

INFORME UIT-R BS.2004

**SISTEMAS DE RADIODIFUSIÓN DIGITAL PARA BANDAS
CON MODULACIÓN DE AMPLITUD**

(1995)

1 Introducción

En las últimas décadas las técnicas de radiodifusión en las bandas con modulación de amplitud (150 kHz-30 MHz) han experimentado muy pocas innovaciones técnicas. La sencillez del receptor ha sido siempre una gran ventaja de la modulación de amplitud y debido a su largo alcance estas ondas con MA siguen siendo las más adecuadas para la radiodifusión nacional e internacional.

Sin embargo, en condiciones de propagación típicas tales como inestabilidad ionosférica, un sistema analógico clásico puede ofrecer una baja calidad de recepción.

Los desarrollos técnicos introducidos en otras bandas de frecuencias utilizadas para programas radiofónicos así como los cambios políticos que han tenido lugar han dado como resultado que las bandas con MA hayan perdido en gran medida su significado práctico y estratégico.

La baja calidad de transmisión inherente a la radiodifusión con MA es una característica debida fundamentalmente al procedimiento de modulación y no a la banda de frecuencias. Si la modulación de amplitud se sustituye por un procedimiento de modulación digital puede obtenerse una calidad de transmisión muy buena manteniendo a la vez el largo alcance de la misma. No obstante, la transmisión digital debe adaptarse a las estructuras de canales existentes.

La transmisión digital es adecuada no sólo para la radiodifusión de programas radiofónicos sino también para la transmisión de información adicional y para la transmisión de datos en forma general (servicios de valor añadido).

2 Características del canal con modulación de amplitud

Las bandas con MA incluyen las ondas largas (banda de ondas kilométricas, 150 a 285 kHz), las ondas medias (banda de ondas hectométricas, 525 a 1 605 kHz) y las ondas cortas (banda de ondas decamétricas, 3,3 a 26 MHz).

Las características de los canales con MA varían considerablemente según las bandas de frecuencias:

Ondas kilométricas: 150-285 kHz, canal con una anchura de 9 kHz; propagación por onda de superficie, interferencia reducida por ondas ionosféricas.

Ondas hectométricas: 525-1 605 kHz, canal con una anchura de 9 ó 10 kHz, propagación durante las horas diurnas: como en el caso anterior pero con un alcance menor. Propagación durante horas nocturnas: por onda de superficie y por onda ionosférica y, en consecuencia, aparición de fuerte interferencia.

Ondas decamétricas: 3,3-26 MHz, canal con una anchura de 10 kHz (DBL) y de 5 kHz (BLU); propagación por onda ionosférica.

La ionosfera es un medio de propagación dispersivo caracterizado por la presencia de multimodos y multitrayectos, presentando cada modo (o cada trayecto) un retardo de grupo, amplitud, polarización y desviación de frecuencia Doppler particular.

En el cuadro 1 aparecen los órdenes de magnitud típicos de los parámetros principales de la propagación ionosférica.

CUADRO 1

Orden de magnitud de los principales parámetros de la propagación ionosférica

Parámetro	Comportamiento del canal medio	Comportamiento del canal extremo
Número de modos y trayectos	Dependiendo de la longitud del radioenlace: ≤ 8 para ondas ionosféricas con un nivel de la onda de superficie entre 0 y -40 dB para cortas distancias	
Dispersión del retardo total	≤ 5 ms	≤ 8 ms
Dispersión del retardo en cada trayecto	Unas pocas decenas de μ s	
Desviación Doppler media por cada trayecto	Unas pocas décimas de Hz $fd \leq 2,5$ Hz	Unos pocos Hz $fd \leq 10$ Hz
Dispersión Doppler para cada trayecto	Unas pocas décimas de Hz $\Delta fd \leq 2$ Hz	Unos pocos Hz $\Delta fd \leq 5$ Hz

Debido a estas características de propagación, a menudo se producen desvanecimientos planos profundos o selectivos de gran intensidad que deterioran las señales con propagación ionosféricas y afectan de forma significativa la calidad de la recepción con MA convencional.

