

RECOMENDACIÓN UIT-R F.763-3*

**TRANSMISIÓN DE DATOS POR CIRCUITOS DE ONDAS DECAMÉTRICAS
QUE UTILIZAN MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE**

(Cuestión UIT-R 145/9)

(1992-1994-1995-1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que hay una demanda creciente de transmisión de datos a alta velocidad;
 - b) que para satisfacer esta demanda pueden utilizarse dos tipos de módems de modulación por desplazamiento de fase (MDP), en particular, los módems de transmisión en paralelo que utilizan telegrafía armónica multicanal y los módems de transmisión en serie que utilizan una sola subportadora;
 - c) que para compensar la naturaleza desfavorable del medio de transmisión, se dispone de las siguientes técnicas para ambos tipos de módem;
 - diversas formas de explotación por doble diversidad, con inclusión de emisiones de banda lateral única (BLU) separadas o de una sola emisión de banda lateral independiente (BLI);
 - codificación de detección y corrección de errores combinable con entrelazado en el tiempo;
 - velocidades de datos variables para adaptar el sistema a la capacidad de canales;
- y, para los módems de transmisión en paralelo únicamente:
- varios niveles de diversidad de frecuencias dentro de la banda;
 - introducción de tiempos de guarda entre tramas para combatir la distorsión por propagación por trayectos múltiples y el retardo de grupo,

recomienda

- 1** que para la transmisión de datos a velocidades binarias de hasta 2 400 bit/s mediante sistemas con MDP y multiplexaje por división de frecuencia (MDF), se de preferencia al sistema descrito en el Anexo 1;
- 2** que para la transmisión de datos a velocidades binarias de hasta 3 600 bit/s utilizando módems de transmisión en serie, se dé preferencia al sistema descrito en el Anexo 2;
- 3** que para otras informaciones sobre la MDP en general, se consulte el Anexo 3;
- 4** que en el Anexo 4 se describen los sistemas de diversidad de modo/polarización destinados a mejorar la calidad de funcionamiento de los sistemas con MDP en ondas decamétricas.

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de la Comisión de Estudio 8 de Radiocomunicaciones.

Transmisión de datos a 2 400/1 200/600/300/150/75 bit/s por circuitos de ondas decamétricas que utilizan telegrafía armónica multicanal y MDP

1 Descripción del sistema

1.1 Un terminal de recepción/transmisión del sistema, se compone de:

- un transmisor y un receptor de información digital (por ejemplo, un computador);
- un módem cuya función primaria es la conversión de información digital en analógica compatible con la entrada de un transmisor radioeléctrico, y la conversión de la información analógica a la salida de un receptor radioeléctrico en datos digitales compatibles con la entrada del receptor digital.

Este módem desempeña asimismo diversas funciones de codificación y efectúa la combinación de diversidad;

- un equipo de recepción y de transmisión de radiofrecuencia (RF) conectado a las antenas.

1.2 En el lado transmisión, el flujo de datos de entrada a 2 400 bit/s se introduce en un convertidor serie-paralelo. A intervalos de 32 bits (es decir, intervalos de 13,33 ms) el contenido de este convertidor se transfiere en paralelo a un dispositivo de memoria de 32 bits, cuya salida está conectada a un modulador con MDP-4.

El módem genera en transmisión una señal de audio compuesta, formada por un conjunto de 18 tonos en la banda 300-3 000 Hz.

De estos tonos, dieciséis tienen una separación de 110 Hz (935 a 2 585 Hz), y están modulados en MDP-4 CD (modulación por desplazamiento de fase cuadrivalente con codificación diferencial), cada uno a una velocidad binaria de 75 Bd lo que permite una velocidad de datos de $16 \times 75 \times 2 = 2\,400$ bit/s.

El tono de 605 Hz se utiliza para la corrección de los errores de frecuencia de extremo a extremo, incluido cualquier efecto Doppler. El tono 2 915 Hz (u 825 Hz) se emplea para la sincronización del sistema.

El combinador de doble diversidad puede aceptar entradas tanto de dos receptores que funcionen en el modo de diversidad de espacio, frecuencia o polarización como de un receptor que funcione en el modo de BLI.

Cuando la velocidad de datos es un submúltiplo de la velocidad de transmisión, pueden emplearse diversas formas de diversidad dentro de la banda. Por ejemplo, una velocidad de 1 200 bit/s permite diversidad doble ($1\,200 \times 2$), una velocidad de 600 bit/s diversidad cuádruple (600×4) y así sucesivamente, siempre con una velocidad de transmisión de 2 400 bit/s. La utilización de la máxima diversidad posible, tanto dentro de banda como entre canales independientes, resulta así posible en función de la velocidad de transmisión de datos elegida. Se prevén 75/150/300/600/1 200 bit/s.

Además de la una elección de la explotación codificada/decodificada con velocidad de datos y modo de diversidad seleccionables, este módem también permite el establecimiento del intervalo de entrelazado, asegurando así el sistema de comunicación flexible que se resume en el Cuadro 1.

La señal de transmisión se compone de tramas cuya duración es 13,33 ms. Esta duración incluye un tiempo de guarda (4,2 ms) que se introduce con objeto de compensar los efectos de la propagación por trayectos múltiples.

El módem utiliza dos técnicas para reducir la degradación de la señal debida, en particular, al ruido impulsivo y al desvanecimiento por interferencia:

- codificación y corrección de errores;
- entrelazado en el tiempo.

Se utiliza una forma de código de bloques cíclico, BCH (16,8). Las palabras de código BCH están almacenadas en una memoria para ser extraídas durante el proceso de entrelazado. El entrelazado se obtiene considerando:

- el primer bit de la última palabra almacenada;
- el segundo bit de la «(m) palabra almacenada precedentemente»;
- el tercer bit de la «(2 m) palabra almacenada precedentemente» ...;
- el 16 bit de la «(15 m) palabra almacenada precedentemente».

CUADRO 1

Velocidades de datos/modos (elegibles independientemente para transmisión y recepción)

Velocidad de datos (bit/s)	Modos no codificados			Modos codificados			
	Modos de diversidad			Dispersión de tiempo disponible para el entrelazado en el tiempo (transmisor y receptor) (s)	Modos de diversidad adicionales		
	Dentro de banda	Canal	Total		Dentro de banda	Canal	Total
2 400 1 200	– ×2	×2 ×2	×2 ×4	0-12,8	–	×2	×2
600 300	×4 ×8	×2 ×2	×8 ×16	0-25,6 0-51,2	×2 ×4	×2 ×2	×4 ×8
150 75	×16	×2	×32	0-102,5 0-205	×8 ×16	×2 ×2	×16 ×32

El nivel de entrelazado (m palabras de código) se puede escoger, según las condiciones de propagación del trayecto radioeléctrico, desde 0 (ausencia de entrelazado), 1, 2, 4, 8, 16, 32 ó 64, correspondiendo a un retardo de recepción de datos que varía entre unos pocos milisegundos y decenas de segundos. Como los bits erróneos no pertenecen a la misma palabra codificada, se consigue una mejor protección contra las ráfagas de errores.

En la Fig. 1, el rendimiento del módem en presencia de ruido gaussiano, se presenta en términos de probabilidad de bits erróneos, P_e , en función de la relación señal/ruido, S/N , en modos con codificación o sin codificación, en una anchura de banda de 250 a 3 000 Hz.

Los efectos de la codificación son más acusados para valores elevados de la relación S/N .

Las curvas se obtuvieron mediante un montaje de prueba en el que una secuencia de prueba excita el módem para producir tonos de audiofrecuencia. La salida del módem se sumaba con un ruido gaussiano, se filtraba y se aplicaba a la entrada en recepción de otro módem, del que se retiraba a la salida la secuencia de prueba. Esta secuencia de prueba se introducía a continuación en un analizador de errores de datos para determinar la proporción de bits erróneos (BER).

La Fig. 2 muestra los resultados de una simulación por computador del rendimiento del módem en un canal con desvanecimiento.

Se simuló un canal con desvanecimiento en el que dos trayectos de igual amplitud llevaban señales separadas por un retardo multitrayecto de 1 ms, y cuyas frecuencias diferían en 1 Hz, para obtener desvanecimientos que pasaran por la banda de paso, en vez de permanecer en ciertas frecuencias fijas.

