

TURBO CODIFICACIÓN PARA UMTS

Víctor Márquez^{1,2}, Oriol Sallent²

¹ Robert Bosch GmbH

² Universitat Politècnica de Catalunya
C/ Jordi Girona, 1-3, 08034 Barcelona

E-mail: victor.marquezperez@telefonica.es; sallent@tsc.upc.es

Resumen

Esta comunicación estudia la turbo codificación convolucional, un nuevo esquema de codificación de canal con unas prometedoras prestaciones que lo han llevado a que se incluya dentro del estándar UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access). El estudio se centra en una comparación frente a la codificación convolucional convencional en condiciones de igual complejidad computacional, resultando que para longitudes de paquetes de entrada grandes los turbo códigos ofrecen un mejor comportamiento, mientras que para longitudes de entrada menores a 160 bits es preferible la codificación convencional.

I. Introducción

Los sistemas de comunicaciones móviles basados en CDMA (Code Division Multiple Access) se presentan como una solución prometedora para gestionar la creciente demanda de servicios multimedia, impulsada en gran medida por el asombroso crecimiento experimentado durante los últimos años en los mercados de Internet y los WWW. Los sistemas CDMA podrían a su vez beneficiarse de las ventajas que esta técnica de acceso múltiple proporciona en términos de flexibilidad, robustez a interferencias indeseadas y facilidad natural de integración de distintos servicios. En realidad, CDMA emerge claramente como la tecnología dominante en los sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación, hecho reflejado en las propuestas UTRA de ETSI, W-CDMA de ARIB o cdma2000 de TTA, sometidas a la ITU como parte de la familia de sistemas que cumplen los requerimientos establecidos para la tercera generación o IMT-2000.

Por otra parte, la adversidad de la propagación en un entorno móvil impone la necesidad de proteger la información cuando ésta es transmitida por el canal. Las técnicas más comunes para garantizar la integridad de la información son las llamadas FEC (Forward Error Correction) y ARQ (Automatic Repeat reQuest). Las estrategias FEC consisten en añadir redundancia a la información útil de usuario para proporcionar una cierta capacidad correctora de errores en recepción. Las estrategias ARQ se fundamentan en la retransmisión de aquellos paquetes que contienen errores. Puesto que FEC ofrece una fiabilidad limitada, suele considerarse conjuntamente con ARQ para mejorar la fiabilidad y garantizar que la información que se pasa a capas superiores está libre de errores. La estrategia FEC, mediante la corrección de tantos bits erróneos como le es posible, reduce la frecuencia de las retransmisiones ARQ.

Es bien sabido que en los sistemas de espectro ensanchado, entre los que se encuentran los sistemas CDMA, el uso de técnicas FEC no requiere la ocupación de ancho de banda adicional. Estudios anteriores sobre sistemas de espectro ensanchado ya demostraron ventajas significativas del uso de codificación de canal en estos entornos, traducidas en una mejora de la capacidad del sistema.

En 1993 Claude Berrou, Alain Glavieux y Punya Thitimasjshima, presentaron una nueva técnica correctora de errores con un esquema de decodificación iterativa asociado [1]. Éstos códigos fueron llamados 'Turbo Códigos' y mostraron que eran posibles comunicaciones fiables con una eficiencia de potencia cercana al límite teórico predicho por Claude Shannon en 1948.

A finales de 1998 los turbo códigos comenzaron a considerarse en la estandarización del sistema UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Inicialmente se propusieron tres alternativas: turbo codificación convolucional paralelo, turbo codificación convolucional serie y turbo codificación bloque. Finalmente, se decidió optar por la turbo codificación convolucional paralela, y ésta, junto a la codificación convolucional convencional son las estrategias de codificación de canal consideradas actualmente en el foro 3GPP (3rd Generation Partnership Project), encargado de la estandarización de UTRA [2].