Por lo que se refiere a la recepción móvil, la contribución a la desviación Doppler causada por el movimiento de un receptor móvil es más reducida que la contribución a la desviación Doppler debida al movimiento de las capas ionosféricas.

3 Criterios de selección para un procedimiento de modulación digital

Teóricamente, los procedimientos de una sola portadora y los procedimientos multiportadora (ortogonales) son casi equivalentes si la transmisión se lleva a cabo mediante canales variables en el tiempo y selectivos en frecuencia y si se utiliza codificación y/o ecualización para compensar los modelos de errores típicos del procedimiento de modulación.

Por consiguiente, pueden emplearse ambos tipos para funcionamiento con red de una sola frecuencia.

El número de estados de modulación es el mismo en ambos casos. Depende de la relación entre la velocidad de transmisión de datos necesaria y la velocidad de símbolo. Esta última depende a su vez de la separación existente entre canales.

Por último debe hacerse mención a la anchura de banda de 9 kHz (o de 10 kHz) de los canales con MA que admitirá únicamente una velocidad de transmisión de datos de unas pocas decenas de kbit/s.

La diferente separación entre canales en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas (9 ó 10 kHz) y las bandas de ondas decamétricas (10 ó 5 kHz) da lugar a que aparezcan diferencias en los procedimientos de modulación digital si se requiere que el procedimiento digital sea compatible con la actual separación entre canales.

Debido a estas limitaciones el codificador de sonido digital debe proporcionar una velocidad de transmisión de datos de aproximadamente 20 kbit/s.

Con una anchura de banda de radiofrecuencia utilizable de 7 kHz para las bandas de ondas kilométricas y hectométricas, es necesario que el procedimiento de modulación tenga una eficacia espectral aproximada de 3 bits por Hz de anchura de banda.

Para las bandas de ondas decamétricas, con una anchura de banda de radiofrecuencia utilizable de 4 kHz, es necesaria una eficacia espectral de 5 bits por Hz de anchura de banda si se desea obtener la misma calidad de sonido que en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas.

Dependiendo de los parámetros seleccionados para el régimen de caída, la velocidad de codificación, la relación de estructura de trama y el periodo de guarda, ambos procedimientos requieren entre 32 y 64 estados de modulación.

La decisión en favor de un procedimiento multiportadora o de una sola portadora viene determinada principalmente por la longitud de la respuesta del canal al impulso, que se especifica en términos de longitud de símbolos. Considerando la estructura técnica necesaria en el receptor el procedimiento se selecciona normalmente de acuerdo con la siguiente regla:

- Procedimiento de una sola portadora: la longitud de la respuesta del canal al impulso es inferior o igual a la longitud de 16 símbolos.
- Procedimiento multiportadora: la longitud de la respuesta del canal al impulso es mayor o igual a la longitud de 64 símbolos.

Si la longitud de la respuesta del canal al impulso es inferior a la longitud de 64 símbolos, ya no queda asegurada la reducción en la complejidad que cabe esperar del procedimiento multiportadora. Por otro lado, la eficacia del ecualizador necesario en el procedimiento de una sola portadora disminuye si las respuestas del canal al impulso rebasan la longitud de 16 símbolos.

3.1 Soporte físico del transmisor

La decisión en un favor de un procedimiento multiportadora o de una sola portadora viene también influenciada por la complejidad añadida en el extremo del transmisor.

Si se desean mantener las zonas de cobertura de un sistema de radiodifusión con MA, la transmisión digital debe permitir la reducción de la potencia del transmisor en algunos dB en comparación con la transmisión analógica actual. Sin embargo, por regla general el nivel de potencia de radiofrecuencia necesario deberá ser lo suficientemente elevado como para compensar la baja eficacia de la etapa de salida del transmisor lineal.

