

LA MODULACIÓN POR IMPULSOS CODIFICADOS

La Modulación por Impulsos Codificados, PCM

Cuando queremos presentar datos de medición de un proceso físico, podemos usar gráficos o tablas. Como el gráfico se comporta en el papel del mismo modo que el parámetro físico medido lo hace en el proceso, se dice que el gráfico es una representación analógica del parámetro físico. Una tabla reproduce el comportamiento del parámetro físico, por medio de una cantidad de valores medidos, expresados mediante dígitos: es decir, una tabla es una representación digital del parámetro.

Por supuesto, son posibles las conversiones entre gráficos y tablas, porque representan la misma información. Para ir de gráfico a una tabla, elegimos una cantidad de puntos en el gráfico y leemos sus valores numéricos en las escalas de los ejes. En la otra dirección, de una tabla a un gráfico, representamos gráficamente los valores de la tabla y trazamos una curva uniforme, a través de ellos. Las escalas y la cantidad de puntos deben elegirse de modo que el gráfico sea suficientemente bueno para nuestro propósito particular. Una replica exacta no es posible ni necesaria.

Esto explica los principios fundamentales de la modulación por impulsos codificados (PCM). En los sistemas de transmisión de frecuencia vocal y con FDM, transferimos la conversación a formas eléctricas analógicas, pero en la PCM transferimos la conversación a una tabla donde los valores de la tabla están codificados en forma eléctrica. El modulador de impulsos codificados elige una cantidad de puntos en la señal de conversación eléctrica analógica, mide sus valores numéricos en las escalas, que representan la amplitud y el tiempo, y transmite los valores numéricos sobre la línea de transmisión hacia el demodulador de impulsos codificados. El demodulador de impulsos codificados representa gráficamente los valores de la tabla de conversación y traza una curva uniforme entre los puntos: es decir, reconstruye la señal de conversación analógica.

Obviamente, tenemos que elegir las escalas y la cantidad de puntos, de modo que la señal reconstruida sea suficientemente buena para nuestro propósito de telefonía por razones económicas, sin embargo, queremos limitar la cantidad de valores de las tablas y su exactitud. Este capítulo describe cómo se satisface este problema de optimización.

I) Los principios de la PCM

Introducción

La presentación anterior da alguna idea sobre los procesos básicos de la modulación por impulsos codificados. Aquí daremos a estos procesos sus nombres correctos.

El proceso de elegir los puntos de medición en la curva de conversación analógica se denomina muestreo. Los valores de medición se denominan muestras. Cuando efectuamos el muestreo, damos el primer paso hacia la representación digital de la señal de conversación, porque los instantes de muestreo elegidos nos dan las coordenadas de tiempo de los puntos de medición.

Las amplitudes de las muestras pueden tomar todos los valores de la gama de amplitudes de la señal de conversación. Cuando medimos las amplitudes de las muestras tenemos que efectuar un redondeo, por razones prácticas. En el proceso de redondeo, o proceso de cuantificación, todas las amplitudes de las muestras entre dos marcas de la escala se les dará el mismo valor cuantificado. La cantidad de muestras cuantificadas es discreta, porque tenemos sólo una cantidad discreta de marcas en nuestra escala.

Luego, cada muestra cuantificada se representa por el número de la marca de la escala: es decir, ahora conocemos las coordenadas en el eje de amplitud de las muestras.

El proceso de muestreo y cuantificación brinda una representación digital de la señal de conversación original, pero no en una forma más apropiada para la

transmisión sobre una línea o itinerario de radio. Se requiere la traslación a una forma de señal diferente.

Este proceso se denomina codificación. Generalmente, los valores de las muestras se codifican en la forma binaria, de modo que el valor de cada muestra se representa con un grupo de elementos binarios.

Típicamente, una muestra cuantificada puede tomar uno de 256 valores. En forma binaria, la muestra estará representada por un grupo de 8 elementos. De aquí en adelante, este grupo se denomina palabra PCM. Para los propósitos de transmisión, los valores binarios 0 y 1 pueden tomarse como correspondientes a la ausencia o presencia de un impulso eléctrico.

En la línea de transmisión, los impulsos de las palabras PCM se distorsionarán gradualmente. Sin embargo, mientras sea posible distinguir entre la ausencia y la presencia de un impulso, no ha concurrido ninguna pérdida de información. Si el tren de impulsos es regenerado, es decir, los impulsos muy distorsionados son remplazados por impulsos frescos, a intervalos adecuados., la información puede transmitirse a largas distancias con prácticamente nada de distorsión. Esta es una de las ventajas de la transmisión digital sobre la transmisión analógica: la información está contenida en la existencia o no de un impulso en vez de estarlo en la forma del impulso.

En nuestra imagen del gráfico y la tabla, esto es análogo al hecho de que la información de la tabla no se afecta si los dígitos están mal escritos, mientras sean legibles. Pero si el gráfico está mal trazado, la pérdida de información es inevitable.