En la Fig. 2 puede verse que el rendimiento se mejora utilizando una combinación de los diversos tipos de técnicas de diversidad (dentro de banda y fuera de banda), códigos de corrección de errores y técnicas de entrelazado para velocidades binarias de 600, 1 200 y 2 400 bit/s.

El módem está actualmente en utilización experimental en un enlace por ondas decamétricas entre dos estaciones radioeléctricas situadas en el centro y sur de Italia separadas entre sí unos 800 km (500 millas).

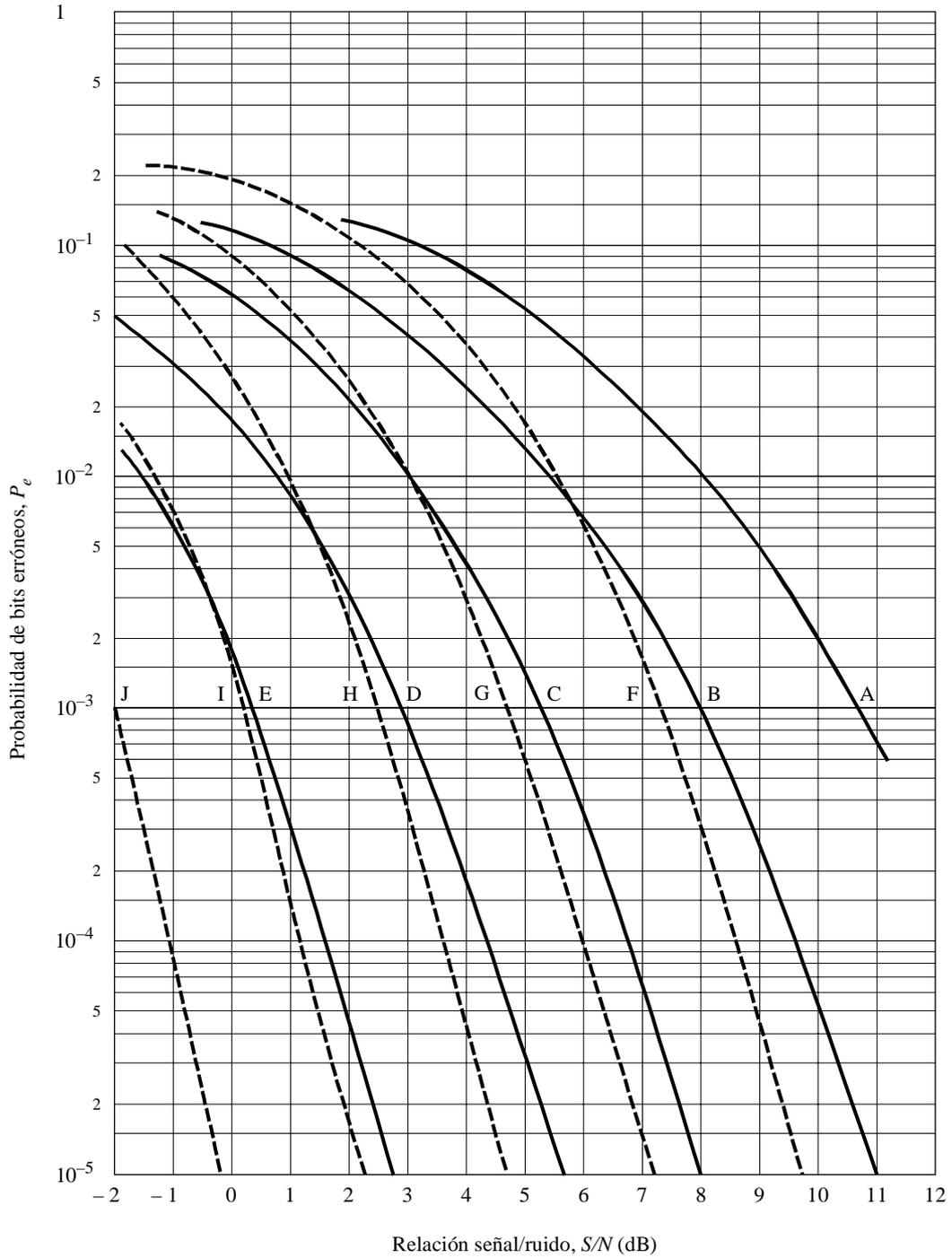
1.3 El equipo RF efectúa, en transmisión, operaciones relativas a la modulación de canal y produce una emisión que tiene características de frecuencia y potencia radioeléctricas adecuadas. Operaciones inversas de conversión de frecuencias se llevan a cabo en recepción para obtener la señal audio compuesta que ha de enviarse al módem.

El equipo RF tiene las siguientes características particulares:

- fluctuación de fase: inferior a 5° para un intervalo de tiempo de 10 ms (100 muestras);
- distorsión por retardo de grupo: 500 μs en transmisión, 500 μs en recepción;
- intermodulación: 36 dB por debajo de la potencia en la cresta de la envolvente.

FIGURA 1

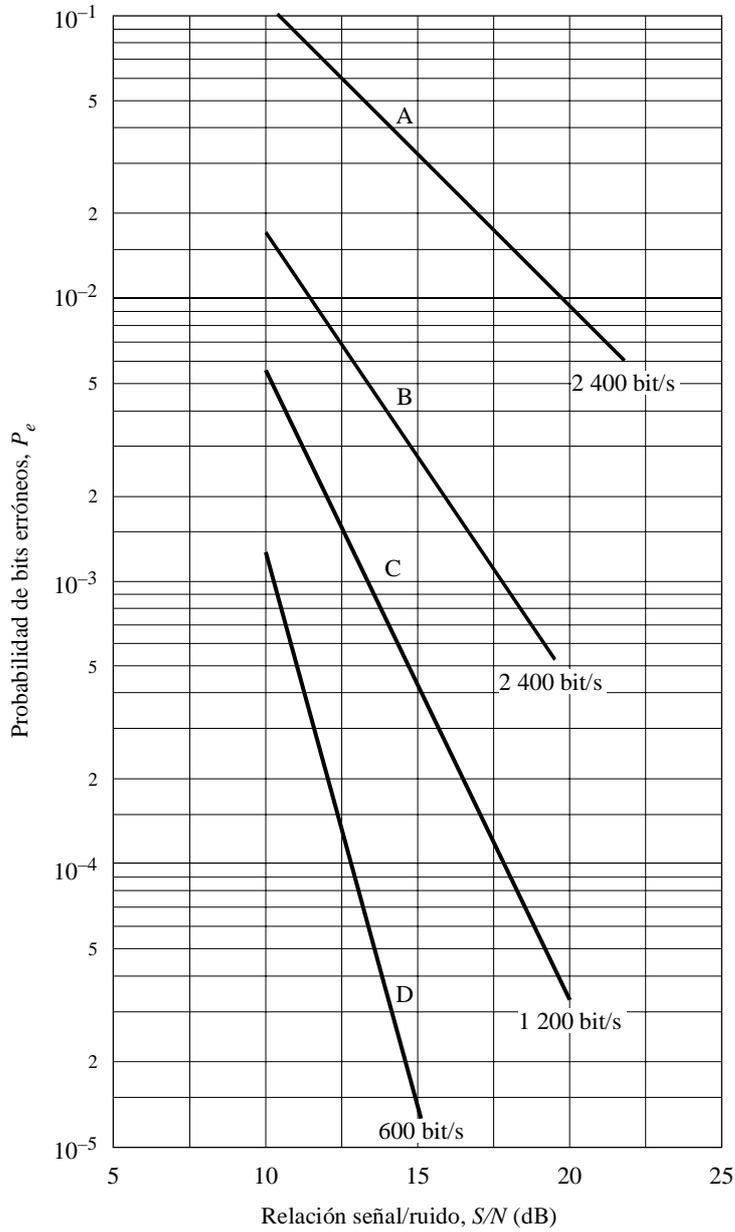
Probabilidad de bits erróneos en función de la relación S/N para varias velocidades binarias, en modos con codificación y sin codificación, utilizando la técnica de diversidad dentro de banda, para un canal sin desvanecimiento con ruido gaussiano



Sin codificación	—	{	A: 2 400 bit/s	Con codificación sin entrelazado	- - -	{	F: 1 200 bit/s
			B: 1 200 bit/s				G: 600 bit/s
			C: 600 bit/s				H: 300 bit/s
			D: 300 bit/s				I: 150 bit/s
			E: 150 bit/s				J: 75 bit/s

FIGURA 2

Probabilidad de bits erróneos en función de la relación S/N en el caso de un canal con desvanecimiento selectivo, para las velocidades binarias de 600, 1 200 y 2 400 bit/s en los siguientes casos



- A: Sin diversidad
- B: Diversidad fuera de banda únicamente
- C: Diversidad fuera y dentro de banda
- D: Diversidad fuera y dentro de banda y utilización de códigos correctores de errores y entrelazado

Transmisión de datos a velocidades binarias de hasta 3 600 bit/s por circuitos de ondas decamétricas que utilizan módems de transmisión serie

1 Generalidades

El módem permite transmitir datos por un canal de ondas decamétricas a 3 kHz. El módem recibe y reconstituye los datos digitales a una velocidad de $\leq 3\,600$ bit/s y genera una señal de audiofrecuencia analógica dentro de la banda audio de 300-3 300 Hz.