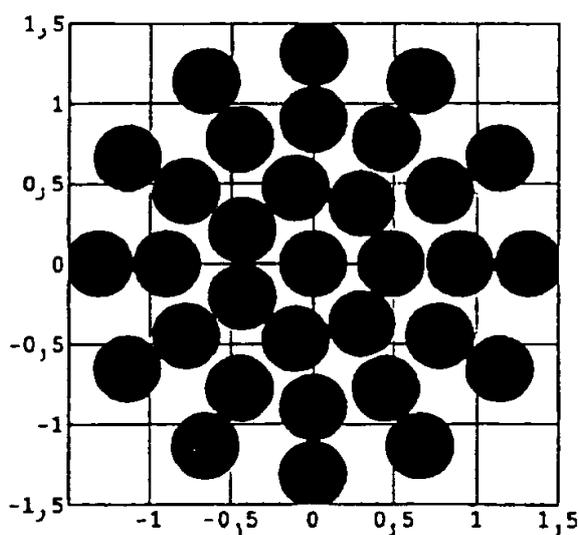
Por consiguiente, debe ser posible continuar la explotación de los actuales transmisores con MA (clase C). A tal efecto el transmisor deberá complementarse con un modulador de fase, insertado tras el oscilador maestro. El modulador de amplitud debe ser capaz de transmitir una componente de continua. Este requisito lo cumplen los moduladores MID (modulación de impulsos en duración), los moduladores de impulsos por pasos, etc., es decir todos los tipos de moduladores modernos.

Normalmente la modulación digital se representa en coordenadas cartesianas con partes reales e imaginarias (señales I y Q). Por esa razón los procedimientos de modulación con un número elevado de etapas, por ejemplo el procedimiento MAQ 64, presenta a menudo estrellas de fase cuadrática (constelaciones de símbolos).

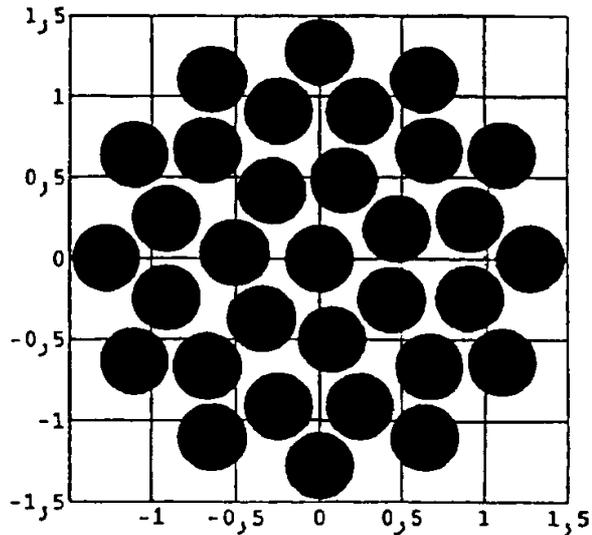
Sin embargo, para una modulación digital compleja de un transmisor con MA convencional reequipado, la señal de modulación debe convertirse en una señal de amplitud y una señal de fase. Se trata de la representación polar mediante las señales A y φ .

La señal de amplitud se aplica al modulador de amplitud y la señal de fase al modulador de fase. Por consiguiente, conviene que los procedimientos de modulación que incluyen un número elevado de estados muestren una cierta simetría rotacional en el diagrama en estrella de fases. Tales procedimientos se denominan MDAP (modulación por desplazamiento de amplitud y fase). Los puntos de estado se disponen en anillos concéntricos. En la fig. 1 aparece un ejemplo de MDAP. También son posibles otras formas de MDAP.

1/7/12/12 MDAP = MDAP 32 en forma:



a) No compacta



b) Compacta

Este procedimiento de modulación, que se ajusta a las características del transmisor con una elevada eficacia, presenta las siguientes ventajas:

- Las no linealidades del modulador de amplitud afectan únicamente los diámetros de los anillos concéntricos.
- Las conversiones amplitud-fase en la etapa de la salida del transmisor darán lugar a una ligera rotación únicamente de los anillos concéntricos. Ello puede compensarse mediante codificación diferencial de los anillos.