En el lado de recepción, las palabras PCM se decodifican, es decir, se trasladan nuevamente a muestras cuantificadas, La señal de conversación analógica se reconstruye luego mediante interpolación entre las muestra cuantificadas. Hay una pequeña diferencia entre la señal de conversación analógica del lado de recepción y la señal correspondiente del lado de transmisión, a causa del redondeo de la muestra de conversación. Esta diferencia se conoce como distorsión de cuantificación.

Los bloques de funciones en el proceso de modulación por impulsos codificados se muestran en la figura 1. Estas funciones se tratan con más detalle, a continuación.

Muestreo

En el significado eléctrico práctica, muestrear es tomar valores instantáneos de la señal analógica, a intervalos de tiempo iguales. Véase la figura 2.

La señal muestreada es un tren de impulsos, cuya envolvente es la señal original.

Ahora, ¿Cuál deberá ser la velocidad de muestreo, es decir, la cantidad de muestras por segundo?, La respuesta a esta pregunta está dada por el teorema del muestreo que también ilustra el hecho fundamental de que la información contenida en la señal no es afectada por el muestreo.

La señal muestreada contiene, dentro de sí, toda la información sobre la señal original, si:

- a) La señal original tiene limitación de banda, es decir, no tiene componentes de frecuencia en su espectro, más allá de cierta frecuencia B .
- b) La velocidad del muestreo es igual o superior al doble de la frecuencia B , es decir $FS \geq 2B$. El teorema del muestreo se ilustra en la figura 3.
- c) Obviamente, el espectro de la señal muestreada contiene el espectro de la señal original, es decir, no ha ocurrido pérdida de información.

En telefonía, se usa la parte del espectro de conversación entre 300 y 3400 Hz. El espectro de la conversión humana se extiende desde una frecuencia más baja de alrededor de 100Hz, hasta frecuencias de audio muy altas. El aparato telefónico reduce esta gama de frecuencias, pero no lo suficiente a altas frecuencias, de modo que, a fin de que quede por debajo de este límite de banda de 3400 Hz, la señal de conversación debe pasarse por un filtro pasa bajos, antes del muestreo.

En telefonía, se usa una velocidad de muestreo de 8 000Hz, para los sistemas de PCM. Esta velocidad es algo superior al doble de la frecuencia más alta de la banda, 3400Hz, a causa de la dificultad en la construcción de filtros pasa bajos suficientemente cortantes.

A menudo se dice que la señal muestreada esta modulada por amplitud de impulsos, porque consiste en un tren de impulsos cuyas amplitudes han sido moduladas por la señal original. La modulación por amplitud de impulsos (Pulse Amplitude Modulation PAM) es un método analógico de modulación de impulsos, porque las amplitudes de los impulsos pueden variar de manera continua, de acuerdo con las variaciones de la señal original.

La relativa simplicidad de los sistemas PAM los hace atractivos para algunas aplicaciones telefónicas. No obstante, la PAM no es adecuada para la transmisión en distancias largas, a causa de la dificultad de la regeneración de los impulsos con suficiente exactitud, lo cual es importante porque los impulsos PAM contienen la información en la forma del impulso.

Cuantificación

La gama continua de amplitudes de los impulsos se descompone en una cantidad finita de valores de amplitud, en el proceso de cuantificación. La gama de amplitudes se divide en intervalos y a todas las muestras cuyas amplitudes caen dentro de un intervalo de cuantificación específico se les da la misma amplitud de salida. Véase la figura 4. El redondeo de las muestras provoca un error irrepetible, distorsión de cuantificación, en la señal.

Este sacrificio voluntario, que puede reducirse a limites bajos adecuados, haciendo que la cantidad de niveles de amplitud permitidos sea suficientemente grande, se acepta porque hace posible la transmisión libre de errores, teniendo sólo una cantidad discreta de amplitudes.

En la figura 4 la distorsión de cuantificación es independiente de la amplitud de la muestra. Esto significa que una persona que habla en voz alta y una que habla en voz baja hacen que el que escucha oiga la misma distorsión de

cuantificación. Con respecto a los niveles de distorsión, el que habla en voz baja genera mucho más distorsión que el que habla en voz alta. Además, un análisis estadístico muestra que para un hablante individual, las amplitudes pequeñas son mucho más probables que las grandes.

A fin de obtener una distorsión de cuantificación aceptable sobre toda la gama dinámica de la señal de conversación, los intervalos de cuantificación deben medirse con respecto a los niveles de conversación bajos, es decir, los intervalos de cuantificación deben ser muy pequeños. De este modo, la distorsión de cuantificación a altos niveles de conversación será mucho menor que la requerida, pero al costo de una gran cantidad de intervalos de cuantificación.

Obviamente, el error de cuantificación no será independiente de la amplitud de las muestras, sino que estará relacionado con ella, de modo que las muestras pequeñas están sometidas a pequeños errores de cuantificación y las muestras grandes están sometidas a grandes errores de cuantificación, a fin de encontrar una solución óptima entre la calidad de la transmisión y la cantidad de intervalos de cuantificación.

