sin embargo, para datos digitales, los amplificadores en cascada introducirán errores.

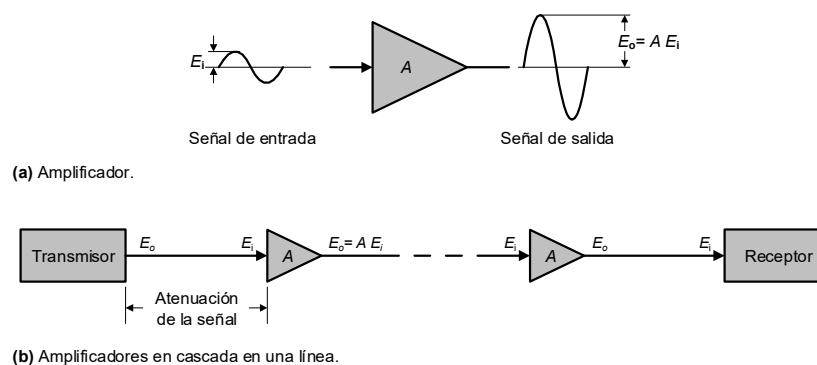


Figura 4.2.6: Amplificador: $E_o = A E_i$, donde A es la amplificación, E_o es la amplitud de la señal de salida y E_i la amplitud de la señal de entrada del amplificador

La transmisión digital (Figura 4.2.7), por el contrario, supone un contenido binario para la señal. Una señal digital se puede transmitir solo a una distancia limitada antes de la atenuación, ruido y otros impedimentos pongan en peligro la integridad de los datos. Para lograr mayores distancias se utilizan repetidores. Un repetidor recibe la señal digital, recupera el patrón de 1s y 0s, y retransmite una nueva señal. Así se supera la atenuación.

Se puede usar la misma técnica con una señal analógica si se supone que la señal transporta datos digitales. En puntos apropiadamente espaciados, el sistema de transmisión tiene repetidores en lugar de amplificadores. El repetidor recupera los datos digitales de la señal analógica y genera una nueva señal analógica limpia. Por lo tanto, el ruido no es acumulativo.

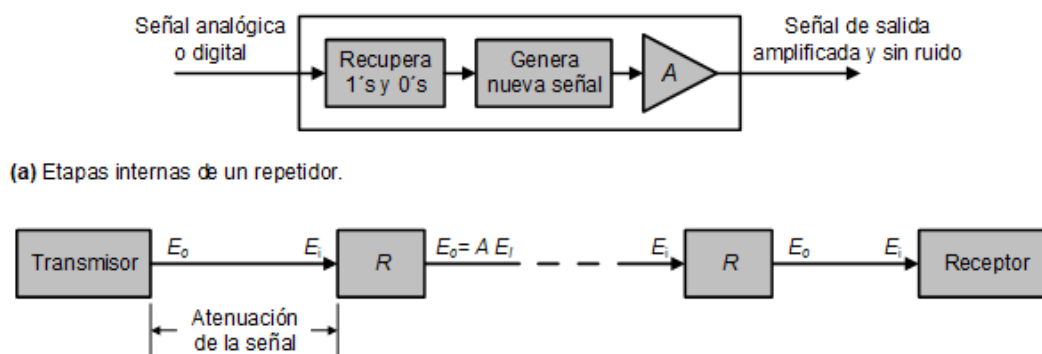


Figura 4.2.7: Repetidor: $E_o = A E_i$, E_o es la amplitud de la señal de salida y E_i la amplitud de la señal de entrada del amplificador

La pregunta que surge naturalmente es cuál es el método preferido de transmisión. La respuesta es proporcionada por la industria de las telecomunicaciones y sus clientes contundente: digital. Tanto las instalaciones de telecomunicaciones de larga distancia como las de interedificios, los servicios se han trasladado a la transmisión digital y, cuando sea posible, a las técnicas de señalización digital. Las razones más importantes son las siguientes:

- Tecnología digital: el advenimiento de la integración a gran escala (LSI) y a muy gran escala (VLSI). La tecnología de integración (VLSI) ha causado una caída continua en el costo y tamaño de los circuitos digitales. El equipo analógico no ha mostrado una caída similar.
- Integridad de los datos: con el uso de repetidores en lugar de amplificadores, los efectos del ruido y otras degradaciones de la señal no son acumulables. Por lo tanto, es posible transmitir datos a distancias más largas y a través de líneas de menor calidad por medios digitales, mientras se mantiene la integridad de los datos.
- Utilización de la capacidad: se ha vuelto económico construir enlaces de transmisión de ancho de banda muy alto, incluidos canales satelitales y fibra óptica. Para poder utilizar de forma efectiva estos enlaces de tan gran ancho

de banda, es necesario aplicar la técnica de multiplexación, lo cual se logra de manera más fácil y económica con técnicas digitales (división de tiempo) en lugar de técnicas analógicas (división de frecuencia).

- Seguridad y privacidad: las técnicas de cifrado se pueden aplicar fácilmente a la tecnología digital, para datos digitales y datos analógicos que han sido digitalizados.
- Integración: al tratar digitalmente los datos analógicos y digitales, todas las señales tienen la misma forma y se puede tratar de manera similar. Así se pueden mejorar los costos aplicando economías de escala integrando voz, video y datos digitales.

4.4. Transmisión asincrónica y sincrónica

La recepción de datos digitales implica muestrear la señal entrante una vez por tiempo de bit para poder determinar el valor binario. Una de las dificultades encontradas en tal proceso es que varias alteraciones en la transmisión corromperán la señal de modo que ocasionalmente se producirán errores. Este problema se agrava por una dificultad de tiempo: con el objetivo de que el receptor muestree los bits entrantes correctamente, debe conocer la hora de llegada y la duración de cada bit que recibe.