Sin embargo el procedimiento también tiene sus inconvenientes, que deben aceptarse si se considera de gran importancia la eficacia del transmisor:

- A pesar de la limitación en banda aplicada a las señales I y Q, las señales A y φ normalmente no están limitadas en banda. No obstante, en la práctica las señales A y φ pueden presentar una limitación de banda de unas 2,5 veces la frecuencia de símbolo.
- Debido a los retardos en el transmisor aparecen desplazamientos de tiempo entre las señales A y φ que debe compensarse. En el caso de un procedimiento de modulación de 32 estados, el desplazamiento de tiempo no debe rebasar el 2% de la longitud de símbolo.

Estas consideraciones son independientes del sistema de modulación elegido.

4 Modulación multiportadora destinada a las bandas con MA (MDFCO)

Una solución para la radiodifusión digital en las bandas con MA puede ser el sistema MDFCO (múltiplex por división de frecuencia con codificación ortogonal) que ya ha sido implantado en el proyecto EU 147-DAB (Digital Audio Broadcasting - radiodifusión de audio digital), asociado con la codificación de audio ISO-MPEG para cumplir los requisitos de la radiodifusión de audio digital de alta calidad destinada a receptores móviles, portátiles y fijos.

El sistema MDFCO funciona adecuadamente a pesar de los desvanecimientos selectivos experimentados por las bandas con MA, debido a que ha sido diseñado para hacer uso de la presencia de trayectos múltiples en vez de ser restringido por este fenómeno.

El sistema MDFCO se basa en dos principios:

- El primer principio consiste en dividir la información a transmitir en un número determinado de portadoras moduladas con velocidades binarias individuales bajas, de forma que cada portadora resulta afectada únicamente por un desvanecimiento plano o no selectivo.

- El segundo principio explota sistemáticamente los trayectos múltiples entre el transmisor y el receptor aprovechando el hecho de que las señales suficientemente separadas en frecuencia y tiempo no pueden ser afectadas de forma idéntica por las condiciones de propagación. Esto es exactamente lo que sucede en un canal de 9 kHz en el caso de retardos de unos pocos milisegundos y en presencia de desplazamiento por efecto Doppler. Por consiguiente, el sistema MDFCO realiza una transmisión de señales elementales a ubicaciones distantes en el dominio tiempo-frecuencia. Ello se logra mediante una codificación convolucional asociada a una decodificación de Viterbi con decisión flexible, junto con un entrelazado en la frecuencia y en el tiempo; cuanto mayor sea la diversidad, más robusto será el sistema.

Además, debido a su capacidad de manejar a situaciones muy acusadas de trayectos múltiples, incluidos los ecos artificiales, el sistema MDFCO proporciona la oportunidad de diseñar redes de radiodifusión más eficaces desde el punto de vista de utilización del espectro.

La capacidad del sistema MDFCO para permitir el funcionamiento con un eco de 0 dB asegura que pueden utilizarse antenas no directivas para recibir un programa difundido, de forma celular, al menos a escala nacional, procedente de dos o más transmisores que funcionan en la misma frecuencia (red de una sola frecuencia). Este tipo de red exige diversas frecuencias en un sistema de radiodifusión analógico (o digital) convencional, circunstancia que es importante tener en cuenta considerando la escasez de recursos del espectro.

4.1 Un prototipo de demostración

Tras los estudios de simulación, el CCETT (Francia) ha desarrollado un prototipo de laboratorio de un sistema MDFCO destinado a las bandas con MA.

El objetivo fundamental de los trabajos era diseñar un sistema con una velocidad de transmisión de datos útil suficiente en un canal de 9 kHz para soportar servicios tales como la radiodifusión de audio de muy buena calidad.