Esto puede efectuarse de dos maneras, o comprimiendo el rango dinámico de la señal antes de la cuantificación y expandiéndolo nuevamente en el lado de la recepción, o usando intervalos de cuantificación crecientes con la amplitud.

Este proceso a menudo se denomina compansión (compresión y expansión). Los sistemas PCM modernos usan el último método de compansión. Con una ley aproximadamente logarítmica que gobierna el aumento en el tamaño del intervalo de cuantificación es posible obtener una relación aproximadamente constante de señal a distorsión de cuantificación en una amplia gama de volúmenes de conversación, empleando, a la vez, mucho menos niveles de los que se requerirían con intervalos de cuantificación uniforme. Para la PCM en la telefonía, el CCITI ha recomendado dos leyes, que son conocidas comúnmente como la ley "A" y la ley "μ". La ley "A", se muestra en la figura 5.

Estas leyes también se denominan leyes de codificación, porque en los casos prácticos el proceso de cuantificación se efectúa en el codificador.

Codificación

Las muestras cuantificadas todavía no son apropiadas para la transmisión, porque sería difícil construir circuitos regeneradores capaces de distinguir entre la gran cantidad de amplitudes de las muestras usualmente 256, que necesitamos para las señales de conversación.

Sin embargo, hay gran flexibilidad en la codificación de estas amplitudes en formas eléctricas adecuadas para la transmisión. En general, la muestra cuantificada puede codificarse en dos o más impulsos con menores niveles de amplitud por impulso. Un grupo de n impulsos, cada uno con B niveles posibles de amplitud discreta, puede representar b^n niveles de muestras cuantificadas. Véase la figura 6.

Como sabemos, los impulsos con dos niveles, es decir, los impulsos binarios, son atractivos para la transmisión, porque son fáciles de regenerar en la línea de transmisión. No es difícil construir circuitos regeneradores capaces de determinar si un impulso está presente o no.

Los sistemas prácticos actuales usan la codificación binaria de las muestras de conversación cuantificadas. Véase la figura 7. Como la telefonía usa 256 niveles de cuantificación, cada muestra se codificará en un grupo de código, o palabra PCM, consistente en x impulsos binarios (8 bits).

Como la velocidad de muestreo usada es de 8 000 muestra segundo, una señal de conversación modulada por impulsos codificados generará una señal digital de 64kbit/s.

Transmisión

Las señales digitales dentro del terminal, usualmente se transmiten en la forma de un tren de impulsos unipolares, en el modo sin retorno (non return - to zero, NRZ). Véase la figura 8. Esta forma de señal no es apropiada para la transmisión en largas distancias. Una forma mejor es la señal bipolar con retorno a cero (non return-to zero, RZ). Las ventajas de esta señal son:

- No tiene potencia en las partes inferiores de su espectro, es decir, no tiene componente de corriente continua. Esto se debe a las polaridades alternadas de los impulsos.
- La interferencia entre símbolos está reducida por la característica de retorno a cero.

Por supuesto, también esta señal será atenuada y distorsionada durante la transmisión y se le agregará ruido a la misma.

En algún punto de la línea de transmisión, la señal debe ser restaurada. Esto se efectúa introduciendo en la línea, un dispositivo que primero examina el tren de impulsos distorsionados para ver si el nivel binario posible es de 1 o 0 y luego genera y transmite a la línea nuevos impulsos, de acuerdo con el resultado del examen. Tal dispositivo se denomina repetidor regenerativo. Véase la figura 8b.

A la vez que se le vuelve a dar forma a los impulsos, se elimina el ruido agregado durante la transmisión, al menos si la amplitud de la señal de ruido no es suficientemente grande como para llevar la señal de código recibida, a la zona incorrecta del nivel de decisión de un generador.

Normalmente, la señal de código regenerada es idéntica a la señal de código original, transmitido. Aun después de una gran cantidad de repetidores regenerativos, la señal de código es prácticamente idéntica a la señal original. Esta es la razón de la alta calidad de transmisión que se obtiene por medio de los sistemas de transmisión con PCM.

Demodulación

Los procesos del receptor que convierten la señal PCM entrante en una señal de conversación analógica nuevamente, son : regeneración, decodificación y reconstrucción.

El proceso de regeneración tiene el mismo objetivo y se efectúa de la misma manera que en la línea de transmisión; es decir, los impulsos cuadrados. Véase la figura 8b.

Antes de entrar al decodificador, la señal bipolar se convierte nuevamente en unipolar. En el proceso de decodificación, las palabras de código generan impulsos de amplitud, cuyas alturas son iguales a las alturas de las muestras cuantificadas que generaron las palabras de código. De modo que, después de pasar por el decodificador, se ha recuperado el tren de muestras cuantificadas. Véase la figura 9.

La señal analógica se reconstruye en un filtro pasa bajos/(figura 10^a y 10b) al espectro de la señal original como la mostrada en la figura 3.

El filtro pasa-bajo, con una frecuencia de corte de B Hz, elimina todos los componentes de frecuencia del espectro, superiores a B Hz y queda el espectro de la señal analógica deseada.