Supongamos que el emisor simplemente transmite un flujo de bits de datos. El remitente tiene un reloj que gobierna el tiempo de los bits transmitidos. Por ejemplo, si los datos van a ser transmitidos a una velocidad de 1 millón de bits por segundo (1 Mbps), entonces se transmitirá un bit cada $1/10^6 = 1$ microsegundo (μs), medido por el reloj del emisor. Típicamente, el receptor intentará muestrear el medio en el centro de cada tiempo de bit. Así, el receptor cronometrará sus muestras a intervalos de un bit. En nuestro ejemplo, el muestreo ocurriría una vez cada 1 μs . Si el receptor cronometra sus muestras basándose en su propio reloj, entonces habrá un problema si los relojes del transmisor y del receptor no están alineados con precisión. Si hay una diferencia del 1% (el reloj del receptor es 1% más rápido o más lento que el reloj del transmisor), entonces el primer muestreo será 0.01 de tiempo (0.01 μs) más lejos del centro del bit (el centro del bit está a 0.5 μs desde el principio y hasta el final). Después de 50 o más muestras, el receptor va a interpretar un valor que es distinto del enviado, habrá un claro error porque está muestreando en el tiempo de bits incorrecto ($50 \cdot 0.01 = 0.5 \mu s$). Para diferencias de tiempo más pequeñas, el error ocurrirá más tarde, pero eventualmente el receptor estará fuera de sintonía con el transmisor si el transmisor envía un flujo de bits suficientemente largo y no se toman medidas para sincronizar el transmisor y el receptor.

Dos enfoques son comunes para lograr la sincronización deseada. Lo primero se llama, curiosamente, transmisión asincrónica. La estrategia con este esquema es evitar el problema de tiempo al no enviar secuencias largas e ininterrumpidas de bits. En cambio, los datos se transmiten un carácter a la vez, donde cada carácter es de 5 a 8 bits de longitud. El tiempo o la sincronización solo deben mantenerse dentro de cada

caracter; el receptor tiene la oportunidad de re sincronizar al principio de cada nuevo caracter.

Con la transmisión síncrona, un bloque de bits se transmite en un flujo constante sin códigos de inicio y parada. El bloque puede tener muchos bits de longitud. Para evitar el tiempo a la deriva entre el transmisor y el receptor, sus relojes deben estar sincronizados de alguna manera. Una posibilidad es proporcionar una línea de reloj separada entre el transmisor y el receptor. Un lado (transmisor o receptor) pulsa la línea regularmente con un pulso corto por tiempo de bit. El otro lado usa estos pulsos regulares como reloj. Esta técnica funciona bien en distancias cortas, pero en distancias más largas los pulsos de reloj están sujetos al mismo deterioro que la señal de datos, y pueden ocurrir errores de tiempo. La otra alternativa es incrustar la información de reloj en la señal de datos. Para señales digitales, esto se puede lograr con Manchester o con la codificación diferencial Manchester. Para señales analógicas se pueden utilizar varias técnicas; por ejemplo, la frecuencia portadora en sí mismo puede usarse para sincronizar el receptor en función de la fase de la portadora.

Con la transmisión sincrónica, hay otro nivel de sincronización requerido para permitir que el receptor determine el principio y el final de un bloque de datos. Para lograr esto, cada bloque comienza con un patrón de bits de preámbulo y generalmente finaliza con un patrón de bits de final de trama. Además, se agregan otros bits al bloque que transmite información de control utilizada en los procedimientos de control de enlace de datos. Los datos más la información de preámbulo, final de trama y control se denomina trama. El formato exacto de la trama depende de qué procedimiento de control de enlace de datos se esté utilizando.

4.5. Perturbaciones en la transmisión

En todo sistema de comunicación real, la señal recibida es diferente de la señal transmitida debido a perturbaciones que esta última sufre a lo largo de la transmisión y que obedecen a diversas causas. En las señales analógicas estas perturbaciones producen modificaciones aleatorias que degradan la calidad de la señal. En las señales digitales se introducen errores en los bits; por ejemplo, un 1 binario es transformado en un 0 ó viceversa. En esta sección se estudiarán los distintos tipos de perturbaciones y los efectos que producen en la señal, reduciendo de este modo la capacidad de transporte de información de los enlaces de comunicación. Las principales causas de perturbación son:

- Atenuación
- Distorsión por retardo
- Ruido

Estos fenómenos se tratan a continuación.

4.5.1. Atenuación

La intensidad de una señal disminuye con la distancia sobre cualquier medio de transmisión guiado (p. ej., cable de par trenzado, fibra óptica). Esta reducción de la intensidad debido a la resistencia en el cable, o atenuación, generalmente es exponencial y, por lo tanto, normalmente se expresa como por un número constante de decibelios por unidad de distancia². Para medios no guiados (transmisión inalámbrica), la atenuación es una función más compleja de la distancia y la composición de la atmósfera. La atenuación introduce tres consideraciones para la ingeniería de la transmisión:

- Una señal recibida debe tener la fuerza suficiente para que el circuito electrónico en el receptor puede detectar e interpretar la señal.
- La señal debe mantener un nivel suficientemente alto respecto al ruido para ser recibido sin error.
- La atenuación es mayor a frecuencias más altas, y esto causa distorsión.