Si bien los turbo códigos están ya incorporados en las especificaciones de 3GPP, sus principales características, ventajas e inconvenientes frente a la codificación convolucional clásica no han sido todavía suficientemente exploradas. En particular, la longitud de los paquetes de entrada al codificador resulta uno de los parámetros que determina el ámbito de aplicación e interés de una u otra estrategia, tal y como se mostrará mediante este estudio.

El resto de la comunicación está estructurada en cuatro secciones. En la sección II examinaremos cuáles son los principios fundamentales de la turbo codificación convolucional y la decodificación iterativa. En la sección III expondremos los dos sistemas de codificación de canal propuestos para UMTS, como son la codificación convolucional convencional y la turbo codificación convolucional. En la sección IV mostraremos cuál ha sido el modelo de simulación utilizado y describiremos el entorno de simulación. Por último, en la sección V presentaremos los resultados obtenidos mediante simulación que comparan ambas técnicas de codificación tanto para longitudes de paquete de entrada grandes, como pequeñas. En ambos casos utilizaremos un entorno de simulación realístico propio de UMTS. La sección VI recoge las conclusiones extraídas del trabajo de investigación.

II. Turbo codificación convolucional y turbo decodificación iterativa

Un turbo codificador convolucional se basa en la concatenación en paralelo de dos codificadores RSC separados por un interleaver. La *Figura 1* nos muestra el diagrama de bloques del turbo codificador. Los bits de información son codificados por el primer componente codificador directamente, mientras que el segundo componente codificador opera con una versión 'desordenada' de ellos. Con ello producimos los bits de paridad del primer y el segundo codificador. La señal a enviar por el canal estará formada por los bits sistemáticos que coinciden con los de información y los bits de paridad de ambos componentes codificadores. Si deseamos obtener una tasa de $R = 1/3$ todos los bits sistemáticos y de paridad generados son enviados al canal. En cambio, si la tasa deseada es $R = 1/2$ a los bits de paridad producidos por los componentes codificadores se les aplica un proceso de puncturing alternativo, esto es, por cada bit de información se envía un bit de paridad de cada componente codificador alternativamente.

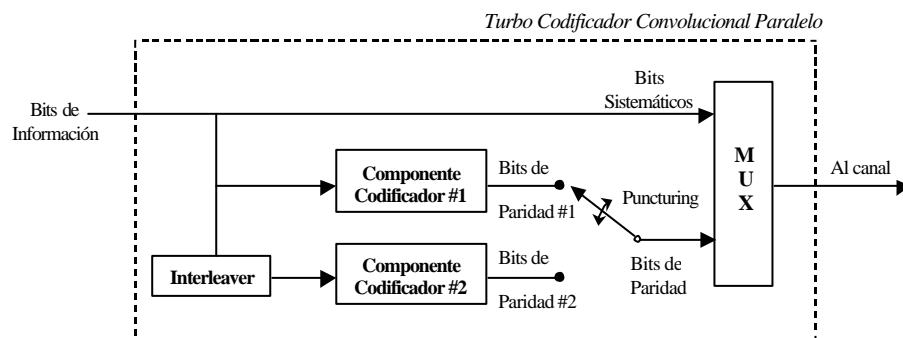


Figura 1. Diagrama de bloques del turbo codificador convolucional paralelo.

En recepción, la turbo decodificación iterativa está formada por dos componentes decodificadores convolucionales en paralelo que decodifican los bits recibidos por su correspondiente componente codificador (*Figura 2*). El primer componente decodificador produce además cierta información extrínseca no relacionada con los bits de entrada, que permite al segundo componente codificador decodificar los mismos bits recibidos con una tasa de error menor. El proceso se reitera hasta que se obtiene la tasa de error deseada, teniendo en cuenta que por cada iteración se aumenta el grado de complejidad del turbo decodificador convolucional.

