

Introducción

El nivel físico es el encargado de establecer una conexión entre dos nodos y de enviar los datos como unos y ceros (u otra forma análoga). Para ello, este nivel define detalles físicos como conectores, características del medio y las características de la señal.

Frecuencia, longitud de onda y período

Una onda electromagnética se propaga en el vacío a 300 000 km/s, y a velocidades menores en otros medios. Una onda tiene una frecuencia, es decir la cantidad de veces que oscila por segundo. Intimamente ligada a la frecuencia está la longitud de onda, la distancia entre el comienzo de dos oscilaciones adyacentes. Una onda puede ser caracterizada tanto por su frecuencia como por su longitud de onda, ya que una es inversamente proporcional a la otra.

Dominio de tiempo y dominio de frecuencia

Una onda puede analizarse de dos formas: en el dominio del tiempo y en el dominio de frecuencia. El dominio del tiempo es la forma más común de ver una señal. Para graficarla, en un eje se muestra el tiempo y en el otro la amplitud. La señal se grafica muestreandola y anotando la amplitud de la misma en un momento dado.

Sin embargo, esta no es la única forma de mostrar una señal. El teorema de Fourier dice que una onda periódica se puede ver como la suma de senos y cosenos. Este mismo concepto se puede aplicar a señales no periódicas, aplicando (entre otras posibilidades) la transformada de Fourier.

La aplicación de esta transformada deja como resultado los coeficientes correspondientes a cada término de la serie, los cuales son senos y cosenos con frecuencias que son múltiplos de la frecuencia de la señal en el dominio del tiempo. Es decir, la señal se descompone en una fundamental y varias armónicas (cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental).

Esta transformada nos da la segunda forma de analizar una señal, el dominio de la frecuencia. La señal se analiza poniendo en un eje la frecuencia, y en el otro eje la amplitud. Luego se grafica la amplitud de la señal en cada frecuencia (expresada por el valor del coeficiente de la transformada de Fourier para cada término).

Ancho de banda

El análisis de una señal en el dominio de la frecuencia muestra claramente el fenómeno de ancho de banda. Dado un medio, si en este se introduce una señal y luego se comparan la señal original y la salida en el dominio de la frecuencia, la salida no será necesariamente igual a la entrada, sino que probablemente la salida tenga la misma amplitud en algunos coeficientes, mientras que más abajo de cierta frecuencia y más arriba de otra los coeficientes tengan una amplitud menor, o cero. Estas frecuencias se llaman respectivamente la frecuencia de corte inferior y la frecuencia de corte superior.

Estas frecuencias de corte están dadas por el medio, y se deben a limitaciones del mismo. Estas frecuencias son distintas según el medio usado, lo que causa que distintos tipos de medio causen distintas distorsiones a las señales que pasan por él. Es importante aclarar que “medio” no se refiere necesariamente a un cable u otro medio de transmisión, ya que en este caso puede tratarse de cualquier dispositivo, ya que cualquier cosa que acepte una señal y la devuelva (un amplificador, un medio de almacenamiento, etc) está sujeto a las limitaciones mencionadas.

Muestreo

Para procesar una señal por medios digitales, primero es necesario obtener una representación adecuada que le sirva al sistema para su uso. Para ello, primero es necesario tomar muestras en intervalos regulares. Una vez tomadas estas muestras, es necesario codificarlas de forma tal que puedan representarse con valores discretos. La toma de las muestras se llama “muestreo”, mientras que la representación en forma discreta se llama “cuantización”.

Para saber cuantas muestras tomar, se recurre al teorema de Nyquist, también conocido como teorema del muestreo. Este teorema dice:

Dada una señal limitada en ancho de banda H , para reconstruirla correctamente es necesario tomar muestras con una frecuencia de $2H$.

Por ejemplo, si una señal tiene un ancho de banda de 100 KHz, habrá que tomar 200 000 muestras por segundo para reconstruirla. Tomar menos muestras haría que hubiera más de una posible reconstrucción, mientras que tomar más sería innecesario, ya que las muestras adicionales no aportan información.

Para el paso de cuantización, la amplitud es dividida en una cantidad finita de intervalos, y cuando una señal es muestreada, se la cuantiza con el valor correspondiente al intervalo en el que se hallaba la señal. Este paso introduce un error, llamado error de cuantización.