La primera y segunda consideración se tratan inyectando fuerza a la señal, haciendo uso de amplificadores o repetidores. Para un enlace punto a punto, la fuerza de la señal que genera el transmisor debe ser lo suficientemente potente como para ser recibida de manera inteligible, pero no tan fuerte como para sobrecargar los circuitos del transmisor o receptor, lo que causaría distorsión. Más allá de cierta distancia, la atenuación se vuelve tan grande que los repetidores o amplificadores deben instalarse a intervalos regulares para aumentar la señal. Estos problemas son más complejos para líneas multipunto donde la distancia desde el transmisor al receptor es variable.

La tercera consideración, conocida como distorsión de atenuación, es particularmente notable para señales analógicas. Debido a que la atenuación es diferente para diferentes frecuencias y la señal está compuesta por varios componentes a diferentes frecuencias, la señal recibida no solo se reduce en intensidad, sino que también se distorsiona. Para superar este problema, hay técnicas disponibles para igualar la atenuación en una banda de frecuencias. Esto se hace comúnmente para líneas telefónicas de voz mediante el uso de bobinas de carga que cambian las propiedades eléctricas de la línea; el resultado busca suavizar los efectos de atenuación. Otro enfoque es usar amplificadores que amplifiquen frecuencias altas con mayor potencia que las frecuencias bajas.

En la siguiente Figura 4.5.1.1 se muestra la atenuación como una función de frecuencia para una línea punto a punto típica. En la figura, la atenuación se mide en relación a la atenuación respecto a 1000 Hz. Los valores positivos en el eje “y” representan la atenuación aplicada a los 1000 Hz. Se aplica un tono de 1000 Hz de un nivel de potencia dado a la entrada, y la potencia, P_{1000} , se mide en la salida. Para cualquier otra frecuencia f , el procedimiento se repite y la atenuación relativa en decibelios es:

$$N_f = -10 \log_{10} (P_f / P_{1000})$$

² Los estándares generalmente usan el término pérdida de inserción cuando se refieren a pérdidas asociadas con el cableado.

La línea continua en la figura 4.5.1.1 muestra atenuación sin ecualización. Como se observa, las componentes de frecuencia en el extremo superior de la banda de voz se atenúan mucho más que aquellas en frecuencias más bajas. Debe quedar claro que esto resultará en una distorsión de la señal de voz recibida. La línea discontinua muestra el efecto de la igualdad, a través de la ecualización³. La curva de respuesta aplanada mejora la calidad de las señales de voz. Eso también permite utilizar velocidades de datos más altas para los datos digitales que se pasan a través de un módem.

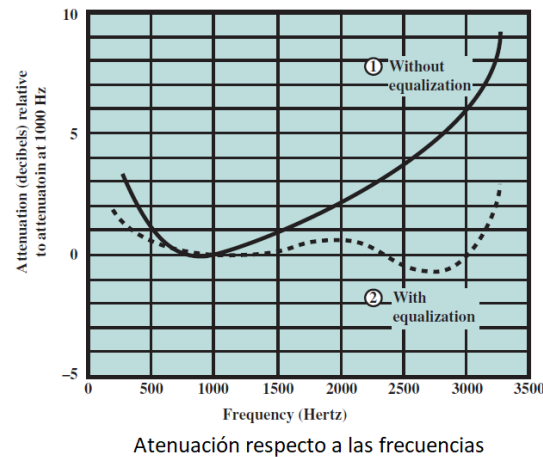


Figura 4.5.1.1: Curvas de atenuación de un canal de voz

Atenuación en Función de la Distancia

Para que no ocurran errores en la recepción de una señal se debe mantener su amplitud o nivel mediante el uso de amplificadores o repetidores. Para un enlace punto a punto, la amplitud de la señal del transmisor debe ser lo suficientemente fuerte para que sea recibida con inteligibilidad, pero no tan fuerte que sature los circuitos del transmisor produciendo distorsión en la señal generada. A cierta distancia del punto donde la señal es ingresada a la línea, la atenuación puede llegar a ser inaceptablemente fuerte, debiendo utilizarse repetidores o amplificadores para elevar el nivel de la señal.

Atenuación en Función de la Frecuencia

En general, la señal que atraviesa un medio de transmisión sufre una atenuación mayor en sus componentes de más alta frecuencia. Este fenómeno tiene distinta incidencia en las señales analógicas y digitales:

- En señales analógicas. Cuando la atenuación varía en función de la frecuencia, la señal recibida está distorsionada, es decir, con su inteligibilidad disminuida. Este problema se supera con técnicas de ecualización de la atenuación en la banda de frecuencias. La atenuación es particularmente importante para las señales

³ Ecualizar: Ajustar dentro de determinados valores las frecuencias de reproducción de una señal, como p. ej., el sonido.

analógicas, debido a la presencia de ruido en el canal, fenómeno que se estudia más adelante.

- En señales digitales. La distorsión producida por la atenuación en las señales digitales es un problema mucho menor. Esto se debe a que, según lo visto en el Capítulo 3, la amplitud de las componentes de una señal digital decrece rápidamente con la frecuencia y la mayor parte del contenido de la señal está concentrado cerca de la frecuencia fundamental de la señal. Además, debido a que el dato transportado por una señal digital puede ser recuperado en un repetidor, es posible generar una nueva señal limpia a la salida de estos dispositivos. Esto no puede hacerse con las señales analógicas que transportan datos analógicos.

4.5.2. Distorsión por Retardo

La distorsión que introduce el retardo es un fenómeno que se produce en los medios de transmisión guiada y es debida a que la velocidad de propagación de una señal en estos medios varía con la frecuencia. Para una señal limitada en banda, la velocidad tiende a ser mayor cerca de la frecuencia central y menor en los dos extremos de la banda. De este modo, las distintas componentes de frecuencia de una señal llegarán al receptor en diferentes tiempos.

