

9E4: Radiotelegrafía en ondas decamétricas

RECOMENDACIÓN UIT-R F.436-4

**DISPOSICIÓN DE LOS CANALES DE TELEGRAFÍA ARMÓNICA CON MODULACIÓN
POR DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA EN CIRCUITOS RADIOELÉCTRICOS
EN ONDAS DECAMÉTRICAS**

(Cuestión UIT-R 145/9)

(1966-1970-1978-1994-1995)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que la falta de normalización para la disposición de canales de los sistemas de telegrafía armónica multicanal en circuitos radioeléctricos de ondas decamétricas puede crear dificultades en el establecimiento de estos sistemas;
- b) que es importante utilizar de la mejor forma posible las frecuencias radioeléctricas, con miras a la economía del espectro y a la eficacia de los circuitos;
- c) que en numerosos enlaces se utilizan sistemas de modulación por desplazamiento de frecuencia;
- d) que el método de transmisión por permutación de frecuencia se utiliza en enlaces de gran longitud sujetos a distorsiones pronunciadas a causa de la propagación por trayectos múltiples,

recomienda

- 1** que se utilice preferentemente la disposición de canales indicada en el Cuadro 1 para los sistemas arrítmicos que funcionan con una velocidad de modulación 50 Bd;
- 2** que la disposición de canales del Cuadro 2 sea la preferida en los sistemas síncronos que funcionan con una velocidad de modulación de aproximadamente 100 Bd (96 Bd con corrección automática de errores);
- 3** que se utilice preferentemente la disposición de canales indicada en el Cuadro 3 para los sistemas síncronos que funcionan con una velocidad de modulación de aproximadamente 200 Bd (192 Bd con corrección automática de errores);
- 4** que en los sistemas de permutación de frecuencia se utilicen las frecuencias centrales de los Cuadros 1, 2 y 3 asociadas por pares en la forma que mejor convenga a las condiciones de propagación de la ruta. (Una disposición típica consistiría en tomar pares alternos, lo que proporcionaría una separación de 240 Hz ó 340 Hz ó 480 Hz entre las frecuencias);
- 5** para otras informaciones sobre las técnicas de diversidad hay que referirse al Anexo 1.

NOTA 1 – Los trabajos teóricos llevados a cabo en Japón indican un desplazamiento de frecuencia óptimo de $0,8 B$ (Hz), siendo B la velocidad de modulación (Bd). Con ello se obtendría una anchura de banda mínima requerida (entre puntos a -3 dB) de B (Hz). Diversos experimentos de laboratorio y mediciones realizadas sobre los circuitos síncronos ARQ Frankfort-Osaka dan validez a estas conclusiones. Para circuitos que no funcionan cerca de la MUF y para circuitos asíncronos, algunos resultados teóricos indican que el desplazamiento de frecuencia óptimo se encuentra entre B y $2B$.

CUADRO 1

Frecuencias centrales de los canales de telegrafía armónica con modulación por desplazamiento de frecuencia con una separación de canales de 120 Hz y un índice de modulación de 1,4 aproximadamente (Desplazamiento de frecuencia: ± 35 Hz o ± 30 Hz)

Posición del canal	Frecuencia central (Hz)	Posición del canal	Frecuencia central (Hz)
1	420	11	1 620
2	540	12	1 740
3	660	13	1 860
4	780	14	1 980
5	900	15	2 100
6	1 020	16	2 220
7	1 140	17	2 340
8	1 260	18	2 460
9	1 380	19	2 580
10	1 500	20	2 700

NOTA 1 – Véase la Recomendación UIT-T R.39.

CUADRO 2

Frecuencias centrales de los canales de telegrafía armónica con modulación por desplazamiento de frecuencia, con separación de 170 Hz entre canales e índice de modulación de 0,8 aproximadamente (Desplazamiento de frecuencia: $\pm 42,5$ Hz o ± 40 Hz)

Posición del canal	Frecuencia central (Hz)	Posición del canal	Frecuencia central (Hz)
1	425	8	1 615
2	595	9	1 785
3	765	10	1 955
4	935	11	2 125
5	1 105	12	2 295
6	1 275	13	2 465
7	1 445	14	2 635
		15	2 805

NOTA 1 – Véase la Recomendación UIT-T R.39.