A tal efecto, el CCETT ha desarrollado técnicas digitales avanzadas tales como:

- modulación con codificación en cuadrícula de elevada eficacia espectral y resistente contra la distorsión de canal;
- estimación de canal continua insertando portadoras de referencia entre las portadoras utilizadas por el sistema MDFCO.

Los parámetros principales del prototipo figuran en el cuadro 2. Este prototipo se ha diseñado para una dispersión de retardo de canal con un valor máximo de 2 ms (típico de una red de una sola frecuencia del tamaño de Francia) y para una velocidad de transmisión de datos útil de 24 kbit/s.

CUADRO 2

Parámetros de funcionamiento del prototipo de laboratorio

Anchura de banda de canal	9 kHz
Anchura de banda utilizada	8,7 kHz
Modulación de cada portadora	MAQ-64
Índice de codificación	2/3
Tamaño de la transformada rápida de Fourier	256 puntos
Duración de símbolo útil	21,333 ms
Intervalo de guarda	2,666 ms
Duración total de símbolo	24 ms
Número total de portadoras	184
Número de portadoras útiles	144
Número de portadoras de referencia para estimación de canal continua	24
Número de portadoras para control automático de frecuencias (no se utiliza por el momento)	16
Velocidad de transmisión de datos útil	24 kbit/s
Eficacia espectral neta	2,8 bit/s/Hz
Relación C/N para funcionamientos en canal Gaussiano	17 dB
Relación C/N para funcionamiento sobre canal de Rayleigh con un eco de 0 dB	25 dB

Está conectado a un códec de sonido digital, adaptado a partir de la versión MPEG2 (capa de audio II ISO/MPEG2 a frecuencia de muestreo reducida), también desarrollado en el CCETT.

El montaje de prueba completo del sistema incluye igualmente un simulador de soporte físico de canal, en el que ya han constatado las ventajas que presenta la técnica MDFCO sobre la modulación analógica clásica en canales con MA típicos.

En otros trabajos se incluirán experimentos de transmisión real.

4.2 Infraestructuras de transmisión y equipos de recepción necesarios

En un receptor MDFCO, el procesamiento digital de la señal debe permitir la sintonía automática y con ayuda de datos.

Con respecto a las infraestructuras de transmisión, las primeras pruebas sobre la nueva generación de transmisores con MA de estado sólido han dado buenos resultados. El sistema MDFCO en bandas con modulación de amplitud funciona adecuadamente en la misma etapa del amplificador que la radiodifusión analógica (con banda lateral única).

5 Modulación de una sola portadora destinada a bandas con modulación de amplitud

En Alemania se ha construido un sistema de modulación de una sola portadora que está siendo actualmente sometido a prueba.

Debido a las características del transmisor, el método de modulación multiportadora tiene los siguientes inconvenientes en comparación con el método de una sola portadora.

- El desplazamiento de tiempo entre las señales de amplitud y fase da lugar a una pérdida de la ortogonalidad.
- La modulación multiportadora tiene un elevado factor de cresta de forma que los requisitos con respecto a la linealidad del transmisor son mucho más exigentes que en el caso de modulación de una sola portadora. En consecuencia, la potencia radiada por el transmisor se reduce.

A continuación se indican otras causas por las que se ha llegado finalmente a la decisión de utilizar el procedimiento de una sola portadora:

- Debido a la longitud relativamente corta de la respuesta del canal al impulso, las variaciones estadísticas del canal no son suficientes en la dirección de la frecuencia. Por consiguiente, los efectos promediados del procedimiento multiportadora explotados por el sistema DAB no pueden lograrse en la medida necesaria cuando la longitud de la respuesta del canal al impulso es de unos cientos de símbolos. En el caso de las bandas de ondas kilométricas, hectométricas y decamétricas hay menos de 16 símbolos.
- Esto requiere una estimación de canal exhaustiva y continua en el caso del procedimiento multiportadora.
- Cuando hay un número elevado de etapas de modulación no es sencillo aplicar la modulación o demodulación diferencial al procedimiento multiportadora. Sin embargo, para DAB únicamente se utiliza MDP-4 diferencial.
- La modulación de una sola portadora permite utilizar receptores con estructura sencilla o muy compleja dependiendo de las necesidades. Esta circunstancia se adapta a la necesidad de contar con receptores portátiles y fijos. Con la modulación multiportadora sólo pueden emplearse receptores de estructura compleja.