Este efecto se conoce como distorsión por retardo, puesto que se deteriora la calidad de la señal debido al diferente retardo de sus componentes. La distorsión por retardo es particularmente crítica para los datos digitales. Considérese que se está transmitiendo una secuencia de bits mediante señales analógicas o digitales. Debido a la distorsión por retardo, algunos de los componentes de la señal en la posición de un bit se correrán sobre la posición de otro bit causando interferencia entre los símbolos. Este fenómeno produce limitación en la velocidad máxima de transmisión de los bits.

Las técnicas de ecualización también se pueden usar para la distorsión de retardo. De nuevo usando una línea telefónica alquilada, la figura 4.5.2.1 muestra el efecto de la ecualización en función del retraso en la frecuencia.

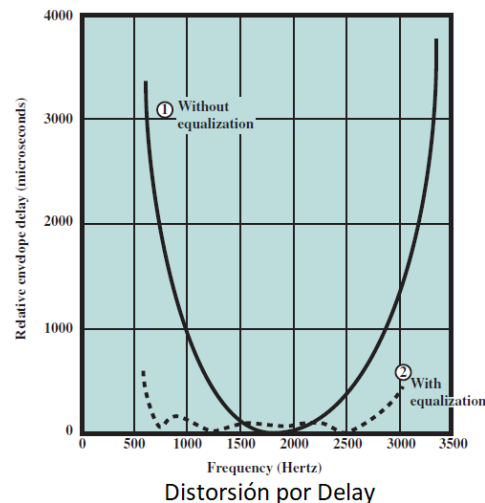


Figura 4.5.2.1: Curvas de distorsión por retardo de un canal de voz

4.5.3. Ruido

En cualquier sistema de transmisión de datos, la señal recibida es el resultado de la señal transmitida que es modificada por dos tipos de perturbaciones:

- Distorsiones impuestas a la señal por el medio de transmisión. Son las ya vistas: atenuación y distorsión por retardo.
- Interferencias espurias. Son ondas electromagnéticas indeseables que se incorporan a la señal en algún lugar entre la transmisión y la recepción. Son designadas genéricamente como ruido y constituyen el factor de mayor limitación en la performance de los sistemas de comunicación.

El ruido puede dividirse en cuatro categorías:

- Ruido térmico
- Ruido de intermodulación
- Ruido por cruce (crosstalk)
- Ruido impulsivo
- Ruido Térmico

Ruido Térmico

La agitación térmica de electrones en un conductor genera perturbaciones eléctricas que interfieren con señal. Está presente en todos los dispositivos electrónicos y medios de transmisión y es una función de la temperatura. El ruido térmico está uniformemente distribuido a lo largo del espectro de frecuencia y, por ese motivo, a

menudo se lo llama ruido blanco. La cantidad de ruido térmico presente en un ancho de banda de 1 Hz en cualquier dispositivo o conductor es:

$$N_0 = k T \text{ (W/Hz)}$$

Dónde:

N_0 = densidad de potencia de ruido (W/Hz)

K = constante de Boltzmann = 1.3803×10^{-23} J/K

T = temperatura en grados Kelvin

Como el ruido térmico es independiente de la frecuencia, la magnitud o intensidad de ruido presente en un determinado ancho de banda B se calcula como la potencia en watts de ruido térmico en ese ancho de banda, y es

$$N = k T B$$

Ejemplo:

Suponga unas instalaciones, dónde la temperatura media es de $T = 20^\circ \text{ C}$, o 293 K. A esta temperatura, la densidad de potencia del ruido térmico es:

$$N_0 = (1.38 \times 10^{-23}) \times 293 = 4,04 \times 10^{-21} \text{ W / Hz} = -20,4 \text{ dBW / Hz}$$

donde dBW es el decibelio vatio (se verá al final de este capítulo)

El ruido térmico no puede ser eliminado y por lo tanto incide fuertemente en la performance de los sistemas de comunicación. Debido a que $N_0 = k T$, la única forma de reducir el ruido térmico es haciendo decrecer la temperatura de los equipos y medios de transmisión.

Ruido por Intermodulación

Este tipo de ruido se produce cuando varias señales de distinta frecuencia comparten un mismo medio de transmisión. Se manifiesta con la aparición de frecuencias suma o diferencia de dos frecuencias originales, o múltiplos de esas frecuencias. Por ejemplo, la mezcla de señales de frecuencias f_1 y f_2 puede generar otra señal cuya frecuencia sea la suma de las dos anteriores, es decir $f_1 + f_2$; en consecuencia, esta señal espuria podría interferir con otra señal original que tenga una frecuencia igual o parecida. Por ejemplo, si dos señales, una a 4000 Hz y uno a 8000 Hz, comparten la misma instalación de transmisión, podrían producir energía a 12,000 Hz. Este ruido podría interferir con una señal prevista en 12,000 Hz.

El ruido por intermodulación es producido por alinealidades existentes en el transmisor, receptor o sistema de transmisión. Normalmente, estos dispositivos se comportan como sistemas lineales; es decir, la salida es igual a la entrada multiplicada por una constante. En un sistema no lineal, la salida es una función más compleja de la entrada. El resultado de esas alinealidades es la generación de componentes de frecuencia espurias.

Ruido por Cruce (Crosstalk)

Se lo detecta normalmente cuando una persona que está hablando por una línea telefónica escucha otra conversación que va por una línea diferente debido a un acoplamiento no deseado entre las líneas. Este tipo de ruido se presenta frecuentemente en cables que contienen varios pares de conductores trenzados como son los cables telefónicos multipares. El orden de magnitud del ruido por cruce es normalmente igual o menor al del ruido térmico.