Multiplexación

Cuando se comparte un medio, es necesario decidir de qué forma los distintos canales lo usarán y cómo se lo debe dividir para que sea compartido de forma eficiente y justa. Un ejemplo de este fenómeno se vio en la introducción del concepto de conmutación de paquetes. En este paradigma, por cada enlace pueden pasar paquetes de distintas comunicaciones. Esto causa un efecto de multiplexación estadística (el medio no es compartido siguiendo un esquema rígido, pero asumiendo una demanda similar por parte de cada nodo, el medio será dividido en partes iguales para cada estación).

Dos esquemas de multiplexación son TDM y FDM.

FDM consiste en dividir un canal físico en distintas frecuencias. Una vez hecha esta división, cada una se asigna a un emisor distinto. TDM consiste en usar todo el ancho de banda de un canal, pero asignar a cada emisor una fracción del tiempo total.

Ruido blanco/impulsivo

Ruido es cualquier distorsión o señal no deseada interfiriendo con una transmisión.

El ruido puede clasificarse en dos categorías:

- Ruido blanco o térmico
- Ruido impulsivo

El ruido blanco es un ruido causado por las características físicas del medio. El movimiento de los electrones en el medio (causado porque este se encuentra a una temperatura superior al cero absoluto) causa un siseo de fondo. Este siseo está presente en cualquier medio y aunque causa una reducción en la capacidad de transmisión, puede ser tratado con relativa facilidad ya que al estar presente y depender del medio elegido, se lo puede tratar con cierta facilidad durante el diseño de un protocolo.

El ruido impulsivo es ruido causado por una fuente externa. Un ejemplo clásico es interferencia

causada por equipo eléctrico, que interfiere con una señal en un receptor de radio. Este tipo de ruido es impredecible y usualmente causa errores en la transmisión de datos.

Teorema de Shannon

El ruido tiene impacto en la capacidad de envío de datos. El ruido impulsivo puede causar errores en una transmisión, debido a su gran amplitud. Por su parte, aunque el ruido blanco no tiene tanta amplitud, está constantemente interfiriendo con la señal, lo que limita las capacidades del medio.

Conociendo el concepto de ruido blanco, es fácil entender la idea de relación señal/ruido, o sea la relación entre el piso de ruido blanco y la señal. Esta relación puede expresarse tanto de forma lineal, por ejemplo indicando que la señal tiene una amplitud 20 veces mayor al ruido, o de forma logarítmica, expresando esta relación en decibeles, de acuerdo con la siguiente fórmula

$$R_{db} = 10 * \log_{10} (S/N)$$

Es usual expresar la diferencia de dos señales en decibeles, ya que hay una gran cantidad de fenómenos que responden de forma logarítmica, como la atenuación en un medio en relación a la distancia recorrida, o la respuesta del oído humano. Puesto que el piso de ruido puede verse como una señal, es razonable medir la relación señal/ruido en decibeles.

La relación señal/ruido es importante, ya que de acuerdo con el teorema de Shannon, la presencia de ruido degrada la capacidad de un medio de transportar información.

$$C = BW * \log_2(1 + S/N)$$

en donde C es la capacidad del medio en bits por segundo, BW es el ancho de banda en Hertz y S/N es la relación lineal señal/ruido.

Sabiendo el ruido blanco presente en un medio, la potencia de transmisión de una señal y el ancho de banda del medio, es posible determinar cuánta información será posible enviar por el medio y que pueda ser entendida por el emisor.

De la fórmula de capacidad de información se puede entender que cuanto más ancho de banda se disponga para usar, mayor será la tasa de transmisión, y que cuanto mayor sea la relación señal/ruido (ya sea porque el canal es poco ruidoso, o porque la señal es más potente) mayor será la tasa de transmisión.

Codificación analógica

Debido a las limitaciones de ancho de banda mencionadas anteriormente, usualmente no es posible pasar una señal digital directamente sobre un medio con un ancho de banda limitado, puesto que la señal tiene una gran cantidad de armónicas, esta se deformaría al punto de no ser entendible por el receptor.

Para evitar este tipo de problemas se puede usar una señal cuya frecuencia se encuentre en el rango que el medio deje pasar, llamada portadora, y manipular alguna de sus características, como amplitud, frecuencia o fase. Esta manipulación se la conoce como modulación de la portadora.

FSK

Frequency Shift Keying es una técnica en la que los diferentes símbolos se codifican cambiando la frecuencia de la portadora. Es el equivalente digital de FM.

ASK

Amplitude Shift Keying se basa en cambiar la amplitud de la portadora para codificar la información para enviar. A pesar de estar trabajando con la amplitud, estos cambios tienen un impacto en el dominio de la frecuencia y en consecuencia también son afectados por el ancho de banda disponible (al igual que cualquier otra forma de codificar). Es el equivalente digital de AM.

