

transmisión. A diferencia de los codificadores convolucionales ya estudiados, estos codificadores son *sistemáticos* ya que los bits de mensaje y los bits de paridad están separados. Las conexiones retroalimentadas provenientes de las salidas de los estados los hacen recursivos, de manera que los errores individuales de salida producen una gran cantidad de errores de paridad. Tal como está planteada la estructura, la razón de transmisión total es de 1/3, pero ésta se puede aumentar a $R = 1/2$ usando el proceso de *perforación*, mediante el cual se eliminan algunos bits. Esto puede lograrse eliminando los bits de verificación de paridad impares del primer RSC y los pares del segundo.

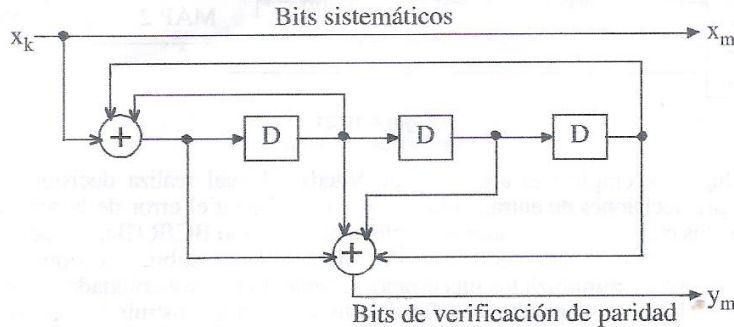


Figura 10.20
Codificador convolucional sistemático y recursivo con $R = 1/2$, $G_1 = 15$, $G_2 = 17$ y $n = 2$.

La figura 10.20 ilustra un codificador G_1, G_2 -RSC, en el cual el polinomio que describe las conexiones retroalimentadas a la entrada es

$$M(D) = 1 + D + D^3 = 1101_2 = (1)(101) = 15_8$$

mientras que el polinomio que describe la salida es

$$B(D) = 1 + D + D^2 + D^3 = 1111_2 = (1)(111) = 17_8$$

En la literatura este código se le denomina como $G_1 = 15$, $G_2 = 17$ o simplemente como (15,17).

Por definición, la función de transferencia del registro de desplazamiento con retroalimentación vendrá dada por:

$$\frac{B(D)}{M(D)} = \frac{1 + D + D^2 + D^3}{1 + D + D^3}$$

que al multiplicar en cruz suministra

$$(1 + D + D^2 + D^3)M(D) = (1 + D + D^3)B(D)$$

y en el dominio del tiempo se tendrá:

$$m_i + m_{i-1} + m_{i-2} + m_{i-3} + b_i + b_{i-1} + b_{i-3} = 0 \tag{10.12}$$

en donde la suma es en módulo 2. La ecuación 10.12 es la ecuación de verificación de paridad, la cual es satisfecha por el codificador de la figura 10.20 en cada tiempo discreto i .

La figura 10.21 ilustra el decodificador turbo, que consiste de dos decodificadores *máximos a posteriori* (MAP) y un trayecto de retroalimentación. Esta configuración trabaja de una manera similar al turbocompresor de una máquina de combustión interna, donde se toma energía de los gases de escape para forzar el flujo de aire a la entrada, y de ahí el

término *turbo*. El primer decodificador toma la información de la señal recibida y calcula el valor de la *probabilidad a posteriori*. Este valor se usa luego como la *probabilidad a priori* del segundo decodificador. La salida se retroalimenta al primer decodificador, repitiéndose el proceso en forma iterativa y obteniéndose un resultado más refinado en cada iteración.

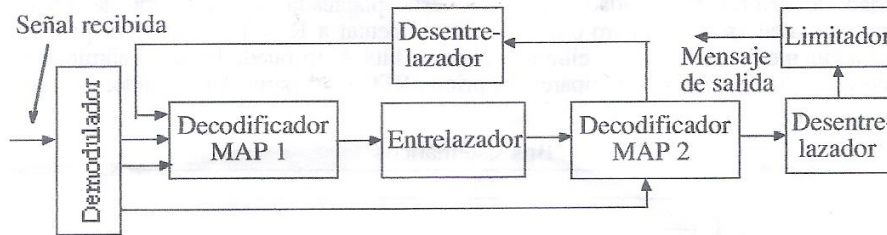


Figura 10.21
Decodificador Turbo

En lugar de emplear el algoritmo de Viterbi, el cual realiza decisiones de salida rigurosas sobre decisiones de entrada blandas y así minimizar el error de la secuencia como un todo, las dos etapas decodificadoras emplean el algoritmo BCJR (Bahl, Cocke, Jelinek y Raviv, 1972), el cual realiza decisiones de salida blandas sobre decisiones de entrada blandas. El algoritmo minimiza los bits errados estimando las probabilidades a posteriori de cada uno de los bits de una palabra codificada y luego, para reconstruir la secuencia original de datos, se hacen decisiones rigurosas sobre las decisiones de salida blandas.

Los resultados obtenidos por los investigadores son impresionantes. Con una codificación de $R = 1/2$, $G_1 = 37$, $G_2 = 21$, 65537 entrelazados y 18 iteraciones, se ha logrado una razón de bits errados de 10^{-5} para $E_b/N_0 = 0.7$ dB. La principal desventaja de los códigos turbo, con sus palabras codificadas relativamente largas y su proceso iterativo de decodificación, es su larga latencia. Un sistema con los valores antes referidos tiene una latencia que lo hace impráctico para telefonía de voz, pero resulta excelente para aplicaciones donde la limitación de la potencia transmitida es crítica y la complejidad del decodificador es relativamente poco importante, como es el caso de las sondas espaciales.

10.6 RESUMEN

En el presente capítulo se describieron las diferencias estructurales entre los códigos de bloque y los códigos convolucionales. El problema de la decodificación se presentó en términos del algoritmo de máxima verosimilitud, basándose en la distancia métrica entre los símbolos codificados recibidos. Se destacó el empleo de las decisiones blandas en los códigos convolucionales. Se estudió la distancia libre y el algoritmo de Viterbi. Se estudió la técnica, denominada modulación codificada de enrejado, (TCM, Trellis Coded Modulation) en la cual la modulación y la codificación se trataron como una entidad conjunta, en lugar de visualizarlas como operaciones separadas. Esta técnica ofrece una manera atractiva de lograr ganancia de codificación sin tener que pagar el costo de un mayor ancho de banda. Finalmente se describieron los códigos turbo o códigos concatenados paralelos (PCC, parallel concatenated codes), una clase relativamente nueva de códigos convolucionales con la cual se logran capacidades del canal muy cercanas al límite de Shannon.

PROBLEMAS

10.1-1 Dibujar el diagrama de transición de estados para el código de razón 1/2 generado por los registros de desplazamiento de la figura P10.1-1.

10.1-2 Repetir el problema 10.1-1, para la figura P10.1-2

10.1-3 Repetir el problema 10.1-1, para la figura P10.1-3