II) Los sistemas de transmisión con PCM

Hemos tratado ahora los principios fundamentales de la PCM. En esta parte del capítulo, describiremos cómo se usan estos principios para formar sistemas prácticos de transmisión con PCM. Sin embargo, comenzaremos explicando el principio del “Multiplex por división de tiempo”, porque éste hace económicamente atractivos a los sistemas de transmisión con PCM, para la telefonía.

El multiplex por división de tiempo (TDM)

Varias señales en forma de impulso pueden usar un itinerario de transmisión común si las señales tienen diferentes fases.

La figura 11 muestra cómo tres señales PAM se multiplexan, por división de tiempo, en la misma línea de transmisión. Los impulsos de las tres señales se entrelazan, abriendo las compuertas de muestreo una por una cíclicamente.

Durante un ciclo, la línea de transmisión recibe un impulso PAM de cada una de las señales participantes. Tal conjunto de impulsos se denomina trama. El lapso que ocupa cada uno de estos impulsos se denomina intervalo de tiempo. En este ejemplo, cada trama tiene tres intervalos de tiempo.

En el lado de recepción los impulsos se distribuyen nuevamente. Esto se hace abriendo cíclicamente las compuertas de muestreo, de la misma manera que en el lado de transmisión. Por supuesto, hay que tener el debido cuidado con la demora de la transmisión. Por claridad, esta demora ha sido omitida de la figura 11. En el caso de las señales PCM, la multiplexación por división de tiempo se efectúa más a menudo antes de que las muestras sean codificadas por impulsos, es decir, las muestras de las señales analógicas participantes se combinan en una línea de transmisión con PAM común. Véase la figura 12.

De este modo, el equipo de codificación puede usarse en multiplex por división de tiempo. Vemos, en la figura, que los impulsos PCM no se entrelazan impulso por impulso, sino palabra PCM por palabra PCM. Esto, a menudo se denomina entrelazado de intervalos de tiempo.

Los sistemas PCM, usados en telefonía, son la mayoría de las veces, sistemas TDM: de este modo, cuando leemos u oímos el término “sistema PCM”, casi siempre se refiere a un sistema PCM-TDM. Sin embargo, no hay que olvidar que la PCM, en sí, puede usarse, en ciertos casos, sobre una base de un solo canal.

Los sistemas PCM de primer orden

Como se mencionó anteriormente, el CCITT recomienda dos sistemas PCM de primer orden, o primarios, para usar en telefonía: el sistema de 30 canales propuesto por la CEPT, y el sistema de 24 canales, propuesto por la AT&T. Los sistemas de primer orden formarán la base de futuras jerarquías de sistemas de transmisión digital.

Tenemos que distinguir entre el equipo multiplex que convierte una cantidad de señales analógicas (30 o 24), en una señal digital, en el lado de transmisión, y efectúa las funciones inversas en el lado de recepción. La línea de transmisión transporta las señales digitales, entre dos unidades de equipo multiplex. Véase la figura 13.

A continuación se tratará, con cierto detalle acerca del equipo multiplex de 30 canales, base para la subsiguiente presentación de la telefonía digital en este punto. También se da un resumen de los datos más importantes sobre el multiplex de 24 canales. La presentación de los sistemas PCM de primer orden terminará en una breve descripción de las líneas de transmisión.

Treinta canales de conversación analógica, junto con la señalización asociada, son convertidos en una señal digital, por medio del sistema por número de 30 canales. La estructura de esta señal digital se muestra en la figura 14.

La señal digital se divide en tramas, con una velocidad de repetición de 8000 trama/s. Por supuesto, esto se debe a que la frecuencia de muestreo es de 8000Hz, y al hecho de que la trama contiene una muestra codificada binaria proveniente de cada una de las señales analógicas.

Cada trama consiste en 32 intervalos de tiempo, de 8 bits. De estos intervalos de tiempo, 30 se usan para canales PCM, y los dos restantes, para la sincronización y la señalización.

Los canales PCM transportan señales analógicas, dentro de la banda de frecuencias de 300-3 400 Hz, codificadas de acuerdo con la "A". Véase la figura 5.

El intervalo de tiempo de sincronización, el intervalo de tiempo 0 en cada trama, contiene 8 bits, cuyo propósito es formar una señal de reconocimiento para el receptor, a fin de mantener a éste sincronizado con el transmisor, de modo que cada canal PCM pueda ser correctamente identificado. Esta función es la misma que la indicada por el bloque de control de muestreo, en las figuras 11 y 12.

El intervalo de tiempo de señalización no. 16 puede usarse de muchas maneras. La gran capacidad de señalización, 64bit/s, ofrece flexibilidad en la elección de esquemas adecuados para diferentes propósitos. Esto es importante cuando se considera la red digital del futuro.

Hasta aquí, el CCITT ha recomendado el uso del intervalo de tiempo de señalización, tanto para la señalización por canal común como para la señalización asociado por canales. Las disposiciones para la señalización por canal común no están especificadas, de modo que solo podemos penetrar en los detalles concernientes al esquema de señalización asociada por canales.