Todos los tipos de ruido vistos tienen en común que pueden ser razonablemente predecibles; es decir, sus magnitudes son aproximadamente constantes y están presentes en forma continua en el tiempo. Es posible, entonces, cuantificarlos y determinar su incidencia en la calidad de la señal, permitiendo así evaluar la performance cuando se diseña un sistema de comunicación.

Ruido Impulsivo

A diferencia de los anteriores, el ruido impulsivo no es continuo ni previsible; se presenta normalmente en forma de ráfagas de pulsos de corta duración y de gran amplitud, siendo su ocurrencia aleatoria en el tiempo. La presencia de este ruido en la línea puede deberse a una variedad de causas, se manifiesta como una perturbación electromagnética externa. Es generado por relámpagos o por elementos cercanos de cierta potencia como tubos fluorescentes, motores eléctricos en el momento de arranque, soldadores eléctricos, aisladores de líneas de alta tensión con pérdidas.

El perjuicio que causa el ruido impulsivo es normalmente menor en señales analógicas que en señales digitales. Por ejemplo, en la transmisión de voz, la señal se puede corromper debido a crepitaciones o chasquidos de corta duración pero que producen poca o ninguna pérdida de inteligibilidad, siempre que la cantidad de interferencias ocurridas por unidad de tiempo no sea muy alta.

En los datos digitales, en cambio, el ruido impulsivo es la principal fuente de error en la comunicación. Por ejemplo, una espiga de tensión (onda de ruido gran amplitud y corta duración) de 0,01 segundos de duración no afecta a la inteligibilidad de la voz, mientras que a una señal digital que transmite bits a 4.800bps le puede borrar fácilmente 50 bits.

En la Figura 4.5.3.1 se muestra un ejemplo del modo en que afecta el ruido impulsivo a una señal digital. Este ejemplo es un caso típico en que el ruido total en la línea está compuesto por un relativamente moderado nivel de ruido térmico más ocasionales espigas de ruido impulsivo. En el receptor, los datos digitales son recuperados de la señal por comparación de la onda recibida de a un bit por vez. Como se puede observar en dicha figura, el ruido presente en la señal produce error en dos bits.

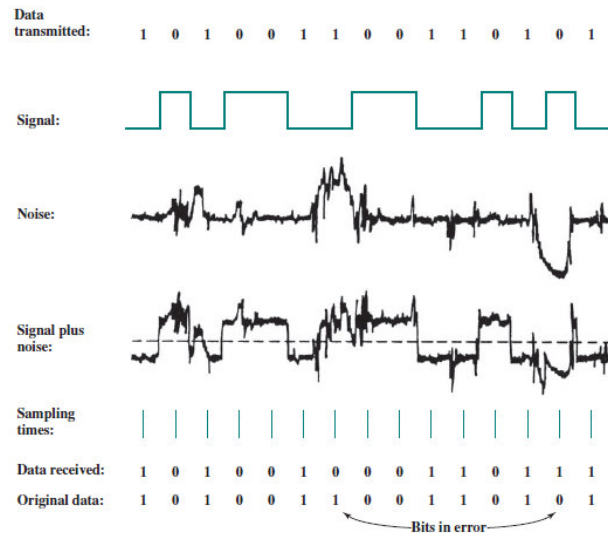


Figura 4.5.3.1: Afectación del ruido impulsivo a una señal digital

4.6. Capacidad del Canal

En esta sección se estudia la relación entre la velocidad que pueden alcanzar los datos digitales en un medio de transmisión y las condiciones que le impone el medio. Se ha visto que existen varias causas que provocan distorsión o corrupción en la señal. Concretamente, la cuestión a resolver aquí es en qué medida estos efectos limitan la velocidad a la que se pueden transmitir los datos digitales. Antes es necesario definir los siguientes conceptos:

- **Canal.** Es la vía o ruta de comunicación por donde circulan los datos que atraviesan el medio de transmisión. En un mismo medio pueden existir uno o más canales.
- **Capacidad del canal.** Es la máxima velocidad a la que se pueden transmitir los datos.
- **Velocidad de transmisión.** Es la velocidad a la que se transmiten los datos y se mide en bits por segundo.
- **Ancho de banda.** Es el ancho de banda de la señal transmitida. Está limitado por el transmisor y por la naturaleza del medio de transmisión. Se mide en ciclos por segundo o hertz.
- **Ruido.** Es el nivel medio de ruido existente en el canal de transmisión.
- **Tasa de error.** Es porcentaje de ocurrencia de errores en una transmisión de bits. Se considera que ha ocurrido un error cuando se recibe un 1 habiéndose transmitido un 0, ó se recibe un 0 habiéndose transmitido un 1.

Más allá de las definiciones precedentes y luego de haber descripto a los datos, señales y sistemas de transmisión; como así también las interferencias que puede

sufrir un mensaje durante su viaje desde el origen al destino, hay dos cuestiones que deben quedar muy claro:

- Desde el punto de vista de la eficiencia, la transmisión de los datos digitales por un canal con un ancho de banda determinado debe realizarse a la mayor velocidad posible.
- Los dos impedimentos que ofrece el canal para alcanzar este cometido son: el ancho de banda del medio de transmisión y el ruido presente, los que conspiran contra la calidad de la transmisión.

4.6.1. Propuesta de Nyquist

Se supone que se trata de un canal sin ruido, por lo tanto, la única limitación en la velocidad de los datos es el ancho de banda del canal. Nyquist formalizó matemáticamente esta limitación para señales de dos niveles y multinivel.