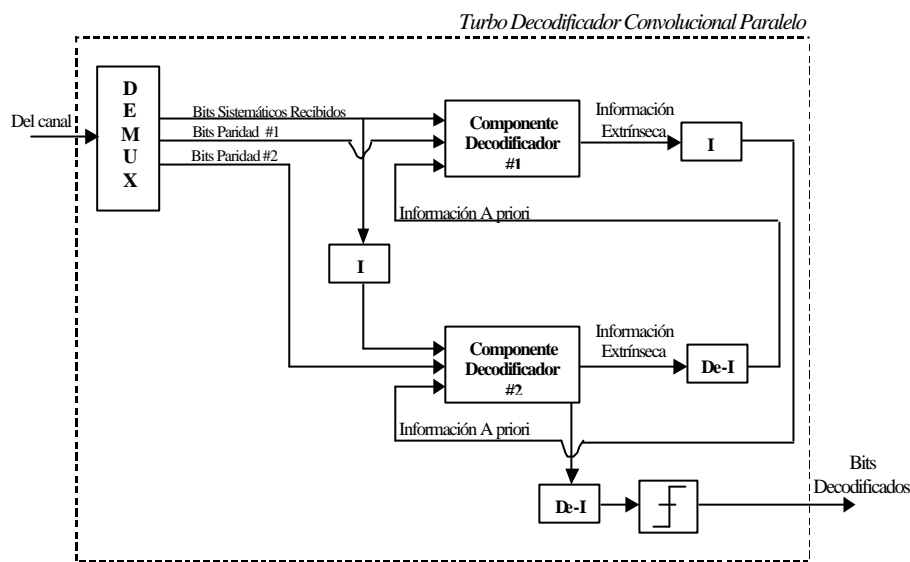


Figura 2. Diagrama de bloques del turbo decodificador convolucional paralelo.

III. Codificación de canal en UMTS

Dos son las estrategias de trabajo estudiadas en la estandarización de UMTS con el fin de corregir los errores introducidos por el canal móvil: la codificación convolucional convencional y la turbo codificación convolucional.

Para la codificación convolucional convencional se seleccionaron:

- Un codificador convolucional no sistemático (NSC- Non-Systematic Convolutional) de tasa $R = 1/2$, 256 estados y dos polinomios generadores.
- Un codificador convolucional no sistemático NSC de tasa $R = 1/3$, 256 estados y tres polinomios generadores.

Para la turbo codificación convolucional se seleccionaron¹:

- Un turbo codificador de tasa total $R = 1/2$ donde dos componentes codificadores RSC idénticos de 8 estados se concatenaban en paralelo mediante un interleaver aleatorio.
- Un turbo codificador de tasa total $R = 1/3$ con componentes codificadores iguales a los del turbo codificador de tasa total $R = 1/2$.

¹ En el momento del estudio eran dos las propuestas de turbo codificación aceptadas de tasas $R = 1/2$ y $R = 1/3$. En la versión actual del estándar se contempla sólo la turbo codificación de tasa $R = 1/3$. Para la codificación convolucional convencional el estándar ha mantenido ambas tasas aunque sólo se mostrarán resultados para la tasa de $R = 1/3$.

Para realizar una comparación equitativa, ambas estrategias se evaluarán en condiciones de complejidad computacional similares. La complejidad de un sistema de codificación / decodificación es función del número de operaciones necesarias para corregir los bits erróneos. Generalmente, es la etapa decodificadora la que limita el número de cálculos numéricos a realizar.

En el caso del turbo decodificador se realizan 8 iteraciones con 2 decodificadores convolucionales de 8 estados que utilizan el algoritmo de decodificación MAP (Maximum A Posteriori), 2 veces más complejo que el algoritmo de Viterbi utilizado en la decodificación convolucional convencional. Por tanto obtenemos el siguiente indicador del número de operaciones a realizar para la turbo codificación de valor: 8 iteraciones \times 2 decodificadores \times 2 veces más complejos \times 8 estados = 256. Por lo que respecta al codificador convolucional convencional, este indicador se calcularía como 1 iteración \times 256 estados = 256. Así pues, ambas estrategias de codificación / decodificación presentan complejidad computacional similar y por tanto será correcto comparar los resultados obtenidos mediante ambas técnicas.