NOTA 2 – Los trabajos teóricos llevados a cabo en Japón indican un desplazamiento de frecuencia óptimo de $0,8 B$ (Hz), siendo B la velocidad de modulación (Bd). Con ello se obtendría una anchura de banda mínima requerida (entre puntos a -3 dB) de B (Hz). Diversos experimentos de laboratorio y mediciones realizadas sobre los circuitos síncronos ARQ Frankfort-Osaka confirman estas conclusiones. Para circuitos que no funcionan cerca de la MUF y para circuitos asíncronos, algunos resultados teóricos indican que el desplazamiento de frecuencia óptimo se encuentra entre B y $2B$.

CUADRO 3

Frecuencias centrales de los canales de telegrafía armónica con modulación por desplazamiento de frecuencia con separación entre canales de 480 Hz y un índice de modulación de 0,8 aproximadamente (Desplazamiento de frecuencia: ± 80 Hz)

Posición del canal	Frecuencia central (Hz)	Posición del canal	Frecuencia central (Hz)
1	600	4	2 040
2	1 080	5	2 520
3	1 560	6	3 000

NOTA 1 – Véase la Recomendación UIT-T R.38A.

ANEXO 1

Utilización de diversidad de codificación

1 Introducción

Es preciso establecer sistemas de transmisión de datos por ondas decamétricas para proporcionar un servicio fiable y eficiente con módems multicanales MDF, como los descritos en esta Recomendación, o con módems multicanal MDP como los que se describen en la Recomendación UIT-R F.763. Para compensar el efecto desfavorable del fenómeno de desvanecimiento selectivo del medio de transmisión, se utilizan ampliamente técnicas con diversidad de frecuencias, en banda y de otro tipo.

En este Anexo se describe una técnica de codificación merced a la cual se mejora el sistema con diversidad de frecuencias en banda.

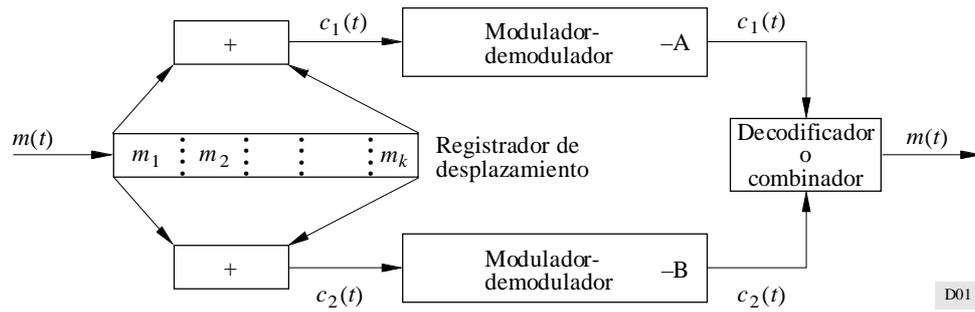
2 Descripción del sistema

En la Fig. 1 se muestra el esquema de transmisión. La señal $m(t)$ que sale de una fuente de información binaria se aplica al registro de desplazamiento de un codificador de longitud K . Después de cada desplazamiento del registro a la velocidad de datos de la fuente, el codificador genera dos bits de código, $c_1(t)$ y $c_2(t)$, que a su vez activan los moduladores de datos correspondientes. En la práctica, la separación entre las frecuencias centrales de esos moduladores de datos suele ser aproximadamente de 1 kHz. La salida combinada de los moduladores se aplica luego a un sistema de transmisión BLU en ondas decamétricas.

En condiciones de funcionamiento con diversidad de frecuencias, el sistema de la Fig. 1 adopta su forma más sencilla. Los bits de código son simples réplicas del bit de información, esto es, $c_1(t) = c_2(t) = m(t)$. La decisión sobre el valor de un bit de información determinado se basa en el valor combinado de las salidas de los dos demoduladores. En el contexto de una teoría de la información, la diversidad de frecuencias puede definirse como una técnica de codificación con una relación de 1/2 que utiliza decisiones programadas.