Este esquema de señalización es el usado hoy cuando se introducen sistemas primarios PCM en la red existente.

El esquema usa los intervalos del tiempo 16, en secuencia de 16 tramas, denominadas multitramas, como se muestra en la figura 15.

En la primera trama de la secuencia, la trama "0", el intervalo de tiempo transporta una palabra de multitramado, es decir, una señal de reconocimiento que dice al receptor que ha comenzado una nueva multitrama. Los 8 bits de intervalo de tiempo 16 en la siguiente trama, la trama 1, están divididos de modo que los primeros cuatro bits llevan información de señalización asociada por el canal PCM 1, y los últimos cuatro bits llevan información de señalización asociada con el canal PCM 16.

En la trama 15 el intervalo de tiempo 16 lleva información de señalización para los canales 15 y 30 luego, la siguiente trama es la trama "0" en la siguiente multitrama.

Así, cuatro bits de señalización están asociados con cada canal PCM, es decir, el esquema proporciona cuatro canales de señalización por cada canal PCM. Normalmente, para transportar señales convencionales se usan solo uno o dos de los canales.

En multiplex PCM de 24 canales tiene una estructura algo diferente, como puede verse en la figura 16.

No se asigna ningún intervalo de tiempo a la señalización. Un esquema de señalización asociada por canales se logra tomando el bit menos significativo en cada canal PCM, para propósitos de señalización, cada seis tramas. Para sincronización, se introduce un bit extra en la trama. Este bit también puede usarse para la señalización por canal común.

En la figura 17 se muestra un resumen de datos técnicos importantes para los múltiplex primarios. Es obvio que los múltiplex primarios no son compatibles: tienen, por ejemplo, una cantidad diferente de intervalos de tiempo y diferentes posibilidades de señalización. Ni siquiera los intervalos de tiempo son compatibles, porque los sistemas usan diferentes leyes de codificación. Sin embargo, están avanzando los trabajos en el CCITT, encaminados a hallar un método digital para la conversión entre las palabras PCM que usen diferentes leyes de codificación, a fin de evitar las conversiones a analógica cuando se conectan diferentes sistemas PCM.

Las líneas de transmisión PCM, usadas para interconectar múltiplex primarios, son, la mayoría de las veces, cables de pares ya existentes usados para la transmisión de frecuencia vocal analógica. Para una línea PCM, necesitamos dos pares, uno para cada dirección (véase la figura 13). La línea debe estar equipada por repetidores, regenerativos cada 1.5 a 2.3 Km dependiendo del tipo de cable.

Esta distancia es, aproximadamente, la misma que la distancia entre las bobinas de carga de los circuitos de cable cargado, y la conversión de los pares cargados en líneas de transmisión con PCM puede efectuarse simplemente reemplazando las bobinas de carga por repetidores regenerativos PCM, en pares especialmente seleccionados.

Las líneas de transmisión están diseñadas para transportar señales digitales de velocidades especificadas, 2 048 Kbit /s ó 1 544Kbit /s. Las señales digitales deben cumplir los requerimientos concernientes no solo a las polaridades de los impulsos (véase la figura 7), sino, también, a la distribución de impulsos. Los circuitos de temporización en los repetidores necesitan, para su operación, señales digitales con impulsos alternados. Deben evitarse las secuencias largas de bits cero. Esto se efectúa mediante un código de línea especial que convierte algunos de los bits cero en impulsos, de modo que estos bits extra pueden eliminarse antes de llegar al decodificador.

Los sistemas PCM de segundo orden

Los sistemas PCM primarios están destinados a aplicaciones de corta distancia. En la red de media y larga distancia, donde se exige alta capacidad de canales, es más económico y práctico agrupar una mayor cantidad de canales PCM, en una línea de transmisión común, formando, así, sistemas de orden más elevado que usar varios sistemas PCM primarios. En general, los multiplex pueden ser de dos tipos: multiplex PCM y multiplex digitales.

Los multiplex PCM: derivan una única señal digital, a partir de una cantidad de señales analógicas, mediante una combinación de modulación por impulsos codificados y multiplexores por división de tiempo también efectúan la función inversa. Por ejemplo, los multiplex de primer orden, descritos anteriormente, son de este tipo.

Los multiplex digitales: derivan una única señal digital, combinando una cantidad de señales digitales, mediante la multiplexión por división de tiempo y también efectúan la función inversa.

Las líneas de transmisión digitales transportan señales digitales entre unidades de equipo multiplex. Estas líneas están diseñadas para conducir señales digitales de velocidades específicas, pero no dependen del tipo de señal original que se transporte en forma digital. Es decir, la misma línea de transmisión puede usarse tanto para multiplex PCM como para multiplex digitales, si estos tienen las mismas velocidades en las señales digitales multiplexadas.

Incluso, otros tipos de señales digitales por ejemplo las telefónicas visuales codificadas o las de datos, pueden usar líneas de transmisión, si sus velocidades de dígitos son correctas. El CCITT ha recomendado dos sistemas de segundo orden. Estos tienen multiplex digitales y están basados sobre cada uno de los dos multiplex primarios. Ambos combinan cuatro señales PCM primarias, en una señal digital, véase figura 18.