Incorpora una protección contra la propagación por trayectos múltiples, el efecto Doppler y el desvanecimiento.

2 Modos de funcionamiento del módem

Hay tres modos de funcionamiento posibles.

2.1 Modo semidúplex con corrección de errores sin canal de retorno (FEC)

2.1.1 Este modo utiliza MDP M -valente ($M = 2, 4, 8$) (MDPM) a 2 400 Bd, con una velocidad binaria de usuario de 75, 150, 300, 600, 1 200, 2 400 ó 3 600 bit/s (no todas las velocidades binarias pueden utilizarse con todas las formas de onda) y con tramas de 256 símbolos modulados (de los cuales 128 son símbolos de usuario), es decir, de 106,6 ms.

2.1.2 El intercambio de datos consta de tres fases, a saber, preámbulo, tráfico y fin de transmisión:

FIGURA 3

Descripción de la comunicación en modo FEC

Preámbulo	Tráfico (datos)	Fin de transmisión
-----------	-----------------	--------------------

0763-03

La fase de preámbulo permite al módem llamado detectar la llamada y recibir los parámetros técnicos (codificación, entrelazado, velocidad de datos, modulación) que necesita para el resto de la transmisión. En la fase de tráfico se transmiten los datos. La fase de fin de transmisión permite al módem llamado detectar una palabra de fin de mensaje con miras a terminar el enlace y volver a la condición de espera de tráfico.

El fin de transmisión tiene lugar cuando el módem llamante transmite tramas en la condición «colgado». Estas tramas son similares a las tramas de preámbulo, pero contienen un bit con la información de la condición «colgado».

2.1.3 Las funciones son las siguientes:

- *Emisión:*
 - codificación y entrelazado de datos;
 - entramado y modulación;
 - transmisión de señales de audiofrecuencia.
- *Recepción:*
 - recepción de señales de audiofrecuencia;
 - detección de la sincronización;
 - demodulación de la señal recibida;
 - desentrelazado y decodificación de datos.

2.2 Modo totalmente dúplex con FEC

Este modo es equivalente a dos enlaces semidúplex independientes de tipo FEC. Se envía en ambos sentidos un preámbulo seguido por los datos y una palabra de fin de mensaje, que el módem llamado reconoce. Como en el modo semidúplex FEC, este preámbulo especifica los parámetros técnicos que van a seguir.

2.3 Modo de corrección de errores con canal de retorno (ARQ)

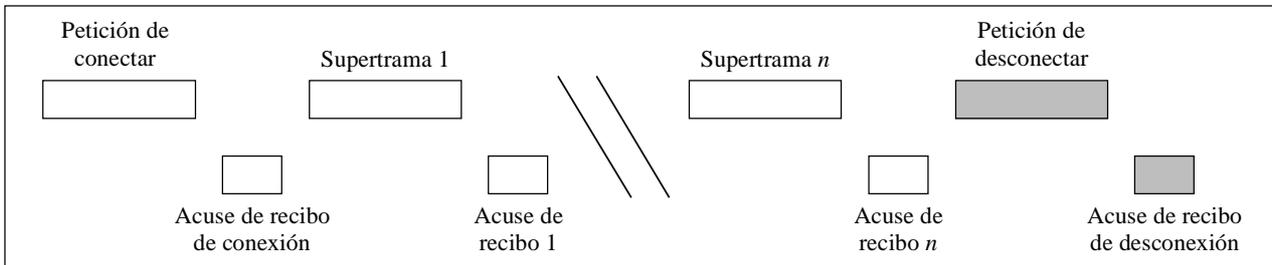
2.3.1 Este modo utiliza modulación MDP- M ($M = 2, 4, 8$) a 2 400 Bd, con una velocidad binaria de usuario de 600, 1 200, 1 800 ó 2 400 bit/s (no todas las velocidades binarias pueden utilizarse con todas las formas de onda), con tramas de 256 símbolos modulados (de los cuales 128 son símbolos de usuario), es decir, de 106,6 ms.

2.3.2 El modo ARQ es un modo de transmisión de datos que entraña una repetición selectiva por bloque. Los datos que se han de transmitir se dividen en bloques correspondientes a una trama de módem. El módem llamante envía una supertrama de N bloques (N es nominalmente igual a 64, pero puede ser menor durante la transmisión de los últimos datos) y espera que el módem llamado acuse recibo de la misma.

Si algún bloque no se recibe correctamente, éste se retransmite en la supertrama siguiente, que está formada de nuevos bloques.

Las fases de este modo son: establecimiento de llamada (conexión), transmisión de datos y fin de transmisión (desconexión). Además, el modo ARQ permite la desconexión momentánea, la conmutación llamante/llamado, el control de flujo y el control adaptable de la potencia, la velocidad de datos y la frecuencia.

FIGURA 4
Descripción de la comunicación en modo ARQ



0763-04

El modo ARQ consta, pues, de dos fases distintas, a saber: una fase de transmisión (transmisión de una supertrama por el extremo llamante y de un acuse de recibo por el extremo llamado) y una fase de recepción (recepción de un acuse de recibo en el extremo llamante y de una supertrama en el extremo llamado).

2.3.3 Control adaptable

2.3.3.1 El modo ARQ permite el control adaptable de la potencia, la velocidad de datos y la frecuencia. De éstas, el módem sólo controla totalmente la velocidad binaria adaptable. En el caso del control de potencia, el módem indica al sistema la adaptación que se ha de efectuar y continúa la transmisión, y en el caso del control de frecuencia el módem se desconecta momentáneamente tras indicar al sistema la necesidad de encontrar una nueva frecuencia.

2.3.3.2 El procedimiento de control adaptable de potencia se basa en mediciones estadísticas de la calidad del enlace. El aumento de la potencia adaptable se realiza con mucha rapidez, pero su disminución está sujeta a una gran constante de tiempo.

2.3.3.3 El control adaptable de la velocidad de datos se efectúa en tres de las velocidades de datos elegidas entre las cuatro disponibles, a saber: 2 400, 1 800, 1 200 y 600 bit/s.

Los aumentos adaptables de la velocidad de datos se basan en mediciones estadísticas de la calidad del enlace, mientras que las reducciones de dichas velocidades se basan ya sea en la medición estadística de la calidad del enlace o bien en la no recepción de datos o acuses de recibo durante la transmisión.

2.3.3.4 Si la disminución de la velocidad de datos efectuada por el control adaptable no es suficiente para continuar la transmisión, se pide al sistema que aplique el control de frecuencia adaptable.

Para que se pueda buscar una nueva frecuencia, el módem se desconecta momentáneamente y queda en espera de reanudar la transmisión, almacenando los datos que aún no se hayan transmitido.

2.3.3.5 Es posible ajustar el módem en modo ARQ de tal modo que no aplique el control adaptable de velocidad de datos. En tal caso sólo se aplican el control de frecuencia y el control de potencia.

2.3.4 Las funciones son las siguientes:

- *Envío por el extremo llamante:*
 - segmentación de datos,
 - codificación de datos,
 - entramado y modulación,
 - transmisión de señales de audiofrecuencia.
- *Envío por el extremo llamado:*
 - codificación de acuses de recibo,
 - entramado y modulación,
 - transmisión de señales de audiofrecuencia.
- *Recepción en el extremo llamante:*
 - recepción de señales de audiofrecuencia,
 - detección de la sincronización,
 - demodulación de la señal recibida,
 - decodificación de acuses de recibo.
- *Recepción en el extremo llamado:*
 - recepción de señales de audiofrecuencia,
 - detección de la sincronización,
 - demodulación de la señal recibida,
 - decodificación de datos,
 - reensamblado de datos.

