

INTRODUCCIÓN A LA CODIFICACIÓN DE CANAL

Eduardo Monroy Escabosa

Proyectista del Departamento de Matemática Aplicada y Telemática,UPC

e-mail: edu-monroy@gratismail.com

dmoy1413@alu-etsetb.upc.es

1. EL AUGE DE LA CODIFICACIÓN CONTINUA DE CANAL

Debido al incremento de las necesidades de intercambio de información en todos los sectores de la sociedad, los servicios de telecomunicación han ido apareciendo y creciendo para satisfacer tan alta demanda. En consecuencia, se ha hecho necesaria la aparición de distintos sistemas de transmisión y almacenamiento, y su mejora en eficacia (fiabilidad) y eficiencia (mayor velocidad, menor potencia, menor ancho de banda, ...).

La **codificación de canal** juega un papel muy importante tanto en uno como en otro aspecto, ya que, como demostró *Shannon* en 1948, con una codificación apropiada se pueden reducir los errores producidos por un canal (líneas telefónicas, radioenlaces, enlaces vía satélite,...) o un soporte de almacenamiento (memorias de semiconductores, bandas magnéticas, discos compactos, ...), ambos ruidosos, sin sacrificar ni la tasa de transmisión, ni su potencia, ni su ancho de banda.

Dentro de la codificación de canal con códigos continuos, la técnica que más se ha desarrollado, por ser con la que mejores resultados se han obtenido, es la **modulación codificada de enrejado** (*T.C.M.: Trellis-Coded Modulation*). Es una técnica relativamente joven, el primer esquema de este tipo fue propuesto en 1976 por *Gottfried Ungerboeck*. Una avalancha de investigación y aplicación de *T.C.M.* tuvo lugar. Actualmente se puede establecer que la teoría de *T.C.M.* ha madurado hasta un punto en que la consecución de mejoras parece menos probable. Sin embargo, cuestiones acerca de ganancias reales de código, de comportamientos ante canales diferentes a los que introducen ruido gaussiano blanco aditivo, y de complejidades de implementación, están siendo estudiadas activamente.

Existen varias aplicaciones en comunicaciones digitales que utilizan los códigos continuos, como por ejemplo:

· **Códigos Planetarios Estándar de la N.A.S.A.:** han sido utilizados a menudo en comunicaciones vía satélite. Su principal utilización fue el lanzamiento de la sonda espacial *Voyager* en misión hacia Marte, Júpiter y Saturno en 1977. Se trata de dos códigos continuos lineales (convolucionales), uno de ellos con parámetros

$L=7, k=1, n=2$ y el otro $L=7, k=1, n=3$ que se utilizaron con demodulación indecisa.

· **Códigos de Canal Convolucionales en G.S.M.:** la codificación de canal en el sistema digital de telefonía móvil utiliza un código continuo lineal (convolucional) con parámetros $L=5, k=1, n=2$.

· **V.32 y V.33:** un código continuo no-lineal (de enrejado) que provee de inmunidad frente a ambigüedades de fase de 90° utilizando la técnica de *T.C.M.*, fue adoptado en dos estándares internacionales de la C.C.I.T.T.:

V.32: para transmisión a 9.6 kbit/s sobre la red telefónica conmutada, módem full-dúplex en la banda vocal con 2 hilos. Se utiliza un código con parámetros $S=8, k=4, n=5$ modulando con una constelación 32-QAM rotada.

V.33: para transmisión a 14.4 kbit/s sobre líneas privadas, punto a punto con 4 hilos. Se utiliza un código con parámetros $S=8, k=6, n=7$ modulando con una constelación 128-QAM rotada.

2. LA CODIFICACIÓN DE CANAL CON CÓDIGOS CONTINUOS

2.1. La codificación de canal: objetivo y tipos

El principal objetivo de la codificación de canal es la protección de la información digital a transmitir o almacenar asegurándole una mayor inmunidad frente al ruido, de manera que no llegue alterada al receptor, independientemente de la bondad del canal.

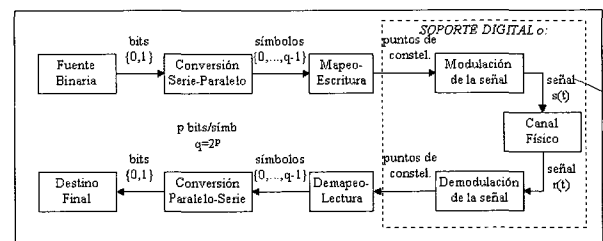


Figura 1. Sistema de Transmisión-Almacenamiento Digital No-Codificado.