En las transmisiones con diversidad de frecuencias, sólo dos bits de código contienen información sobre cualquier bit de información dado. Con una probabilidad no nula, esos dos bits se pueden alterar simultáneamente a causa del desvanecimiento, la interferencia o el ruido, provocando una decisión incorrecta en el bit de información. Cuando esto sucede, no es posible corregir el error utilizando los valores de los otros bits de código. Así pues, resulta conveniente codificar la secuencia de información, de modo que más de un solo par de bits de codificación se relacione con cualquier bit de información determinado. El sistema de la Fig. 1 lo consigue estableciendo la correspondencia en la secuencia de información con anterioridad a la transmisión.

FIGURA 1
Estructura general con diversidad



D01

En la transmisión con diversidad de frecuencias codificadas podría utilizarse cualquier tipo de código de corrección de errores con relación de 1/2, pero los códigos convolucionales son particularmente adecuados porque la estructura de sus codificadores se adapta a la estructura de los sistemas de transmisión con diversidad de frecuencias, y puede utilizarse el algoritmo de Viterbi para llevar a cabo eficazmente la decodificación de decisiones programadas. Las salidas de los demoduladores se aplican a convertidores A/D en un decodificador de Viterbi, que sustituye la operación de combinación del sistema con diversidad de frecuencias.

3 Resultados experimentales

Se realizó una comparación del comportamiento de las transmisiones radioeléctricas con diversidad de frecuencias y con diversidad de codificación. Se eligieron códigos convolucionales de longitud impuesta $K = 5$ y $K = 7$, y el resultado del codificador se aplicó a un modulador multicanal MDF utilizando frecuencias centrales de 1 105 y 2 125 Hz y un desplazamiento de $\pm 42,5$ Hz. La velocidad de datos de cada canal síncrono era de 75 bit/s. La señal, en forma de ojo, de cada demodulador se digitalizó por medio de una muestra extraída del centro del periodo del ojo. El equipo radioeléctrico HF utilizado incluía un transmisor de 100 W, antenas de banda ancha y un receptor de comunicaciones sintetizado. Para los experimentos de recepción con diversidad se utilizó una combinación con relación máxima. Para los experimentos de codificación se utilizó un decodificador de Viterbi en tiempo real, aplicado en soporte lógico con un microprocesador polivalente de 8 bits.

En Ottawa se realizaron tres series de transmisión radioeléctrica: una prueba de corto alcance a lo largo de una distancia de 60 km, con una componente de onda de superficie débil; una prueba de alcance medio a lo largo de los 400 km que separan Ottawa de Toronto; y una tercera prueba a bordo de un barco que transmitía desde la costa Este del Canadá. El barco navegaba desde la ciudad de Quebec hacia el Ártico, lo que permitió realizar pruebas a lo largo de distancias que iban de 400 a 2 500 km. Durante la última parte de esta prueba el enlace HF atravesó el cinturón auroral y se registró frecuentemente un rápido desvanecimiento. En los experimentos a distancia corta y media se utilizaron varias frecuencias en el entorno de 3 a 9 MHz y en el experimento a bordo del barco se utilizaron bandas de frecuencia entre 5 y 15 MHz.

Se analizó la configuración de errores con diversidad de frecuencias y diversidad de codificación. Se observó que ambas series de datos presentaban las ráfagas características del canal HF; no obstante, en el caso de la diversidad, la transición entre las ráfagas y los periodos de menor proporción de errores era gradual. La mayor parte del tiempo los errores eran aleatorios, con frecuentes errores aislados. Los datos procedentes del sistema con diversidad de codificación presentaban ráfagas densas que empezaban y terminaban con relativa brusquedad, periodos exentos de errores más prolongados y ausencia de errores aislados y dobles. Las ráfagas de errores tendían a ser más prolongadas que las del sistema con diversidad de frecuencias. Después de una ráfaga prolongada el decodificador necesita cierto tiempo para recuperarse. De este modo, la proporción de bits erróneos en la secuencia decodificada podía en realidad ser mayor que la del sistema con diversidad de frecuencias en banda. No sucede lo mismo con la proporción de errores en los bloques.