3 Características técnicas del módem

3.1 Modulación

3.1.1 La técnica de modulación entraña el desplazamiento de fase de una subportadora cuya frecuencia es de 1 800 Hz. La velocidad de modulación es 2 400 Bd, con una precisión mínima de 10^{-5} .

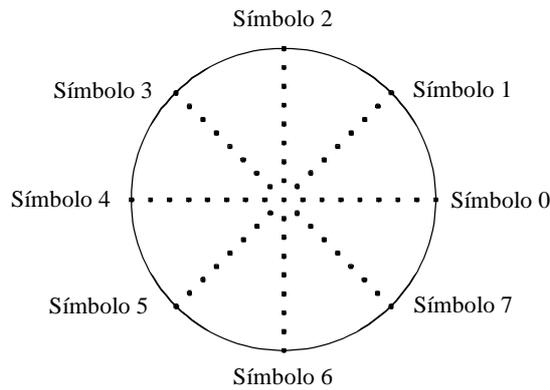
3.1.2 La estabilidad del reloj asociado con la generación de 1 800 Hz es de 10^{-5} .

3.1.3 El desplazamiento de fase de la señal modulada en relación con la subportadora de referencia no modulada puede tomar uno de los siguientes valores:

Número de símbolo	Fase
0	0
1	$\pi/4$
2	$\pi/2$
3	$3\pi/4$
4	π
5	$5\pi/4$
6	$3\pi/2$
7	$7\pi/4$

El número de símbolo n está asociado al número complejo $\exp(jn\pi/4)$.

FIGURA 5
Codificación de los estados de fase



0763-05

3.2 Transcodificación

La transcodificación es una operación en virtud de la cual el símbolo que se ha de transmitir se asocia a un grupo de dígitos binarios.

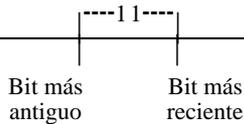
3.2.1 Velocidad de datos de 1 200 bit/s: MDP-2

La transcodificación se efectúa asociando un símbolo a un dígito binario, de conformidad con la siguiente regla:

Bit	Símbolo
0	0
1	4

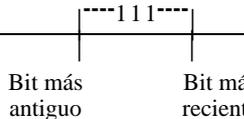
3.2.2 Velocidad de datos de 2 400 bit/s: MDP-4

La transcodificación se efectúa asociando un símbolo a un conjunto compuesto de dos dígitos binarios consecutivos, de conformidad con la siguiente regla:

Dibit	Símbolo
00	0
01	2
10	6
	4

3.2.3 Velocidad de datos de 3 600 bit/s: MDP-8

La transcodificación se efectúa asociando un símbolo a un conjunto compuesto de tres dígitos binarios consecutivos, de conformidad con la siguiente regla:

Tribit	Símbolo
000	1
001	0
010	2
011	3
100	6
101	7
110	5
	4

3.3 Estructura de trama

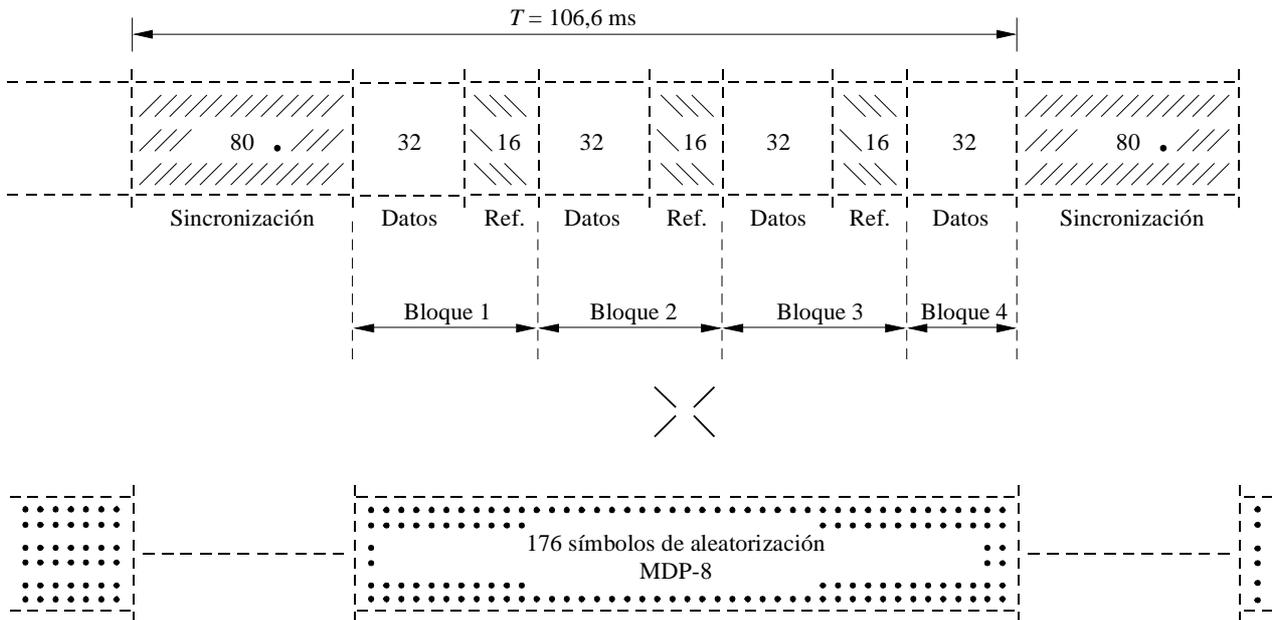
3.3.1 Los símbolos que se han de transmitir se estructuran en tramas recurrentes de una longitud de 106,6 ms. El número de dígitos binarios transmitidos por trama es de 128 bits a 1 200 bit/s, 256 bits a 2 400 bit/s y 384 bits a 3 600 bit/s.

3.3.2 Una trama está formada por 256 símbolos, de la siguiente manera: 80 símbolos para sincronización, 48 símbolos de referencia y 128 símbolos de datos.

En la Fig. 6 se ilustra la estructura de trama.

3.3.3 La secuencia de sincronización se transmite con MDP-2, a una velocidad de modulación de 2 400 Bd. El módem la utiliza para detectar la presencia de señal y corregir el desplazamiento de frecuencia debido al efecto Doppler o a la diferencia entre las portadoras transmisora y receptora, la sincronización de bits y ya sea el tiempo de igualación en el caso de igualación por filtrado recursivo o la evaluación del canal de ondas decamétricas en el caso de la detección por el método de máxima probabilidad.

FIGURA 6
Estructura de trama



0763-06

3.3.4 Los símbolos de referencia y de datos se estructuran en cuatro bloques; los tres primeros comprenden 32 símbolos de datos seguidos de 16 símbolos de referencia, y el último bloque contiene 32 símbolos de datos. Todos los símbolos de referencia corresponden al símbolo número 0.

Esos 176 símbolos de referencia y de datos se aleatorizan con una secuencia de aleatorización de 176 símbolos que se repite cada 106,6 ms. Esta secuencia se transmite con MDP-8 a la velocidad de 2 400 Bd. Por lo tanto, es posible crear una trama con ocho estados de fase, cualquiera que sea la velocidad de datos (1 200, 2 400 ó 3 600 bit/s).

La operación de aleatorización consiste en sumar en módulo 8, el número de símbolo asociado a los datos al número de símbolo asociado a la aleatorización, lo que equivale a una multiplicación compleja del símbolo de datos por el símbolo de aleatorización.

3.4 Codificación de corrección de errores y entrelazado

La utilización de codificación de corrección de errores junto con un entrelazado adecuado puede mejorar considerablemente la BER.

Sobre la base de los tres modos de base sin redundancia, a saber:

- MDP-8 a 3 600 bit/s;
- MDP-4 a 2 400 bit/s; y
- MDP-2 a 1 200 bit/s;

la codificación permite introducir diversas posibilidades de redundancia.

3.4.1 Modo FEC

Este modo entraña una codificación convolucional junto con entrelazado, que también es convolucional. El código convolucional utilizado es el código 2 redundante con una longitud de restricción $K = 7$, asociado con las características polinómicas 171,133 (representación octal).