IV. Modelo de simulación

La *Figura 3* muestra el diagrama de bloques que resume el modelo de simulación utilizado. En esta figura podemos apreciar que la codificación de canal (en negrita) forma parte de un sistema mayor que simula la capa física del entorno UMTS conocida como UTRA, y en particular el modo conocido como TDD, que es el objeto de esta comunicación.

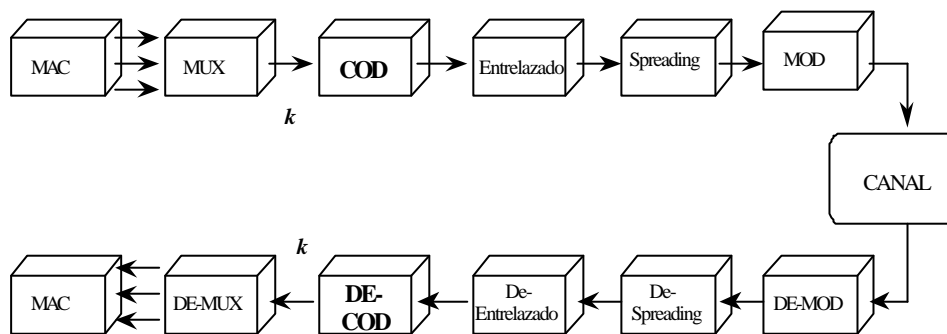


Figura 3. Esquema de bloques del modelo de simulación.

Las tramas de bits procedentes de la capa MAC (Medium Access Control) son convenientemente multiplexadas en tramas de longitud k antes de ser alimentadas al codificador de canal. Las tramas estudiadas corresponden a canales de transporte DCH (Dedicated Channel), las cuales transportan información de control y de usuario. La estructura de la trama en los canales físicos puede observarse en la *Figura 4*. Entre los datos de usuarios se envían también secuencias de entrenamiento (Midamble) que permitirán la detección conjunta de múltiples usuarios (Joint Detection).

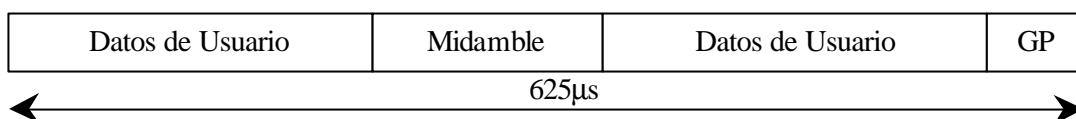


Figura 4. Estructura de la trama en el canal físico.

Ya en la etapa codificadora, las longitudes de entrada utilizadas en las simulaciones van desde los 80 hasta los 5120 bits. La longitud n del paquete de salida del codificador variará en función de la tasa aplicada que será de $R = 1/3$ para los resultados mostrados. Los detalles del bloque codificador / decodificador, tanto para la codificación convolucional convencional como para la turbo codificación convolucional, así como el resto de parámetros del modelo de simulación se resumen en la *Tabla 1*.

Seguidamente, los bits codificados son entrelazados con el fin de evitar los errores en ráfaga propios de los canales móviles. Para ello se utiliza un interleaver rectangular en el que los bits se escriben por filas y se leen por columnas para ser enviados a la siguiente etapa. La base y la altura del interleaver rectangular son determinadas de forma que se minimice el efecto del error en ráfaga. Seguidamente se ensancha la trama de usuario en frecuencia asignando un código a cada usuario, procedimiento básico del CDMA conocido como *spreading* y se utiliza una modulación QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) para dar forma a la señal de salida. El modelo de canal utilizado es un *vehicular* a 120 km/h. Este modelo simula las variaciones rápidas multicamino de Rayleigh propias de los sistemas de comunicaciones móviles.