PSK

Phase Shift Keying se basa en modular la fase de una señal. Para comprender este concepto, es necesario pensar en la señal como el resultado de un vector girando, en donde el valor del eje y es proyectado a lo largo del tiempo.

Un cambio de fase consiste en cambiar el ángulo en el cual se encuentra el vector en un momento dado. Esto causa que la onda se desplace, o sea que sufra un cambio de fase.

Constelaciones

En la práctica, es común usar más de una técnica de modulación simultáneamente, con el fin de incrementar la cantidad de bits transmitidos por cada cambio de modulación. Una técnica común es mezclar cambios de amplitud y fase. Usualmente los posibles estados se diagraman en un plano, en donde uno de los ejes corresponde a cierto valor de amplitud y el otro eje la fase. Puesto que la cantidad de cambios requeridos crece exponencialmente a medida que se agregan bits por cada modulación, se terminan creando gráficos con una gran cantidad de estados ordenados en forma de cuadrado o círculo sobre el plano. Estos gráficos son conocidos como constelaciones.

Codificación digital

En algunos casos, el ancho de banda de un medio es suficientemente grande como para enviar la señal digital directamente. Aunque el medio tenga un ancho de banda limitado, y en consecuencia deforme la señal, si esta deformación es pequeña, la señal puede interpretarse correctamente directamente como valores discretos.

En estos casos, el énfasis de la codificación está en permitir una sincronización entre el emisor y receptor.

NRZ

Non-Return to Zero es una codificación en la cual se utiliza un voltaje positivo para indicar un valor (por ejemplo un 1) y uno negativo para indicar el otro (un 0). Mientras se están enviando datos por el canal, la señal no retorna a cero (al menos no por más de un tiempo despreciable).

Esta codificación permite distinguir fácilmente cuando hay datos de cuando no, pero tiene problemas de sincronización si se repiten muchas veces un mismo valor.

NRZI

Non-Return to Zero Invertida es una codificación similar a NRZ, pero en versión diferencial. Esto significa que a diferencia de NRZ, el valor a usar depende del valor actual y el nuevo valor a enviar. Si el nuevo valor a enviar es un cero, la señal queda en el mismo nivel, mientras que si se desea enviar un uno, se cambia la señal al otro nivel (se invierte la señal).

El efecto de usar una codificación diferencial en NRZI es la reducción del problema de las múltiples repeticiones a simplemente un problema cuando se repiten ceros varias veces. Si se estuvieran repitiendo gran cantidad de unos, la señal alternaría constantemente y estos cambios permiten

resincronizar al emisor y receptor.

Manchester

Una codificación que no causa problemas de sincronización es Manchester. Esta codificación define que en cada bit enviado, físicamente se deben enviar dos niveles y que en el medio del bit debe haber una transición. Usando manchester, un cero puede representarse como un nivel alto seguido de uno bajo y un uno puede mandarse como un nivel bajo seguido de uno alto. Entre bits, se realizan transiciones si se las requiriera para cumplir esta regla (por ejemplo si se desean enviar dos unos seguidos).

Puesto que en el medio de cada bit hay una transición, el receptor puede conocer con certeza el reloj del emisor, ya que esa transición le marca la mitad exacta del tiempo de bit, lo que le permite al receptor corregir pequeñas diferencias que su reloj pudiera tener con el del emisor.

Desafortunadamente, esta codificación requiere el doble de transiciones por unidad de tiempo, lo que significa que o bien el medio de transmisión debe ser mejor que el de NRZ/NRZI o que se debe enviar información a la mitad de la velocidad que se lograría con esas codificaciones.

4B/5B

4B/5B es una codificación digital que busca mantener las bondades de manchester sin hacer un sacrificio tan grande de la eficiencia.

La codificación funciona creando una tabla con los 16 valores lógicos a enviar, y mapeandolos a 16 valores de 5 bits físicos con las siguientes condiciones

- No más de un cero al principio
- No más de dos ceros al final
- No más de tres ceros consecutivos, para todo código de 5 bits

El resultado final es que no importa qué se desee enviar, en ningún momento se van a estar enviando más de tres ceros seguidos. Si estos bits físicos se envían sobre NRZI, no van a haber problemas de sincronización si el receptor puede tolerar una ráfaga de tres ceros seguidos (ya que 4B/5B se encarga de que no ocurran más y NRZI causa una transición cuando transmite un uno). Adicionalmente, esta codificación tiene 80% de eficiencia respecto a NRZ, comparado con 50% de manchester.