Las redundancias inferiores a 2 se obtienen mediante «perforación», y las redundancias superiores a 2 se obtienen por repetición.

Entre las diversas posibilidades, cabe mencionar las siguientes:

Velocidad de datos con codificación (bit/s)	Forma de onda	Redundancia	Método para obtener esta velocidad de codificación
2 400	MDP-8	3/2	Conversión de velocidad de datos 1/2 en velocidad de datos 2/3
1 200	MDP-4	2	Código no modificado a la velocidad de datos 1/2
600	MDP-2	2	Código no modificado a la velocidad de datos 1/2
300	MDP-2	4	Código a la velocidad de datos 1/2 repetido 2 veces
150	MDP-2	8	Código a la velocidad de datos 1/2 repetido 4 veces
75	MDP-2	16	Código a la velocidad de datos 1/2 repetido 8 veces

3.4.2 Modo ARQ

Se utiliza codificación Reed-Solomon (RS), y no hay entrelazado.

Velocidad de datos con codificación (bit/s)	Forma de onda	Redundancia	Codificación (símbolos de 8 bits)
2 400	MDP-8	3/2	RS (48,32)
1 800	MDP-4	4/3	RS (32,24)
1 200	MDP-4	2	RS (32,16)
600	MDP-4	4	RS (32,8)

3.5 Espectro de la señal modulada

En la Fig. 7 se muestra el espectro de la señal modulada después del filtrado y la transposición a 1 800 Hz. La anchura de banda total es de 3 000 Hz.

3.6 Tolerancia al error de frecuencia entre las portadoras de transmisión y recepción en ondas decamétricas

El módem debe tolerar un desplazamiento de ± 75 Hz entre las portadoras de transmisión y recepción en ondas decamétricas (incluido el error de frecuencia receptor/transmisor y el efecto Doppler) y una tasa de variación de frecuencia de 3,5 Hz/s como máximo.

4 Interfaces con otros equipos

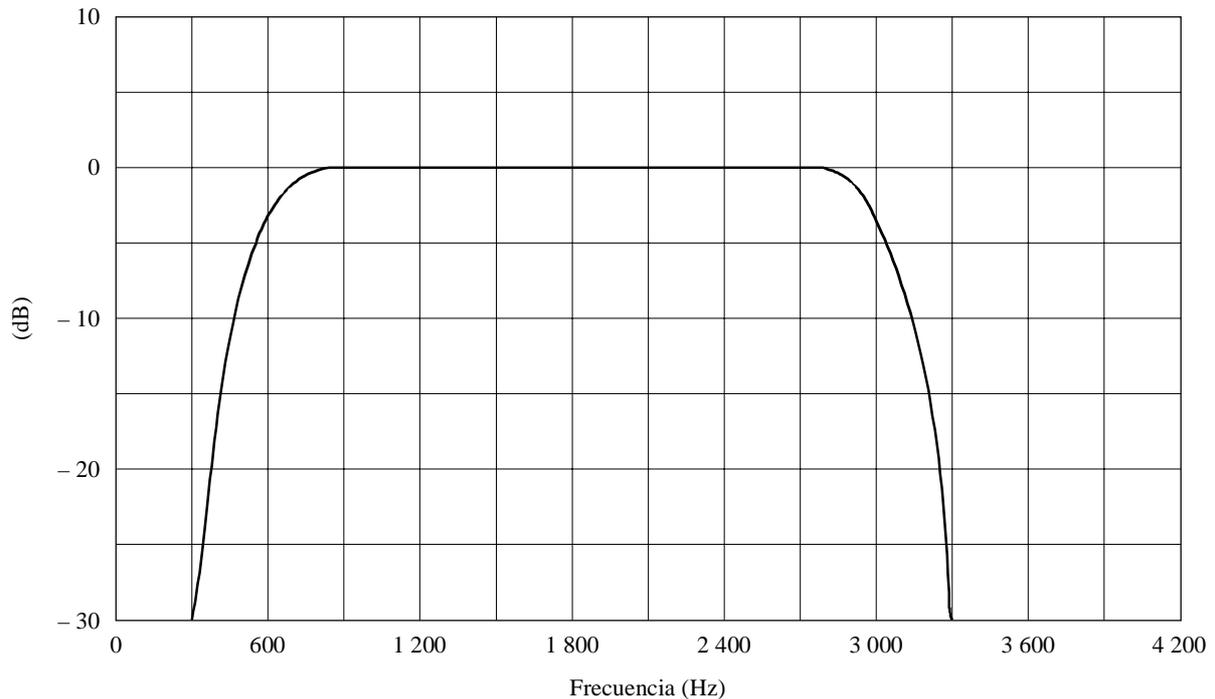
4.1 Interfaz del módem con el terminal de datos

Esta interfaz se ajusta a la Recomendación UIT-T V.24, y las características eléctricas de la interfaz se ajustan a la Recomendación UIT-T V.11 (RS 422).

4.2 Interfaz del módem con el transmisor y el receptor

Los circuitos de entrada y salida del módem son de tipo simétrico con respecto a tierra, con una impedancia de 600 Ω a 0 dBm.

FIGURA 7
Espectro de la señal modulada



0763-07

4.3 Calidad de funcionamiento de los transmisores y receptores asociados

Para obtener una calidad de funcionamiento óptima se recomienda utilizar transmisores y receptores con las siguientes características:

4.3.1 Deben tener una banda de paso tal que, entre 300 Hz y 3300 Hz, las variaciones de la pérdida de transmisión sean como máximo de ± 2 dB.

NOTA 1 – Un módem serie puede funcionar con una anchura de banda del sistema de 300 a 3000 Hz con características de calidad reducidas. Serían necesarios estudios ulteriores para diseñar un módem serie con una subportadora de 1650 Hz que funcione con sistemas de anchura de banda reducida.

4.3.2 El retardo de grupo no debe variar más de 0,5 ms en el 80% de esta banda de paso.

4.3.3 La precisión de las frecuencias piloto del transmisor y el receptor debe ser por lo menos 10^{-6} .

4.3.4 La constante de tiempo del circuito de control automático de ganancia (CAG) debe ser inferior a 10 ms para la desensibilización e inferior a 25 ms para la resensibilización.

ANEXO 3

Sistemas de transmisión que utilizan la MDP

1 Introducción

La información de los canales de transmisión en ondas decamétricas a velocidades binarias por encima de 200 bit/s se transmite normalmente utilizando métodos de estados múltiples y señales complejas. Ello implica generalmente una combinación de subportadoras ortogonales con desplazamiento de frecuencia y MDP-2. Con esta última técnica, puede obtenerse una velocidad binaria doble de la MDF en la misma banda de frecuencias y puede utilizarse la redundancia para aumentar la inmunidad al ruido. Aparte de la MDP multifrecuencia, existe un interés práctico por un tipo más

general de modulación – la MDP generalizada –, en la que la información que se transmite va contenida no en las diferencias entre las fases instantáneas de las señales senoidales, sino en la diferencia entre los espectros de fase de señales ortogonales complejas. Los espectros de amplitud de dichas señales coinciden y pueden adaptarse con la característica de frecuencia del canal (o con el espectro de interferencia) sin violar las condiciones de ortogonalidad mutua. Sobre esta base, es posible considerar la fabricación de módems adaptables con una inmunidad al ruido o capacidad de tráfico superiores.

La aplicación práctica de la MDP generalizada se ha visto limitada en el pasado por las conocidas dificultades que entraña la síntesis y el proceso de señales complejas. Los problemas básicos se han resuelto actualmente gracias a la nueva teoría desarrollada, y la disponibilidad de módulos de microelectrónica con un alto grado de integración, que ha eliminado el obstáculo de la complejidad técnica de los circuitos. Este Anexo establece los principios principales que rigen el diseño de los módems para la MDP generalizada, describe una variante que se ha desarrollado y ofrece una serie de resultados de prueba.