Longitudes de entrada al Codificador	80, 160, 320, 640 y 5120 bits
Codificador convolucional convencional	1 Codificador NSC $K = 9 \rightarrow G_1 = 557, G_2 = 663, G_3 = 711$
Componentes codificadores del Turbo Codificador	2 Codificadores RSC $K = 4 \rightarrow G_1 = 13, G_2 = 15$
Interleaver del Turbo codificador	<i>S-random</i>
Tasa	$R = 1/3$
Interleaver de canal	<i>Rectangular</i> $L = 80 \rightarrow I = 12 \times 22$ $L = 160 \rightarrow I = 21 \times 24$ $L = 320 \rightarrow I = 24 \times 41$ $L = 640 \rightarrow I = 36 \times 54$ $L = 5120 \rightarrow I = 24 \times 641$
Spreading	$Q=16$
Modulación	<i>QPSK</i>
Canal	<i>Vehicular, $v = 120$ km/h</i>
Algoritmo Decodificador Convolucional	<i>Viterbi</i>
Algoritmo Componentes Decodificadores del Turbo Decodificador	<i>Log-MAP</i>
Número de Iteraciones	8 iteraciones
Número de bits simulaciones	1,000,000 bits

Tabla 1. Resumen de parámetros de simulación utilizados.

En recepción, los símbolos afectados por el canal son demodulados. A continuación, se comprime la señal expandida mediante el procedimiento inverso al spreading y se entrelazan los bits de forma inversa a como se entrelazaron en transmisión, con el mismo interleaver rectangular. Una vez hecho esto se pasa a la etapa decodificadora, en la que utilizaremos las dos técnicas estudiadas: la decodificación convolucional convencional, que utiliza un algoritmo de decodificación basado en Viterbi y la turbo decodificación, que en este caso utiliza el algoritmo Log-MAP (Log-Maximum A Posteriori) por ser este el que proporciona el mejor rendimiento en decodificación a expensas de un coste computacional relativamente bajo (2 veces superior al de Viterbi). Los paquetes, tras ser convenientemente de-multiplexados pasan nuevamente a la capa MAC.

V. Resultados de las simulaciones

En esta sección se muestran los resultados de las simulaciones llevadas a cabo con C/Matlab bajo plataforma UNIX para evaluar las prestaciones la codificación convolucional convencional vs la turbo codificación convolucional en entornos realistas de UMTS. En estas simulaciones codificadores convolucionales convencionales y turbo codificadores convolucionales de complejidad similar se comparan en términos de la longitud de entrada al codificador con el fin de determinar cuándo deben utilizarse los unos y cuándo los otros. Los parámetros concretos utilizados en las simulaciones de esta sección están resumidos en la *Tabla 1* (sección IV).

En la *Figura 5* se muestra la respuesta de la codificación convolucional convencional respecto a la turbo codificación para **longitudes de trama grandes**. En el gráfico se evalúa la probabilidad de error (BER – Bit Error Rate) respecto a la E_b/N_o . Los resultados han sido obtenidos para el modo TDD, tasa $R = 1/3$ y longitudes de entrada de 5120 y 640 bits. Se puede apreciar con claridad que la turbo codificación supera ampliamente la codificación convolucional convencional para la longitud de 5120 bits. En concreto, 2 dB para $BER=10^{-3}$. En cambio, para longitudes de entrada medias (640 bits) la ventaja de la turbo codificación sobre la codificación convolucional convencional se reduce.