Está previsto aplicar este sistema en un entorno con protocolo ARQ que impide la utilización de entrelazado o diversidad en el tiempo. Se ha demostrado que estos esquemas tienen como resultado una disminución de la proporción de bits erróneos, pero exigen retardos durante la transmisión del orden de varias centenas de bits. En las transmisiones por bloques, éstos se rechazan debido a errores aislados o múltiples, como sucede con la combinación de la diversidad de frecuencias, pero en el caso de la diversidad de codificación el rechazo de bloques disminuye al reducirse los errores aislados. Las pruebas se realizaron para bloques de 128 y 512 bits, que son los bloques característicos de un sistema que va a utilizar diversidad de codificación.

Se compararon las proporciones de errores en los bloques de esas dos técnicas, tal como se indica en el Cuadro 4. En el cuadro figura el aumento porcentual de la probabilidad de recibir un bloque libre de errores con la técnica con diversidad de codificación, en comparación con la técnica con diversidad de frecuencias. La mejora obtenida varió de buena a insignificante, y en el caso del bloque de 512 bits se observó una mejora más pronunciada. En algunos casos la propia transmisión con diversidad de frecuencias en banda estaba prácticamente libre de errores, por lo que no daba lugar a mejoras; en otros, el canal era de tan baja calidad que ninguno de los dos sistemas consiguió una proporción de errores de viabilidad práctica. Se observó que la calidad de funcionamiento de la codificación convolucional no fue en ningún momento apreciablemente inferior a la del sistema con diversidad de frecuencias en banda.

CUADRO 4

Resultados de las pruebas realizadas sobre proporción de errores en los bloques (BLER)

a) Tamaño del bloque = 128 bits

N.º de prueba	Longitud impuesta	Diversidad BLER	Codificación BLER	Total de bits	Porcentaje de mejora (%)
1	$K = 7$	0,293	0,201	1 430 000	13,0
2	$K = 7$	0,217	0,127	506 000	11,5
3	$K = 5$	0,321	0,227	352 000	13,8
4	$K = 7$	0,084	0,015	217 000	7,5
5	$K = 7$	0,083	0,019	217 000	6,5

b) Tamaño del bloque = 512 bits

N.º de prueba	Longitud impuesta	Diversidad BLER	Codificación BLER	Total de bits	Porcentaje de mejora (%)
6	$K = 7$	0,548	0,406	1 430 000	31,4
7	$K = 7$	0,378	0,223	506 000	24,9
8	$K = 5$	0,570	0,420	352 000	34,9

4 Consideraciones relativas a la realización

La técnica de codificación descrita en la presente Recomendación tiene un número de limitaciones prácticas y no sustituirá en todas sus aplicaciones a un combinador polivalente con diversidad de frecuencias. Por ejemplo, es incompatible con los sistemas de transmisión de datos asíncronos.

No obstante, puede ser útil con los sistemas ARQ que utilizan transmisiones síncronas, a condición de que las transmisiones no sean de duración tan corta, que anule la mejora en el caudal mediante un aumento de los bits de cabecera que se requieren para el funcionamiento adecuado del decodificador de Viterbi. La cabecera es de cuatro veces los K bits (donde K es la longitud impuesta) necesaria al comienzo de la transmisión, y por último hay una secuencia final de transmisión de $K - 1$ bits.

5 Conclusiones

Se ha ensayado un método de control de errores basado en la diversidad de frecuencias con codificación convolucional y se ha comparado con una transmisión de datos con diversidad de frecuencias en banda. Los resultados experimentales demuestran que este sistema tiene una proporción de errores en los bloques mejor que la de los sistemas con diversidad de frecuencias en banda. La técnica de codificación es adecuada para sistemas que actualmente utilizan diversidad de frecuencias en combinación con un protocolo ARQ síncrono.