Esta información, en un sistema de transmisión, o de almacenamiento, digital no-codificado (Figura 1), se crea en una fuente binaria (datos, voz, imagen, ...) normalmente con un tratamiento que, por conversión o por compresión, reduce el coste de la transmisión. Tras una conversión serie-paralelo, estos bits se convierten en símbolos digitales pertenecientes a un mismo alfabeto. A través del mapeo, estos símbolos se traducen en puntos de la constelación que el modulador transforma en una señal que se transmite a través del canal, o, en el caso en que se trate del almacenamiento de información, los símbolos se pasan a una unidad de escritura que los registra en un soporte digital. El receptor capta la señal que ha podido ser modificada en el espacio que ha debido recorrer como canal y que el demodulador transforma en puntos de la constelación y el demapeador en símbolos digitales, o, en su caso, recupera los símbolos gracias a la unidad de lectura, que han podido ser modificados durante el tiempo que han estado almacenados en el soporte. En cualquier caso, estos símbolos digitales, que son una estimación ya que no suelen coincidir con los originales por la modificación en el canal, sufren una conversión paralelo-serie que entrega al destino unos bits estimación de los entregados por la fuente binaria.

Lo que se pretende en toda transmisión es que la información experimente la menor modificación posible, y que esos bits que se entregan al destino sean lo más parecido posible a los originados en la fuente. La manera de cuantificar este parecido podría ser cuantificar la fiabilidad del canal, pero se trata de una tarea ardua. Lo más recomendable es cuantificar la fiabilidad de la transmisión mediante la tasa de error residual o B.E.R. (bit error rate). De esta manera ya se puede uno preguntar si la tasa de error del sistema de transmisión es menor o no de la que el usuario considera aceptable.

El problema aparece cuando se sobrepasa esta tasa de error máxima y la información se hace ininteligible. La primera solución en la que se piensa es el aumento de la potencia de transmisión, para aumentar la relación señal-a-ruido (S.N.R.). Pero no siempre es posible, ya que muchas veces la potencia de transmisión ya está limitada por otros aspectos. La solución que se tratará en este proyecto es la de la codificación de canal, ya que, como demostró Shannon en 1948, con una codificación apropiada de la información, los errores introducidos en ésta por un canal o un almacenamiento ruidosos pueden ser reducidos a un nivel arbitrario sin sacrificar la tasa de transmisión o almacenamiento.

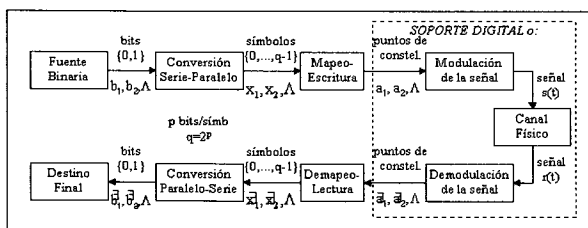


Figura 2: El Bloque Codificador de Canal.

El bloque encargado de la codificación de canal (ref Figura 2) se inserta, en el sistema de transmisión o almacenamiento, entre el convertidor serie-paralelo y el mapeador o la unidad de escritura, y el decodificador, entre el demapeador o la unidad de lectura y el convertidor paralelo-serie. Por lo tanto, es un bloque que, en un principio, transforma palabras de símbolos digitales en palabras de símbolos digitales pertenecientes al mismo abecedario, de cara a obtener una mayor inmunidad al ruido.

De cara a proteger la información originada en la fuente binaria, en los símbolos generados por el codificador debe haber más información que en los que le llegan. Esta "información extra" no es sí información, pero hace posible la detección y corrección de errores. Algunas de las soluciones de codificación para la protección de la información son:

· **Codificación por repetición:** Cada vez que le llega un símbolo digital al codificador, éste entrega dos símbolos iguales al siguiente bloque. Debido a su falta de sofisticación es bastante ineficiente. Tasa del codificador: $R=1/2$.

$$x_t \Rightarrow y_t^{(0)} = x_t, y_t^{(1)} = x_t \text{ (Ecuación 1)}$$

· **Codificación por bloques:** Cada vez que, y solamente cuando, llegan al codificador k símbolos (mensaje), éste envía al siguiente bloque, n símbolos (palabra código), dependientes únicamente de los k recibidos (una palabra código asociada a cada mensaje), con $n > k$. El ruido del canal se combate gracias a la redundancia ($n-k$) de la información. Codificadores de este tipo son: Golay, Hamming, B.C.H., Reed-Solomon, ... Se suelen utilizar como códigos externos, más cercanos a la fuente, cuando se utilizan en combinación con los continuos. Tasa del codificador: $R=k/n$.

$$x_t^{(0)}, x_t^{(1)}, K, x_t^{(k-1)} \Rightarrow [y_t^{(0)}, y_t^{(1)}, K, y_t^{(n-1)}] = f(x_t^{(0)}, x_t^{(1)}, K, x_t^{(k-1)}) \text{ (Ecuación 2)}$$

· **Codificación continua:** De manera "continua", cada vez que llegan k símbolos digitales al codificador, pasan por una especie de "filtro" y entrega al siguiente bloque, n símbolos digitales ($n > k$), que dependen no sólo de los k recibidos, sino de tantas muestras anteriores como indique la "respuesta impulsional" del "filtro". Se hacen depender los símbolos de la salida con el pasado más reciente de los símbolos de la entrada mediante funciones que pueden ser lineales (XOR), **codificadores convolucionales**, o no-lineales (AND, ...), **codificadores de enrejado**. Deben ser implementados mediante circuitos lógicos secuenciales, por la existencia de memoria. Se suelen utilizar como códigos internos, más cercanos al canal o soporte de almacenamiento, cuando se utilizan en combinación con los codificadores por bloques. Tasa del codificador: $R=k/n$.