Las señales se multiplexan mediante el entrelazado de bits, es decir, las señales participantes se combinan bit por bit (véase figura 19). Esto es más práctico que el entrelazado de intervalos de tiempo, en el que las señales

participantes combinan intervalos de tiempo, porque en el último caso es necesario reunir los bits de los intervalos de tiempo en etapas intermedias antes de poder efectuar el entrelazado.

Los multiplex digitales deben aceptar que las señales primarias, por razones prácticas, tengan velocidades de bits levemente diferentes de la velocidad del bit ideal. En los sistemas recomendados por el CCITT, esto se efectúa haciendo que las velocidades de bits de segundo orden sean algo mas altas que 4 veces las velocidades ideales de los bits primarios, asegurando, con ello, que incluso los multiplex primarios “rápidos” puedan tratarse de manera adecuada.

Ya está en uso, en los Estados Unidos, un multiplex PCM de segundo orden. El sistema combina 96 canales analógicos, en una señal digital de 6312 Kbits /s; es decir, usa la misma línea de transmisión que el multiplex digital, de acuerdo con la figura 18. En Europa se ha discutido sobre un multiplex PCM de segundo orden, basado en los parámetros del sistema de 30 canales y la línea de transmisión de 8 448Kbits /s. Se propone que este sistema tenga entrelazado de intervalos de tiempo. De estos, 128 pueden usarse para canales de conversación, 2 para sincronización, y 2 para señalización.

Las jerarquías de los sistemas de transmisión digital

Los sistemas de transmisión digital pueden ligarse conjuntamente en una jerarquía, de la misma manera que los sistemas FDM.

Se tratan dos jerarquías: una basada en el sistema de 24 canales y otra basada en el sistema de 30 canales. En la figura 20, se muestra una posibilidad para la última.

A partir de la figura, puede verse que las facilidades de transmisión están planeadas para usarse no solo por conversación modulada por impulsos codificados, sino, también, por datos de teléfono visual, grupos FDM y TV. En la figura 21 se muestran posibles velocidades de dígitos y medios de transmisión.

Otros métodos de modulación digital

Las alternativas importantes para la PCM son los métodos de codificación diferencial, donde los principios básicos son muestrear, cuantificar y codificar cambios en la señal, en vez de la señal en si, como se hace en la PCM. Esto debe, posiblemente, a pequeños cambios entre dos muestras sucesivas, porque la mayor parte de la energía del espectro de la conversación humana baja a frecuencias mucho menores que la de muestreo.

La figura 22 muestra un diagrama, en bloques, de codificación diferencial. Tanto el modulador como el demodulador generan una aproximación cuantificada de la señal de entrada. Esta aproximación aparece en las salidas de los integradores.

La señal de entrada se compara con la aproximación, y la diferencia se muestrea y codifica. Si el código consiste en N bits, al método de modulación lo llamamos PCM diferencial de N bits (N bits DPCM). La forma más importante tiene el valor $N = 1$ –bit DPCM, mas a menudo denominada Modulación Delta (Delta Modulation), DM o M. En lo que sigue la N – bit DPCM se denomina DPCM para $N = 2$ y DM cuando $N = 1$

La PCM diferencial

La DPCM tiene una relación de señal a ruido algo mejor para señales de conversación, que la PCM con las mismas velocidades de bits de salida. Sin embargo, el equipo de DPCM no es apropiado para la multiplexión por división de tiempo, a causa de la necesidad de recordar la parte ya transmitida de la señal de entrada. Como el quipo tiene, aproximadamente, la misma complejidad que el PCM ordinario, la ganancia en la relación señal a ruido cuesta mucho más. Por este motivo el método no ha sido usado en telefonía.

La modulación Delta

Con la Modulación Delta solo es necesario codificar la diferencia entre la señal de entrada y la señal aproximada: positiva o negativa. Por la misma razón que es valida para la DPCM, el quipo DM puede ser usado por solo una señal de entrada, pero en el caso DM, este equipo es sustancialmente más simple que el correspondiente *Hardware* necesario para la PCM.

En la figura 23 se muestra un sistema de modulación Delta. El generador de impulsos alimenta un tren, regularmente recurrente, de impulsos de amplitud y polaridad fijas, para el codificador, que simplemente multiplica los impulsos por +1 ó -1, dependiendo de la polaridad real de la señal diferencial, proveniente del comparador, antes de transmitirlos a la línea. Las formas de onda del sistema DM se muestran en la figura 24.

El tren de impulsos, con la codificación Delta constituye, después, la señal de entrada a los integradores, tanto en el modulador como en el demodulador, que constituyen la señal aproximada de las unidades unitarias positivas y negativas.

La aproximación es suficientemente buena para la comparación con la señal de entrada en el modulador, pero en el demodulador debe suavizarse con un filtro pasa -bajos antes de enviarla a la salida analógica. Este filtro puede ser mucho más simple que en caso de la PCM.