Señal Digital de 2 Niveles

- Si la velocidad de transmisión de datos binarios es $2B$ bps, es suficiente una señal con frecuencias no mayores que B Hz para transportar los datos a esa velocidad. La aseveración inversa también es cierta.
- Dado un canal con ancho de banda de B Hz, la mayor velocidad de transmisión de los datos que se puede obtener es $2B$ bps. Se dice entonces que la capacidad del canal es $2B$. Esta limitación es provocada por la interferencia entre símbolos, similar a la que produce la distorsión por retardo.

Implementación en una línea telefónica

Considérese que se utiliza una línea telefónica para enviar datos digitales. Recuérdese que el envío de datos digitales por un canal de voz debe hacerse por medio de señales analógicas; para esto se utiliza un módem entre el transmisor de los datos y la línea telefónica. Supóngase que se dispone de un ancho de banda de 3.100 Hz. De acuerdo a lo expuesto, la capacidad C del canal sin ruido es $2B$, es decir, $C = 6.200$ bps. Este resultado vale para una señal de dos niveles.

Señal Digital Multinivel

En el caso en que se usa una señal con más de dos niveles, cada elemento de señal puede representar a más de un bit. Por ejemplo, si se tiene una señal con cuatro niveles de tensión, entonces cada elemento de señal puede representar dos bits. Así, la expresión general de Nyquist para señales multinivel es:

$$C = 2B \log_2 M$$

Donde M es la cantidad de niveles discretos de la señal o niveles de tensión.

Implementación en una línea telefónica

Considere utilizar un canal de voz, a través de un módem, para transmitir información digital. Suponga un ancho de banda de 3100 Hz. Entonces la capacidad de Nyquist, C , del canal es $2B = 6200$ bps. Para $M = 8$, un valor utilizado con algunos módems, C se convierte en 18.600 bps para un ancho de banda de 3100 Hz.

De acuerdo a lo expuesto, se tiene que para un dado ancho de banda la velocidad de los datos puede ser aumentada incrementando la cantidad de niveles de la señal. Sin embargo, esto aumenta la dificultad del receptor para extraer el dato de la señal; puesto que, al crecer el número de niveles, menos separación existe entre los mismos y se torna más difícil distinguir entre un nivel y otro. Es decir, en un dado tiempo de señal, el receptor debe distinguir uno de entre M niveles posibles. Esta situación se ve agravada con el ruido y otros factores de deterioro de la señal presentes en la línea de transmisión, limitando de esta manera el valor máximo de M .

4.6.2. Propuesta de Shannon: Canal con Ruido

Esta propuesta considera la presencia de ruido en el canal, lo que configura una situación más real que la anterior. Se determinará, entonces, la relación que existe entre velocidad de los datos, el ruido y la tasa de errores cuando se transmiten datos por un medio ruidoso. El problema se explica intuitivamente con ayuda de la Figura 4.5.3.1. La presencia de ruido en el canal puede corromper uno o más bits. Si en la figura mencionada se incrementa la velocidad del dato, entonces los bits se vuelven más “cortos” en tiempo y, de esta forma, más bits se verán afectados por un dado patrón de ruido. De lo expuesto se puede concluir que, para un dado nivel de ruido, a mayor velocidad del dato, mayor será la tasa de errores.

Por otra parte, para un nivel de ruido determinado, se podría esperar que, a mayor amplitud de la señal mejore la capacidad del receptor para recibir correctamente el dato que viene mezclado con ruido. Entonces, el parámetro clave involucrado en este razonamiento es la relación señal a ruido (S/N o SNR), que representa el cociente entre la potencia de una señal y la potencia de ruido que está presente en un punto particular del medio de transmisión (Figura 4.6.2.1). Típicamente este cociente se mide en el receptor, debido a que en este punto es donde se rescata y procesa la señal para de luego, intentar eliminar el ruido de la misma. Por conveniencia, este cociente es a menudo expresado en decibeles:

Altos valores de S/N indican una alta calidad de la señal, es decir, se requiere un número menor de repetidores intermedios. La relación señal a ruido en un canal es importante en la transmisión de datos digitales debido a que determina la máxima velocidad que se puede conseguir. Por conveniencia, la relación señal/ruido muchas veces es presentada en forma de decibelios:

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} (\text{potencia señal/potencia del ruido})$$

Esto expresa la cantidad, en decibelios, que la señal deseada excede el nivel de ruido. Una SNR alta significará una señal de alta calidad y la necesidad de requerir un bajo número de repetidores intermedios.

Los conceptos expuestos fueron desarrollados matemáticamente por Claude Shannon y la conclusión es que la capacidad máxima de un canal en bits por segundo está dada por la expresión:

$$C = B \log_2 (1 + S/N) \text{ o } C = B \log_2 (1 + \text{SNR}) \text{ (fórmula 1)}$$

Donde C es la capacidad el canal en bits por segundo y B es el ancho de banda del canal en hertz.

Cálculo de la capacidad del canal sobre una línea telefónica con ruido

Considérese que se utiliza un canal de voz a través de un módem para transmitir datos digitales. Supóngase un ancho de banda de 3.100 Hz. Un valor típico de S/N para una línea telefónica es 30 dB; es decir, una relación de 1.000 a 1. Así,

$$C = 3.100 \log_2 (1 + 1.000) = 30.894 \text{ bps.}$$

El valor calculado de C representa el máximo teórico que puede alcanzar la velocidad de los datos en las condiciones señaladas.