5.1 Estructura de trama

La utilización de una estructura de trama se ha demostrado que es adecuada para diversas aplicaciones, incluyendo la transmisión por onda corta. La señal consiste en una alineación en serie de tramas (secuencias de códigos) de idéntica estructura, como puede observarse en la fig. 2.

FIGURA 2

Estructura de la trama de funcionamiento en el caso de transmisión en serie

Encabezamiento distribuido = secuencias de prueba

secuencias de prueba



Mediante los encabezamientos es posible:

- sincronizar el receptor con respecto a la fase de la portadora y a los símbolos;
- realizar mediciones en el canal para ajustar el ecualizador.

Para llevar a cabo una estimación de la respuesta del canal al impulso independiente de los datos con la ayuda de los encabezamientos, éstos deben tener al menos una longitud doble de dicha respuesta. Se supone una dispersión del retardo de un valor de 2 ms. Con una velocidad de símbolo de 6 400 símbolos por segundo, resultan 12,8 símbolos.

Por consiguiente la longitud de los encabezamientos es normalmente de 32 símbolos. La relación entre la longitud de datos y la longitud de la trama se supone que toma el valor de 9/10. En consecuencia, la longitud de la trama es de 320 símbolos. Con una velocidad de símbolo de 6 400 símbolos por segundo, resultan 20 tramas por segundo.

5.2 Parámetros de comportamiento del sistema

Basándose en los estudios de simulación llevados a cabo por German Telekom, se han deducido los siguientes requisitos de calidad de funcionamiento del sistema para la transmisión digital:

- anchura de banda de 7 kHz;
- velocidad de transmisión de datos utilizable de 20 kbit/s;
- código convolucional perforado con un índice de codificación 2/3;
- velocidad de símbolo de 6 400 símbolos/segundo;
- factor de caída de 0,125;
- anchura de banda a 3 dB de 6 400 Hz;
- anchura de banda global de 7 200 Hz;
- relación de estructura de trama de 9/10;
- estructura de trama: secuencia de prueba 32, secuencia de datos 288;
- modulación MDAP 1/7/12/12 = MDAP 32.

La probabilidad de error en los símbolos sin codificar de MDAP 1/7/12/12 es de 10^{-4} para una relación E_b/N_0 = 15 dB.

5.3 Codificación y entrelazado

Establecer una comparación entre tasas de errores sin codificar y codificados es difícil porque depende del tipo de codificación utilizada. Como codificación de referencia se emplea un método de codificación convolucional sencillo que sirve para convertir las probabilidades de errores en los bits. Como código convolucional se utiliza un código con una limitación en longitud de 7 y un índice de codificación 1/2. El tren de bits recibido se decodifica mediante el algoritmo de Viterbi. En este ejemplo se aplica la decisión rígida; con la decisión flexible pueden lograrse mejores resultados.