2 Cuestiones teóricas

2.1 Selección de señales

Tal como ha señalado Shannon, para lograr una velocidad de transmisión igual a la capacidad de comunicación en canales con una característica de frecuencia $Y(\omega)$ y un ruido gaussiano $N(\omega)$, se han de utilizar señales caracterizadas por un proceso gaussiano en régimen estacionario con una potencia P y un espectro de potencia de:

$$F(\omega) = \begin{cases} B - \frac{Y(\omega)}{N(\omega)} & \text{para } \omega \in \Omega \\ 0 & \text{para } \omega \notin \Omega \end{cases} \quad (1)$$

en la que la gama de integración Ω viene determinada por la condición $F(\omega) \geq 0$ y la constante B depende de la potencia de las señales. Como en la práctica, hay siempre normas que rigen los límites admisibles para el retardo de la información a transmitir, la duración máxima de la señal y el número de señales tienen que estar limitados. En estas condiciones, pueden considerarse sistemas cercanos al óptimo las combinaciones con dimensiones finitas de señales ortogonales determinadas en las cuales el cuadrado del módulo de la densidad espectral coincide con $F(\omega)$. No obstante, de la ecuación (1) se deduce que $F(\omega) = 0$ a todas las frecuencias, siendo $B < Y(\omega)/N(\omega)$, es decir, que se ha de mantener la ortogonalidad cuando se rechazan partes individuales del espectro. Las señales multifrecuencia utilizadas en los módems actuales no poseen esta propiedad. Además, la forma del espectro ortogonal es óptima únicamente para canales que tienen una característica de frecuencia plana y una interferencia de tipo de ruido blanco. Los cálculos muestran que cuando no se cumplen estas condiciones puede haber pérdidas de la velocidad de transmisión de la información de hasta el 40% de la capacidad de comunicación del canal.

Otro criterio para evaluar el grado óptimo de las combinaciones de señales ortogonales es el requisito relativo a la forma de su función de autocorrelación. Por ejemplo, para asegurar la estabilidad en el funcionamiento de un sistema de sincronización, el lóbulo principal de esta función tiene que ser suficientemente estrecho y los lóbulos laterales no exceder un nivel determinado. En este caso, la ortogonalidad mutua debe asegurarse para un espectro de amplitud de la señal de terminado que no satisface necesariamente la condición (1).

A la vista de lo anterior, para lograr la MDP generalizada, se ha desarrollado una clase especial de señales basada en la utilización de sistemas complejos de funciones con doble ortogonalidad. Sus densidades espectrales pueden representarse de la siguiente manera:

$$S_k(\omega) = |S(\omega)| e^{j[K\psi(\omega) + \alpha(\omega)]} \quad (2)$$

donde:

$$|S(\omega)|^2 = A \left| \frac{d\psi(\omega)}{d\omega} \right|$$

donde:

A : factor constante

$\alpha(\omega)$: función con límites arbitrarios.

Por tanto, para un espectro de amplitud determinado, es posible definir el espectro de fase de las señales y con ello, su densidad espectral. Una nueva síntesis implica la determinación de muestras de densidades espectrales con números de serie distintos y la transformación de estas muestras temporales utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT). La

síntesis de las señales puede combinarse con la codificación de dichas señales en el ámbito temporal, utilizando el código de Reed-Solomon; a estos efectos, ha de añadirse previamente una serie de muestras cero a las muestras de la densidad espectral y sólo entonces puede aplicarse la FFT. Hay que señalar que este tipo de codificación mixta (ortogonal en el ámbito de frecuencia y con el código Reed-Solomon en el ámbito temporal) obtiene la máxima eficacia para los canales de transmisión en ondas decamétricas.

2.2 Selección de un algoritmo de proceso

En el caso de los métodos de estados múltiples para la transmisión de información, es mejor procesar las señales que se recibirán utilizando el algoritmo óptimo para la recepción «en conjunto». La forma más sencilla de realizar dicho algoritmo es mediante los demoduladores de componentes; para ello, han de cumplirse las condiciones siguientes:

- las señales de estados múltiples tienen que ser señales de tipo de componentes, es decir, tienen que estar formadas por la suma de señales elementales;
- cada señal elemental debe contener información sobre el elemento correspondiente de una palabra de código $b_{i,k}$;
- las interferencias que afectan a las señales elementales deben ser mutuamente independientes.

En este caso, el criterio de decisión es el siguiente:

$$\text{máx} \left[L_i = \sum_{k=1}^N e_{i,k} y_k \right] \quad (3)$$

donde:

$e_{i,k}$: coeficiente de signo que adopta el valor +1 cuando $b_{i,k} = 1$ y
-1 cuando $b_{i,k} = 0$

$$y_k = \ln \frac{W(Z_{k/1})}{W(Z_{k/0})}$$

donde:

Z_k : señal compleja de entrada (véase la Fig. 1)

$W(Z_{k/1})$: probabilidad de que Z_k sea 1

$W(Z_{k/0})$: probabilidad de que Z_k sea 0.

El carácter óptimo en este caso viene determinado por la medida en que las señales utilizadas satisfacen las condiciones enumeradas anteriormente. Las dos primeras implican la posibilidad de utilizar un demodulador de componentes. Para que se cumplan estas condiciones, es suficiente que cada muestra de densidad espectral (o sus componentes), contenga información sobre el signo del símbolo binario correspondiente. La condición que estipula la independencia mutua de la interferencia puede reducirse a una condición que establezca la independencia de las proyecciones del vector de la señal recibida sobre el sistema de funciones básicas de la transformada de Fourier. Esta condición se cumple en el caso de desvanecimientos independientes en cada una de las bandas de frecuencia, invarianza de las funciones básicas respecto a los emplazamientos temporales e interferencia con un espectro de potencia plano. En la práctica, es imposible satisfacer plenamente los diversos requisitos enumerados, de forma que la inmunidad al ruido del demodulador de componentes será inferior a la inmunidad al ruido potencial, aunque muy superior al caso de recepción de elementos de señales separados.

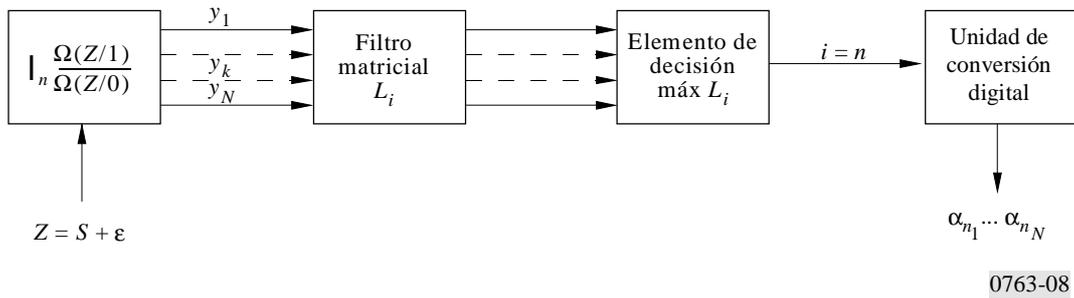
El diagrama de bloque de la sección de recepción del módem que aplica el criterio de decisión (3) consta de las unidades siguientes (véase la Fig. 8): unidad para el cálculo del logaritmo de la relación de probabilidad y_k ; unidad para el cálculo de las formas lineales L_i ; elemento de decisión que determina el número de formas lineales con valor máximo; convertidor digital que compara con cada número su propia combinación de símbolos binarios y con ellos evalúa la secuencia de información transmitida.

3 Descripción del sistema

La Fig. 9 muestra un diagrama de bloques del sistema. Consta de los elementos siguientes: los terminales de usuario; la unidad de conversión de la señal (módem) situada junto a los terminales o en una unidad de control de comunicaciones separada; el equipo de recepción y de transmisión BLU y las antenas correspondientes. Cuando el módem va instalado en la unidad de control, la comunicación con el terminal se establece mediante canales de frecuencia de tono.