$$x_t^{(0)}, x_t^{(1)}, K, x_t^{(k-1)} \Rightarrow \begin{cases} y_t^{(0)} = f(x_t, x_{t-1}, K, x_{t-m}) \\ y_t^{(1)} = f(x_t, x_{t-1}, K, x_{t-m}) \\ \Lambda \\ y_t^{(n-1)} = f(x_t, x_{t-1}, K, x_{t-m}) \end{cases}$$

(Ecuación 3)

Para una mejor comprensión, se definirán estos parámetros de los codificadores (**Definición 1**):

k: número de entradas del codificador, símbolos por palabra de entrada.

n: número de salidas del codificador, símbolos por palabra de salida.

m: número de palabras de entrada anteriores, de los cuales depende también la salida, además de depender de la palabra de la entrada actual.

2.2. LA UTILIZACIÓN DE LA CODIFICACIÓN DE CANAL

Como ya se ha mencionado, normalmente no se suele utilizar un único codificador de canal, sino que, para tener una menor probabilidad de error con una menor complejidad, se utilizan sistemas de códigos concatenados, una combinación de dos niveles de codificación, codificador por bloques, con menor redundancia, con codificador continuo, para corregir la mayor parte de los errores debidos al canal, incluyendo un aleatorizador y un entrelazador. Así, tras el bloque convertidor serie-paralelo (*Figura 2*), se tiene:



Figura 3. Codificación Combinada.

El **aleatorizador** se utiliza para “esconder” al sistema la componente informativa de los datos. Es necesario que éstos lleguen al codificador con estadística equiprobable. La estadística del generador vista desde fuera es aleatoria, pero, internamente, se ha generado determinísticamente, porque debe ser reproducible para que el receptor pueda recuperar la información. La solución es la pseudoaleatoriedad.

El **entrelazador** se utiliza para evitar las ráfagas de errores que se producen, cuando se sobrepasa la capacidad correctora del decodificador interno, ya que, cuando esto ocurre, el decodificador inyecta más errores de los que recibe, tiene tendencia a correlar errores, o cuando el canal tiene memoria e inyecta errores correlados. El entrelazado no hace disminuir la tasa de errores, que se mantiene, sino que deshace las ráfagas para ayudar al decodificador externo.

El problema que se quiere evitar es el producido cuando la señal correspondiente a un punto de la conste-

lación en el modulador se convierte en otro punto diferente de la constelación en el demodulador. Estos errores se producen por el ruido o porque no se puede asegurar una recuperación de fase perfecta, puede haber una diferencia de $\pi/2$ (ó múltiplos). Una forma de evitar estos errores de rotación de fase es incluir en el *módem* un codificador diferencial, de esta manera el codificador interno basta con que sea lineal (convolucional), y, tras el entrelazador (*Figura 3*), aparece esta configuración:

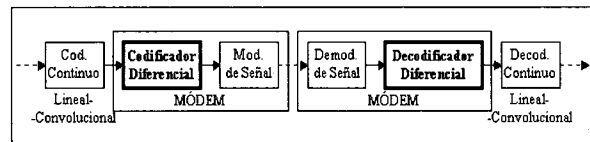


Figura 4. Codificación Diferencial para evitar Errores por Rotaciones de Fase.

Para evitar los errores producidos por el ruido, en este sistema de transmisión digital existe, o no, una interacción entre el demodulador y el decodificador continuo:

Hard-decision decoding: decodificación con demodulación firme. Recibe los símbolos que le entrega el demapeador tras conseguirlos a partir de los puntos entregados por el demodulador, una palabra de n símbolos por punto. La existencia de un demapeador supone una decisión por parte del demodulador, una decisión realizada por un bloque “apartado” de las tareas de decodificación, una pérdida de información irrecuperable.

Soft-decision decoding: decodificación con demodulación indecisa. En lugar de hacer una construcción por bloques, se construye todo junto. Ya no se tiene una codificación y a continuación una modulación, o, más bien, una demodulación y luego una decodificación. Se trata de la “modulación codificada”. La idea principal es que el decodificador interno, el continuo, no trabaje con símbolos, sino con números reales. Ya no hace falta que el demodulador, mediante el demapeador, decida la palabra de n símbolos que corresponde al punto de la constelación recibido, y basta con que entregue al decodificador las coordenadas del punto. Para evitar problemas de rotación de fase el código continuo debe ser transparente a tales rotaciones, invariante. Esta condición hace que el código continuo adecuado deba ser no-lineal (de enrejado). La configuración resultante tras el entrelazador (*Figura 3*), en lugar de *Figura 4*, pasa a ser:

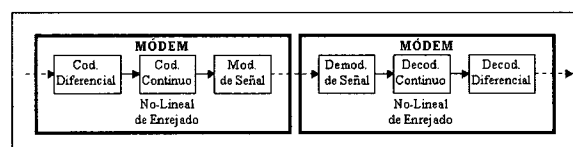


Figura 5. Soft-Decision Decoding con Decodificación Diferencial