En la práctica se alcanza un valor de velocidad mucho menor que el obtenido en el ejemplo anterior. Una razón que explica este comportamiento en la realidad es que la fórmula supone que el ruido es ruido blanco (ruido térmico). No tiene en cuenta el ruido impulsivo, ni la atenuación, ni la distorsión por retardo. A continuación, desarrollan las definiciones de capacidad de canal y de eficiencia de la transmisión digital:

- Capacidad del canal libre de errores: $C = B \log_2 (1 + S/N)$.
- Eficiencia de la transmisión digital. Es la cantidad bps por hertz que pueden transmitir un canal. Esta medida está determinada por la relación C/B.

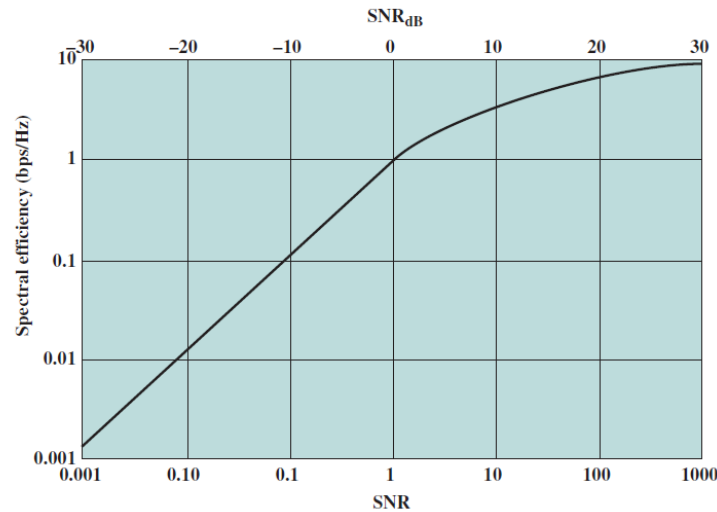


Figura 4.6.2.1: Eficiencia espectral y nivel señal/ruido

Se llama eficiencia espectral, también llamada eficiencia de ancho de banda, de un sistema de transmisión digital, al número de bits por segundo de datos que puede admitir cada hertz de ancho de banda. La máxima eficiencia espectral teórica se puede expresar usando la fórmula 1 moviendo el ancho de banda B hacia el lado izquierdo, resultando en $C / B = \log_2 (1 + \text{SNR})$. C / B tiene las dimensiones bps / Hz. La figura 4.6.2.1 muestra los resultados en una escala log / log. En $\text{SNR} = 1$, tenemos $C / B = 1$. Para $\text{SNR} < 1$ (la potencia de la señal es menor que la potencia de ruido), la trama es lineal; por encima de $\text{SNR} = 1$, la trama se aplana, pero continúa aumentando con el aumento de SNR .

Podemos hacer varias observaciones sobre la figura 4.6.2.1. Por debajo de 0 dB SNR, el ruido es el factor dominante en la capacidad de un canal. El teorema de Shannon muestra que las comunicaciones son posibles en esta región, pero a una velocidad de datos relativamente baja, una velocidad que se reduce en proporción a la SNR (en una escala log / log). En la región de al menos 6 dB por encima de 0 dB SNR, el ruido ya no es el factor limitante en la velocidad de las comunicaciones. En esta región, hay poca ambigüedad en la amplitud relativa de una señal y fase, y lograr una alta capacidad de canal depende del diseño de la señal, incluyendo factores como el tipo de modulación y la codificación.

Varias otras observaciones sobre la ecuación anterior pueden ser instructivas. Para un nivel de ruido dado, parecería que la velocidad de datos podría aumentarse aumentando la intensidad de la señal o el ancho de banda. Sin embargo, como la intensidad de la señal aumenta, los efectos de las no linealidades en el sistema también aumentan, lo que lleva a un aumento en el ruido de intermodulación. Tenga en cuenta también que, porque se supone que el ruido es blanco, cuanto más ancho es el ancho de banda, más ruido se admite en el sistema. Por lo tanto, como B aumenta, SNR disminuye.

Desarrollo de un ejemplo:

Consideremos un ejemplo que relaciona el Nyquist y la fórmula de Shannon. Supongamos que el espectro de un canal está entre 3 MHz y 4 MHz y $\text{SNR}_{\text{dB}} = 24 \text{ dB}$. Entonces:

$$B = 4 \text{ MHz} - 3 \text{ MHz} = 1 \text{ MHz}$$

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 24 \text{ dB} = 10 \log_{10} (\text{SNR})$$

$$\text{SNR} = 251$$

Usando la fórmula de Shannon:

$$C = 10^6 * \log_2(1 + 251) \text{ aproximadamente } 10^6 * 8 = 8 \text{ Mbps}$$

Este es un límite teórico y, como hemos dicho, es poco probable que se alcance. Pero supongamos que podemos alcanzar el límite. Según la fórmula de Nyquist, ¿cuántos niveles de señales se requieren para lograr ese límite? Tenemos:

$$C = 2B \log_2 M$$

$$8 * 10^6 = 2 * (10^6) * \log_2 M$$

$$4 = \log_2 M$$

$$M = 16$$

La expresión E_b / N_0

Finalmente, se explica un parámetro relacionado con SNR que es más conveniente para determinar tasas de datos digitales y tasas de error y esa es la medida de calidad estándar para el rendimiento del sistema de comunicación digital. El parámetro es la relación de energía de la señal por bit a densidad de potencia de ruido por hertz, E_b / N_0 .