Todos los sistemas de modulación, incluyendo la DM, se sobrecargan cuando la amplitud de la señal moduladora de entrada excede al alcance de los dispositivos activos usados para procesar dicha señal. La señal moduladora cambia, entre muestreos, en una cantidad más grande que el tamaño de un paso. En consecuencia, este tipo de sobrecarga no esta determinada por la amplitud de la señal moduladora, sino, mas bien, por su dependiente. La figura 25 muestra una señal que cambia mas rápidamente que lo que el modulador Delta puede seguir. Se dice entonces que el sistema DM presenta sobrecarga de pendiente.

La pendiente depende tanto de la amplitud como de la frecuencia de la señal. Para bajas frecuencias, las amplitudes altas pueden codificarse sin sobrecarga, pero para altas frecuencias, la sobrecarga distorsionara las

amplitudes, haciéndolas disminuir a bajos niveles (véase la figura 26a. Esto es diferente de la PCM, que solo sobrecargara amplitudes superiores al nivel de cuantificación mas alta (figura 26b).

Sin embargo, es interesante observar que la DM se adapta bien para la conversación, porque el espectro de conversación disminuye con las frecuencias crecientes, aproximadamente de la misma manera que el nivel de sobrecarga dependiente, en la DM, figura 27.

El esquema simple de Modulación Delta, mostrado en las figuras 23 y 24, se denomina Modulación Delta Lineal, a causa del tamaño fijo del paso, independientemente del nivel de la señal de entrada. La DM lineal da por resultado una cuantificación muy dispareja de la señal analógica, si la frecuencia de muestreo no es mucho más alta que para la PCM. En realidad, a fin de obtener una relación de señal a ruido (SNR), para la conversación, comparable a la de la PCM, la frecuencia de muestreo debe estar en el orden de 1MHz, dando, así, una velocidad de bits de salida, de la misma frecuencia.

Para reducir esta alta velocidad de bits se pueden usar varias técnicas, conservando, no obstante, las mismas SNR. Una forma es introducir compresión – expansión, de modo que el valor analógico equivalente de un bit se aumente, si la señal reconstruida no es convergente en la señal de entrada. Esto corresponde a la condición de sobrecarga de pendiente, mostrada en la figura 25, lo que puede detectarse prontamente controlando el número de unos y ceros consecutivos.

Además, se puede hacer una aproximación mejor a la señal de habla entrante, en el integrador. Prácticamente, esto significa que los integradores deberían construirse de modo que tuvieran una respuesta, tan cercana como sea posible, al espectro de conversación humana. Sin embargo, no se ha de dar demasiada importancia al habla, ya que también ha de ser posible transmitir tonos MFC y señales de datos modulados por tono.

Hay muchas proposiciones en este tema, conocidas algunas como DM adaptiva, DM compasiva, DM predictiva. De algunas de ellas se describen las referencias.

Con estos métodos es posible diseñar sistemas DM de 64 Kbit /s, con la misma o aun mejor SNR que la PCM, según especifica el CCIT. Por supuesto, estos sistemas DM son mas complicados que el simple sistemas DM lineal, pero aun el costo y la complejidad son suficientemente bajos como para hacerlos atractivos.

Aplicación de DM y PCM

La DM es, básicamente, un proceso de un canal, pero puede usarse, por supuesto en sistemas TDM. Véase la figura 28, que compara el sistema PCM de 30 canales, operando a la misma velocidad de bits.

El sistema DM – TDM tiene las siguientes ventajas sobre el sistema PCM:

No necesita costosos filtros pasa- bajos porque la frecuencia de muestreo, 64KHz en este ejemplo, es mucho más alta que las frecuencias de las señales de conversación.

El multiplexor analógico, con sus difíciles requerimientos de transmisión, es remplazado por un multiplexor digital mucho más simple.

A pesar del hecho de que necesitan un MODEM de Delta, separado para cada canal, tales sistemas pueden compararse, económicamente, con los sistemas PCM.

Es más probable que los modems de Delta se empleen en bloques constructivos, dentro de los sistemas PCM –TDM. Esto podría ser atractivo, ya que la DM no necesita costosos filtros pasa – bajos en las entradas. Se podría usar una unidad de filtrado digital y podría ser compartida por todos los canales.

En lo que concierne a la codificación de conversación para telefonía, la DM puede ofrecer alta calidad, parcialmente, a causa del hecho de que todavía quedan, en el espectro de conversación, las frecuencias altas, porque no necesitamos pasar la señal analógica de entrada por un filtro pasa –bajos. Esta comparación se refiere a sistemas DM con las mismas velocidades de bits que la PCM estándar, es decir, 64Kbits /s.

Para los sistemas en donde es de gran importancia la inteligibilidad, pero no la calidad de la conversación, pueden usarse menores velocidades de bits, tanto para la PCM como para la DM. Sin embargo, no se requieren muy bajas velocidades de bits; la DM se desempeñara mejor que la PCM.