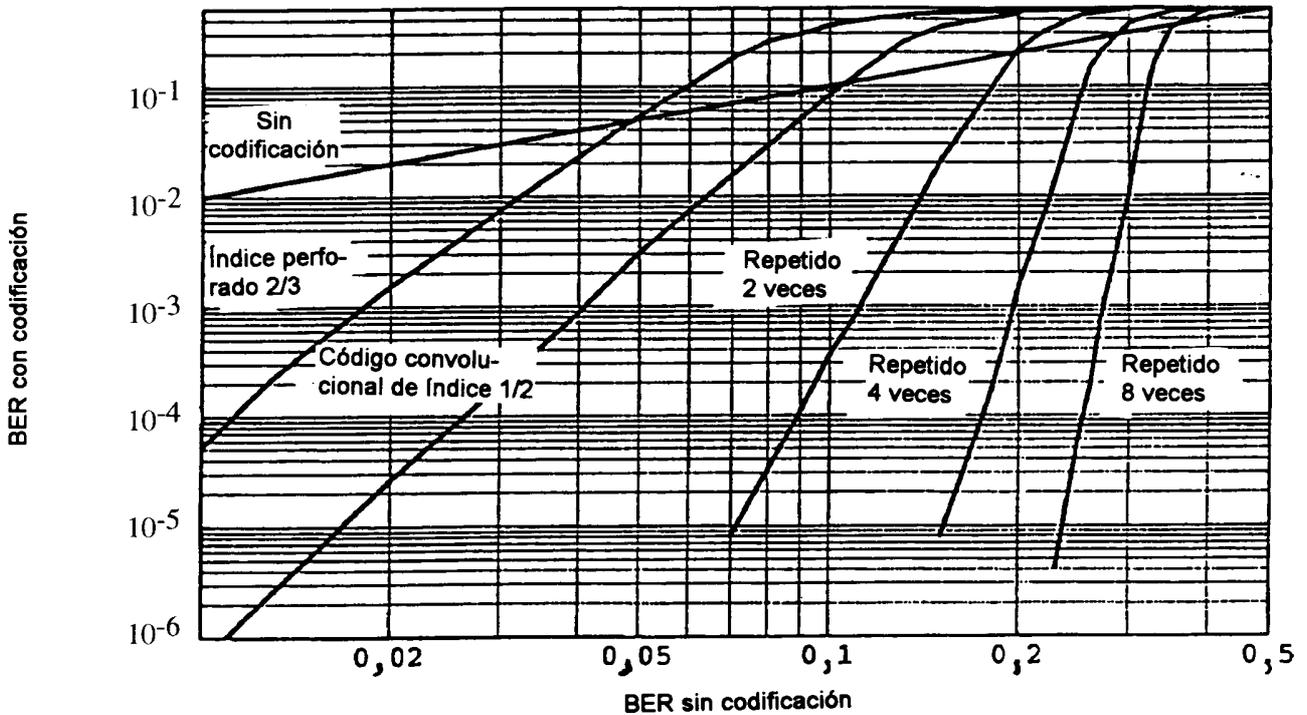
En el caso de una proporción de bits erróneos especificada en el tren de bits (BER sin codificación) con distribución uniforme de los errores, la aplicación del código apropiado da lugar a la proporción de bits erróneos (BER con codificación) representada en la fig. 3.

Las diversas curvas muestran la probabilidad de error de los sistemas con una codificación obtenida a partir de la codificación de índice 1/2 original. Las probabilidades de error pueden lograrse únicamente si los errores a la entrada del decodificador presentan una distribución uniforme. Ello hace necesario la utilización de un dispositivo de entrelazado. A tal efecto es adecuado emplear un entrelazador convolucional puesto que no se requiere ninguna sincronización explícita para deshacer el entrelazado.

FIGURA 3

Comportamiento de un código convolucional de índice 1/2

Código convolucional de índice 1/2, repetición del índice efectivo perforado o repetido (1, 2/3, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16) como decisión flexible



A la salida del dispositivo de descentrelazado hay un retardo del tren de bits que se compara a la entrada del dispositivo de entrelazado. Si el objetivo es desplazar una frecuencia de desvanecimiento de 0,2 Hz correspondiente a una duración del desvanecimiento de cinco segundos, es necesario establecer un periodo de entrelazado de unos diez segundos (desvanecimiento plano). Este retardo de tiempo puede constituir un problema para los oyentes (por ejemplo, en el caso de señales horarias).

5.4 Pruebas prácticas

A lo largo de noviembre de 1994 German Telekom ha llevado a cabo pruebas prácticas a la frecuencia de 810 kHz. En dichas pruebas se ha utilizado un transmisor de 1 kW con modulación digital de acuerdo con el procedimiento A, ϕ .

Posteriormente se publicarán los resultados de las pruebas.