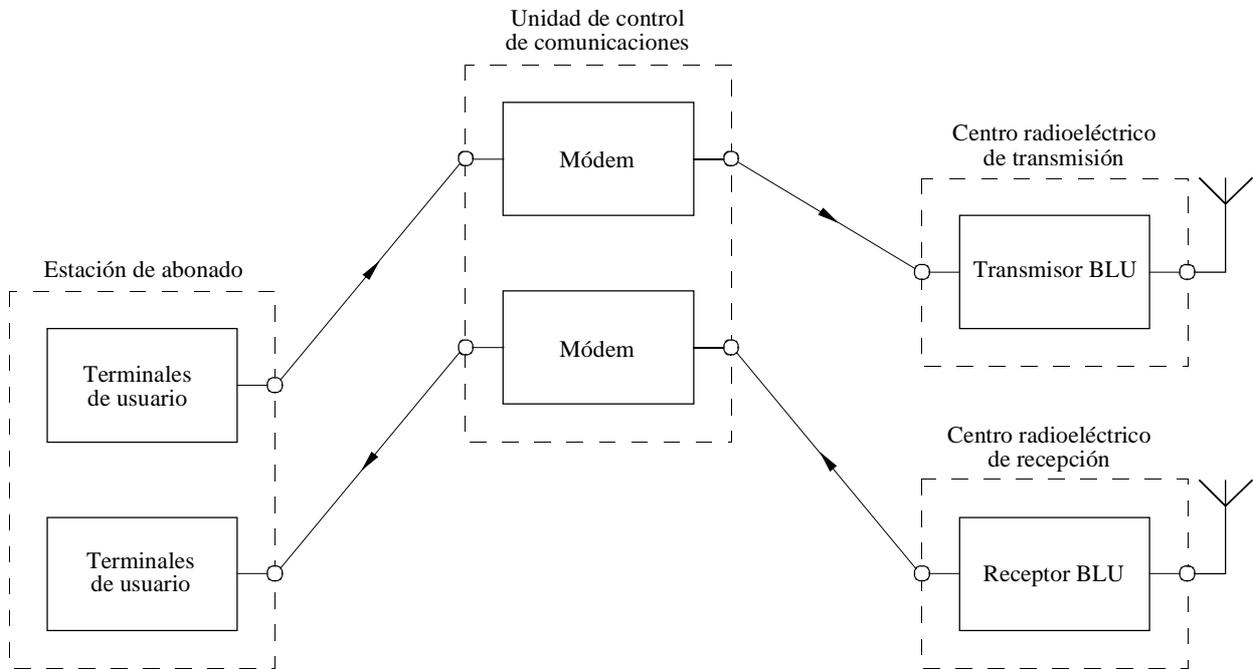
Cuando está situado en las proximidades del terminal, puede conectarse mediante circuitos de continua.

FIGURA 8
Sección de recepción del módem



0763-08

FIGURA 9
Diagrama de bloques del sistema



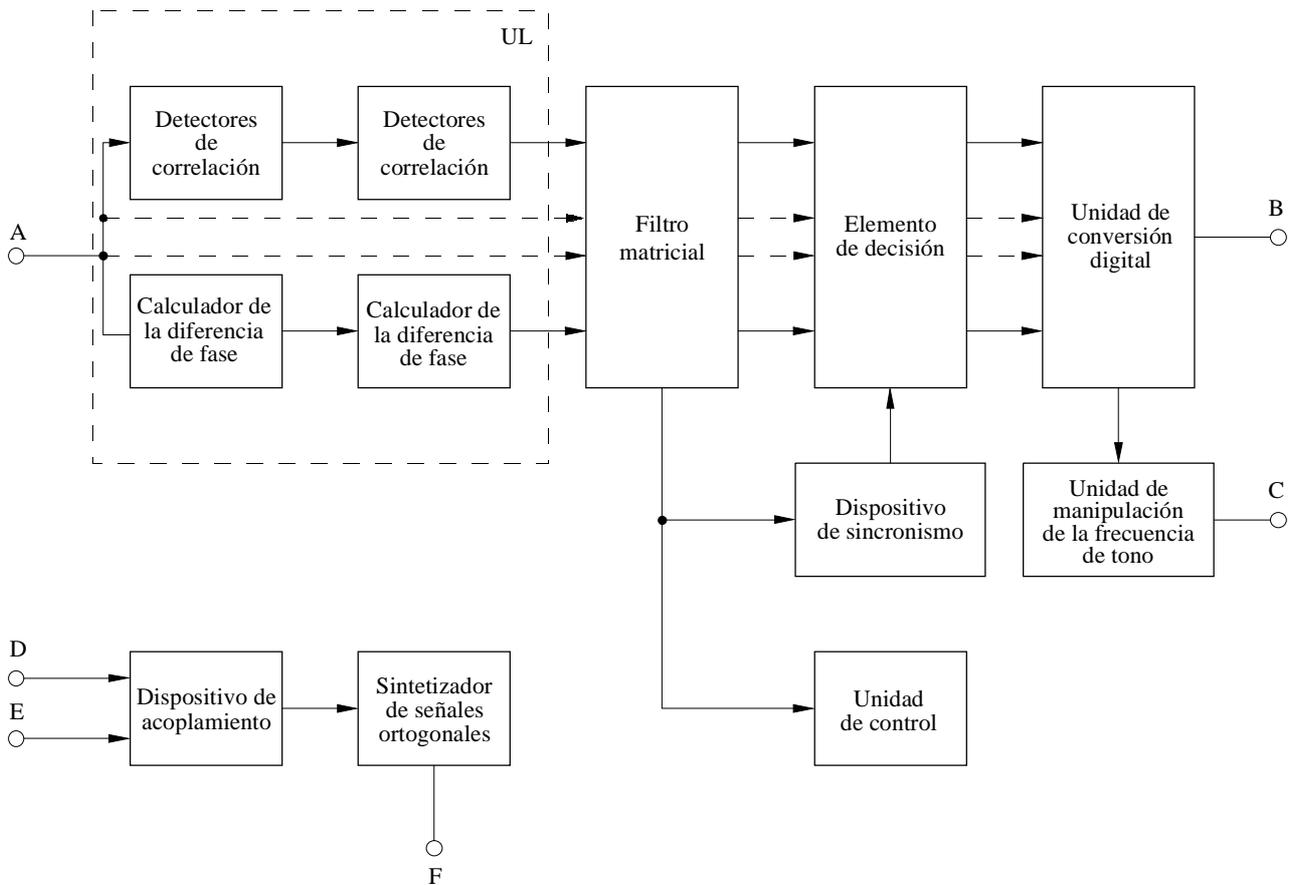
0763-09

La Fig. 10 muestra un diagrama de bloques del módem que comprende los principios considerados anteriormente. El módem está concebido para transmitir información digital a 600-1 200 bit/s. Para velocidades binarias inferiores hay que utilizar un códec adicional. Se obtiene una velocidad binaria de 2 400 bit/s aumentando el número de señales utilizadas y conmutando a una recepción de elementos de señal separados. El transmisor del módem consta de un dispositivo de acoplamiento (DA) y un sintetizador de señales ortogonales (SSO).

El DA está diseñado para adaptarse al módem con el terminal de usuario a través de canales de frecuencia de tono o mediante circuitos de corriente continua y para controlar el sintetizador. Incluye un amplificador-rectificador del tono de audiofrecuencia, un regenerador, y un circuito de control lógico.

El SSO da forma a las señales analógicas y las amplifica hasta el nivel deseado. Consta de una unidad de codificación, una memoria de lectura solamente (ROM) y un convertidor digital/analógico (CD/A), un filtro de baja frecuencia y un amplificador de potencia. Una característica específica del funcionamiento del SSO es que las señales temporales de todas las señales que deben utilizarse para la transmisión de información están ya incorporadas en su memoria ROM. Estas muestras se calculan con anterioridad en un computador, conforme a los criterios establecidos en el punto anterior.

FIGURA 10
Diagrama de bloques del módem



- A: Entrada del receptor del módem
- B: Salida de la frecuencia de tono del receptor del módem
- C: Salida del receptor del módem en continua
- D: Entrada de la frecuencia de tono del transmisor del módem
- E: Entrada en continua del transmisor del módem
- F: Salida del transmisor del módem

0763-10

En una etapa inicial, para verificar los principios básicos utilizados, se sintetizó un conjunto de 16 señales biortogonales que tenían un espectro plano en la gama 1,1-2,42 kHz y una banda efectiva de 0,66-2,86 kHz. Sus densidades espectrales se representaban por medio de 4 muestras complejas, cada una de las cuales podía dar información sobre los signos de dos símbolos binarios. Para la transposición del espectro de estas muestras, se añadieron dos muestras cero y, tras una transformada de Fourier, se efectuó una multiplicación adicional por una componente compleja.

Las muestras temporales de las señales calculadas de esta manera, se introdujeron en palabras de 8 bits en la memoria ROM y, tras leerlas con una frecuencia de temporización de 8,8 kHz, fue posible obtener a la salida del conversor D/A señales analógicas con una duración de 3,33 ms y un intervalo de ortogonalidad de 2,27 ms.