La modulación Delta, debido a su conveniencia para la construcción LSI y a sus requerimientos mínimos de filtrado, es propio para aplicaciones de un canal, por ejemplo, aparatos telefónicos digitales y líneas de servicios para sistemas de transmisión de datos.

Aquí, la PCM es una competidora potencial y hay en curso trabajos que apuntan a la producción de un MODEM básico de PCM para un canal.

Resumen

La modulación por impulsos codificados, PCM, es un método de modulación usado para la conversión de señales analógicas, por ejemplo: señales de conversación a forma digital. El proceso de modulación, que contiene medidas tales como el muestreo, la cuantificación y la codificación, provoca una pequeña pero irreparable distorsión en la señal. Esta distorsión puede, no obstante, hacerse adecuadamente pequeña, y se compensa por el hecho de que las señales digitales pueden transmitirse prácticamente sin error, en distancias muy largas. También se prestan a la multiplexión por división de tiempo, TDM, que abre posibilidades para sistemas de transmisión económicos.

Para la telefonía, el CCITT recomienda dos diferentes sistemas de transmisión PCM –TDM, un sistema de 24 canales y uno de 30, estos sistemas son bases para dos jerarquías de sistemas de transmisión digital, similares a la jerarquía FDM. El desarrollo de estas jerarquías esta en etapa primitiva. Sin embargo, se especifican los niveles de segundo orden.

Los métodos de modulación por impulsos codificados diferenciales (DPCM), son alternativas para la PCM. El caso especial de la Modulación Delta, DM, es el más importante. Este método hallara aplicaciones donde se necesiten sistemas de un canal, o donde se requieran bajas velocidades de bits.

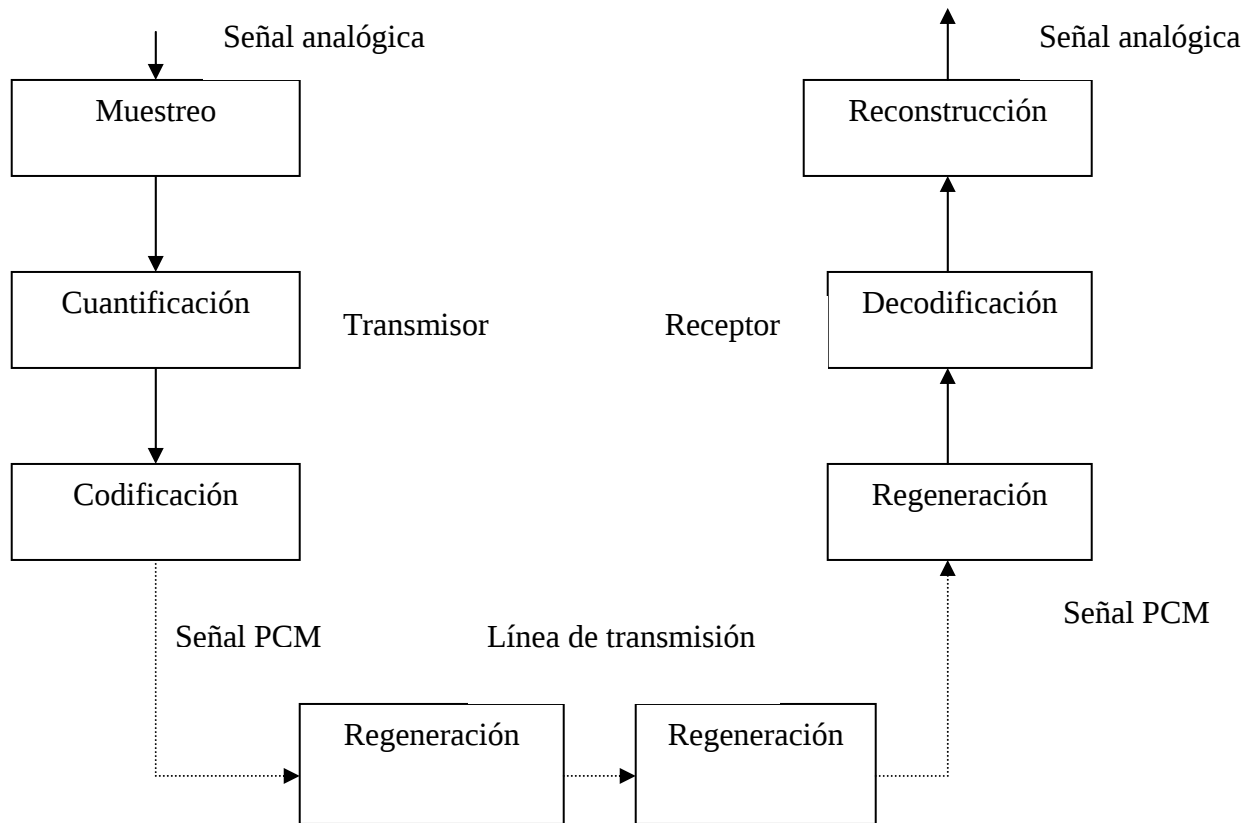


Figura 1. Modulación por Impulsos Codificados. Bloques de Funciones