Considere una señal, digital o analógica, que contiene datos digitales binarios transmitidos a una determinada velocidad de bits R . Recordando que $1 \text{ vatio} = 1 \text{ J / s}$, la energía por bit en una señal viene dada por $E_b = ST_b$, donde S es la potencia de la señal y T_b es el tiempo requerido para enviar 1 bit. La velocidad de datos R es solo $R = 1 / T_b$. Así:

$$E_b / N_0 = S/R / N_0 = S / kTR$$

O usando una notación en decibelios:

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{dB}} &= S_{\text{dBW}} - 10 \log R - 10 \log k - 10 \log T \\ &= S_{\text{dBW}} - 10 \log R + 228.6 \text{ dBW} - 10 \log T \end{aligned}$$

La relación E_b / N_0 es importante porque la tasa de error de bits para datos digitales es (decreciente) en función de esta relación. Dado un valor de E_b / N_0 necesario para lograr una tasa de error deseado, se pueden seleccionar los parámetros en la fórmula anterior. Tenga en cuenta que como la velocidad de bit aumenta (R), la potencia de la señal transmitida, en relación con el ruido, debe aumentar para mantener el E_b / N_0 requerido.

Tratemos de comprender este resultado intuitivamente al considerar nuevamente la figura 4.5.3.1. La señal aquí es digital, pero el razonamiento sería el mismo para una señal analógica. En varios casos, el ruido es suficiente para alterar el valor de un bit. Si la velocidad de los datos se duplicó, los bits estarían más apretados y la misma “porción” de ruido puede ahora destruir 2 bits. Por lo tanto, para una relación señal / ruido constante, un aumento en la velocidad de datos aumenta la tasa de error. La ventaja de E_b / N_0 sobre SNR, es que la última cantidad depende del ancho de banda.

Desarrollo de un ejemplo:

Para la técnica de codificación de desplazamiento de fase binaria (se estudia en el Capítulo 5), se requiere $E_b / N_0 = 8.4$ dB para una tasa de error de 10^{-4} (error de 1 bit de cada 10,000). Si la temperatura efectiva de ruido es 290 K (temperatura ambiente) y la velocidad de datos es de 2400 bps, ¿qué nivel de señal recibida se requiere? Tenemos entonces:

$$\begin{aligned} 8.4 &= S(\text{dBW}) - 10 \log 2400 + 228.6 \text{ dBW} - 10 \log 290 \\ &= S(\text{dBW}) - 110213.382 + 228.6 - 110212.462 \\ S &= -161.8 \text{ dBW} \end{aligned}$$

4.7. Apéndice A

Un parámetro importante en cualquier sistema de transmisión es la intensidad de la señal. Como una señal se propaga a lo largo de un medio de transmisión, habrá una pérdida o atenuación de la intensidad de la señal. Para compensar esa atenuación, amplificadores pueden insertarse en varios puntos para insertar una ganancia en la intensidad de la señal.

Es costumbre expresar ganancias, pérdidas y niveles relativos en decibelios porque:

- La intensidad de la señal a menudo cae exponencialmente, por lo que la pérdida se expresa fácilmente en términos de decibel, que es una unidad logarítmica.
- La ganancia o pérdida neta en una ruta de transmisión en cascada se puede calcular con una simple suma y resta.

El decibel es una medida de la relación entre dos niveles de señal. La ganancia de decibelios está dada por:

$$G_{dB} = 10 \log_{10} (P_{salida} / P_{entrada}), \text{ dónde}$$

G_{dB} = ganancia en decibelios

$P_{entrada}$ = nivel de potencia de entrada

P_{salida} = nivel de potencia de salida

\log_{10} = logaritmo en base 10

Existe cierta inconsistencia en la literatura sobre el uso de los términos ganancia y pérdida. Si el valor de G_{dB} es positivo, esto representa una ganancia real de potencia. Por ejemplo, una ganancia de 3 dB significa que la potencia se ha duplicado aproximadamente. Si el valor de G_{dB} es negativo, esto representa una pérdida real de poder. Por ejemplo, una ganancia de -3 dB significa que la potencia se ha reducido aproximadamente a la mitad, y esto es una pérdida de poder. Normalmente, esto se expresa diciendo hay una pérdida de 3 dB. Sin embargo, parte de la literatura diría que esta es una pérdida de -3 dB. Tiene más sentido decir que una ganancia negativa corresponde a una pérdida positiva. por lo tanto, se define una pérdida de decibelios como:

$$L_{dB} = -10 \log_{10} (P_{out} / P_{in}) = 10 \log_{10} (P_{in} / P_{out}) \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Por ejemplo: Si se inserta una señal con un nivel de potencia de 100 mW en una línea de transmisión y la potencia medida a cierta distancia es de 15 mW, la pérdida puede expresarse como

$$L_{dB} = 10 \log (100/15) = 10 (0.301) = 8.23 \text{ dB.}$$

Los valores de decibelios se refieren a magnitudes relativas o cambios de magnitud, no a valores absolutos. Es conveniente poder referirse a un nivel absoluto de potencia o voltaje en decibelios para que las ganancias y pérdidas con referencia a un nivel de señal inicial se puedan calcular fácilmente.

El dBW (decibelio-vatio) se usa ampliamente en aplicaciones de microondas. El valor de 1 W es seleccionado como referencia y definido como 0 dBW. El nivel absoluto de decibelios de potencia en dBW se define como:

$$\text{Power}_{dBW} = 10 \log (\text{Power}_W / 1 \text{ W})$$

Así, por ejemplo, una potencia de 1000 W es 30 dBW, y una potencia de 1 mW es -30 dBW

Otra unidad común es el dBm (decibel-milivatio), que utiliza 1 mW como referencia. Así, 0 dBm = 1 mW. La fórmula es:

$$\text{Power}_{dBm} = 10 \log (\text{Power}_{mW} / 1 \text{ mW})$$

Tenga en cuenta las siguientes relaciones:

$$+ 30 \text{ dBm} = 0 \text{ dBW}$$

$$0 \text{ dBm} = -30 \text{ dBW}$$