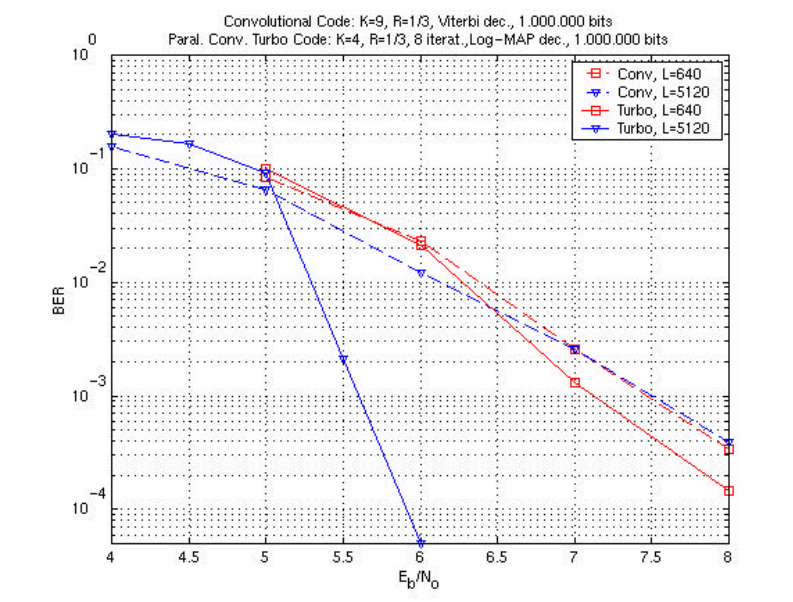


Figura 5. Comparación para **longitudes de trama grandes** (640 y 5120 bits).

No obstante, en general longitudes de entrada grandes implican una mayor retardo en la decodificación, el cual que puede ser en ocasiones intolerable en aplicaciones en tiempo real (voz, vídeo...).

En la *Figura 6* podemos observar como se comportan turbo códigos convolucionales y códigos convolucionales convencionales para **longitudes de trama pequeñas** de 80, 160 y 320 bits. Observamos que, al utilizar longitudes de entrada menores que 160 bits (80 bits) la tasa de error de la turbo codificación convolucional es mayor que la de la codificación convolucional convencional. Por tanto, para una $R = 1/3$, y el canal selectivo en frecuencia de Rayleigh estudiado, podemos fijar en 160 la longitud umbral del paquete de entrada al codificador para seleccionar, en el modo TDD de UMTS, cuál debe ser el tipo de codificación de canal a utilizar.

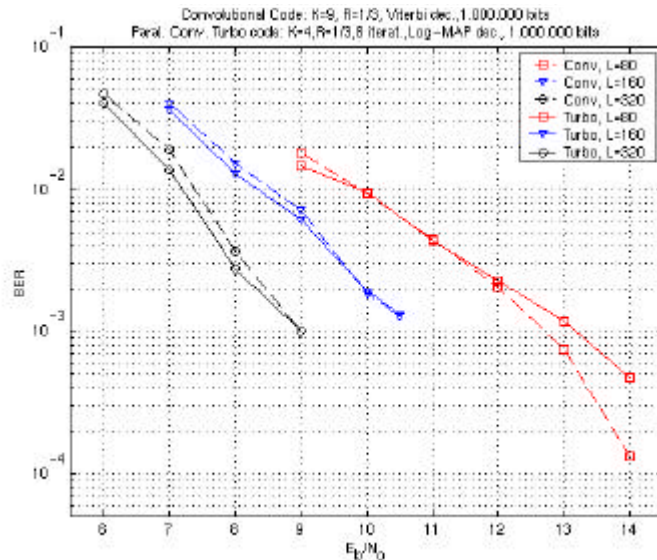


Figura 6. Comparación para longitudes de trama pequeñas (80, 160 y 320 bits).

VI. Conclusiones

En este artículo hemos dado una visión de cuáles eran los principios básicos de la turbo codificación convolucional poniendo de manifiesto su uso como esquema de codificación de canal en UMTS junto a la codificación convolucional convencional. Con el fin de comparar ambas técnicas, hemos seleccionado esquemas de codificación con coste computacional similar. Los resultados de las simulaciones nos han mostrado la gran ventaja que supone utilizar turbo codificación frente a codificación convolucional convencional para longitudes de paquetes de entrada grandes, pero también que no siempre es preferible utilizar la turbo codificación frente a la codificación convolucional convencional. Para longitudes de entrada menores a 160 bits debemos utilizar esta última en lugar de la turbo codificación.

VII. Referencias

- [1] Berrou C., Glavieux A., and Thitimajshima P. (1993). "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-Codes," *ICC'93*, Geneva, Switzerland, pp. 1064-1070, May.
- [2] <http://www.3gpp.org>