La secuencia de operaciones en el transmisor del módem es la siguiente: se regeneran las señales de información binaria procedentes del terminal, se combinan para formar palabras de código de 4 bits y a continuación se aplican a la entrada del circuito de codificación relativa que controla la selección en la memoria ROM de una de las 16 formas de la señal. Tomando la salida de dicha memoria ROM, las muestras se convierten mediante la unidad de conversión D/A en una señal analógica que, una vez amplificada, se aplica por el canal de frecuencia de tono a la entrada del transmisor BLU.

Tal como se indica en la Fig. 8, la sección de recepción del módem se compone de los elementos siguientes: una unidad que calcula los logaritmos de la relación de probabilidad (detectores de correlación (DTC), un calculador de la diferencia de fase (CDF)), un filtro matricial adaptado que calcula todas las formas lineales L_i ; un elemento de decisión (ED) que determina el número de la forma máxima; y una unidad de conversión digital (UCD). También contiene un dispositivo de sincronismo (DS) y una unidad de control (UC). Admite el funcionamiento simple o doble con diversidad espacial o por polarización.

La transformación de las señales analógicas en muestras de densidad espectral se efectúa por medio de los DTC que calculan las componentes en fase y en cuadratura de cada muestra. La incertidumbre inicial sobre la fase del canal se elimina entonces utilizando el CDF y se obtiene el espectro de fase de la señal recibida. El filtro adaptado es un sumador matricial en el que se ajusta cada una de sus columnas para una selección adecuada de las muestras utilizando amplificadores inversores. El ED determina la columna con la tensión de salida máxima y, utilizando la UCD, transmite la secuencia correspondiente de 4 símbolos binarios que se aplica al terminal de entrada directamente o a través de la unidad de manipulación de la frecuencia tono (UMT).

La UC funciona basándose en el principio de que las tensiones de las líneas de salida del filtro adaptado coinciden exactamente, a través de un factor constante, con los valores de la distribución de las probabilidades a priori. Es evidente que el funcionamiento del canal será mejor cuanto más «aguda» sea esta distribución, pues en el caso ideal, la tensión debe aparecer únicamente en unas de las líneas de salida del filtro adaptado. La diferencia entre la tensión máxima y la tensión cuyo nivel es más próximo a ella en la otra línea de salida, puede utilizarse para evaluar la calidad del canal en el proceso de transmisión de información.

4 Investigaciones experimentales

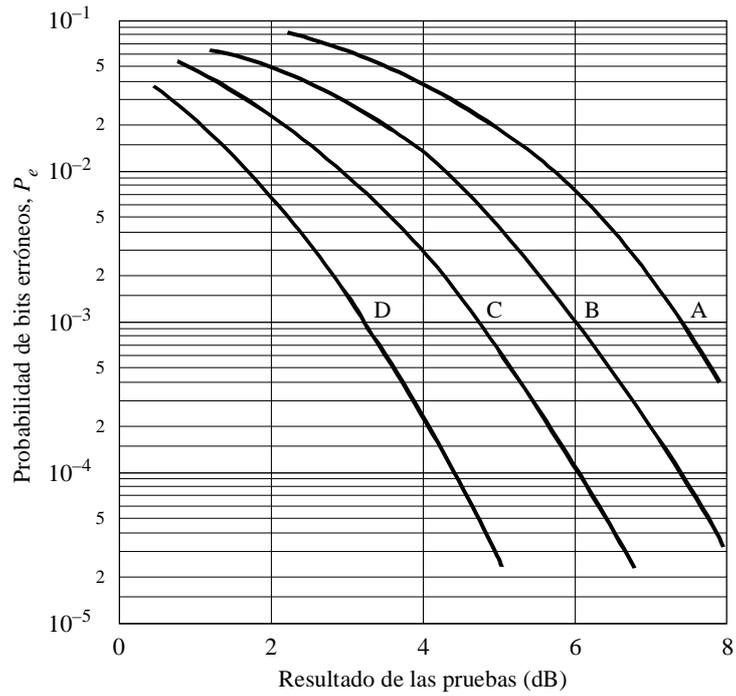
Las pruebas de laboratorio del módem se efectuaron utilizando un banco de pruebas con modelos que incluía los elementos siguientes: el receptor BLU, un simulador de canal de dos rayos, un generador de ruido, y un contador digital para calcular el número de errores. Como combinación de pruebas se utilizó una secuencia de pseudoruido procedente de un generador incorporado en el módem. Se analizaron tres modos de funcionamiento: canal con parámetros constantes y ruido blanco; canal de un solo rayo con desvanecimiento de Rayleigh y canal con dos rayos con una diferencia en la propagación de los rayos de 1 ms, amplitudes idénticas del rayo y desvanecimiento de Rayleigh. En las Figs. 11 y 12 se indican los resultados de las pruebas. A modo de comparación, la Fig. 11 muestra las curvas de inmunidad al ruido de un módem multifrecuencia como el descrito en el Anexo 1 para la misma velocidad de transmisión. Tal como muestran las curvas, el módem estudiado presentaba una mejor inmunidad al ruido. La comparación de las curvas A y B de la Fig. 12a) muestra que el módem tiene una inmunidad al ruido superior en el modo de canal de dos rayos. El motivo de ello es que en el caso de desvanecimientos planos, el criterio de decisión (3) ya no es óptimo. En el caso de canales de dos rayos, adquieren un papel predominante los desvanecimientos selectivos en frecuencia, que el módem puede contrarrestar de forma más eficaz. La línea de trazo discontinuo de la figura muestra la curva teórica de la inmunidad al ruido para el caso de recepción óptima no coherente del elemento de señal separado, utilizando la MDP-2 en el caso de desvanecimientos de Rayleigh.

Se efectuaron ensayos del enlace con el módem para trayectos de 3 600 km y 4 300 km en latitud. Se utilizó un transmisor BLU de 15 kW, antenas de transmisión rómbicas y antenas de recepción de Fishbone (recepción doble). Se efectuaron ensayos en el primer trayecto durante el día y durante la noche, para una frecuencia. En el segundo trayecto se utilizaron dos frecuencias. La velocidad binaria y de información era de 1 200 bit/s. Basándose en mediciones de 5 min, se obtuvieron curvas que muestran la distribución de la proporción de errores y que se representan en la Fig. 12b).

5 Conclusiones

La utilización de la MDP generalizada asociada a la recepción «en conjunto» ofrece nuevas posibilidades para aumentar la inmunidad al ruido en la transmisión de información digital. Un módem desarrollado como ejemplo práctico de la aplicación del método de la MDP generalizada, utiliza señales con espectro plano y, desde este punto de vista, es similar a los módems que se describen en el Anexo 1. Los ensayos demuestran que en enlaces de 3 000-4 000 km se garantiza una velocidad binaria de 1 200 bit/s con una proporción de errores que no excede de 1×10^{-4} a 1×10^{-3} para un 95 a 98% del tiempo.

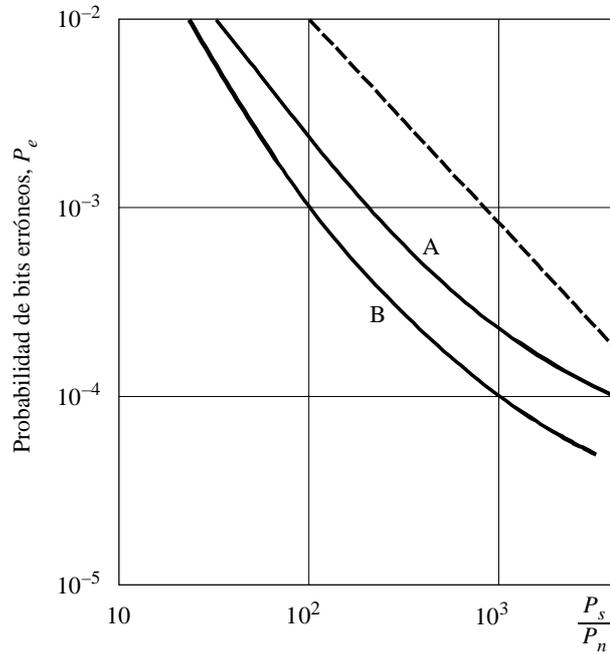
FIGURA 11
Inmunidad al ruido del módem



A: Multifrecuencia } 1 200 bit/s
 B: MDPD }
 C: Multifrecuencia } 600 bit/s
 D: MDPD }

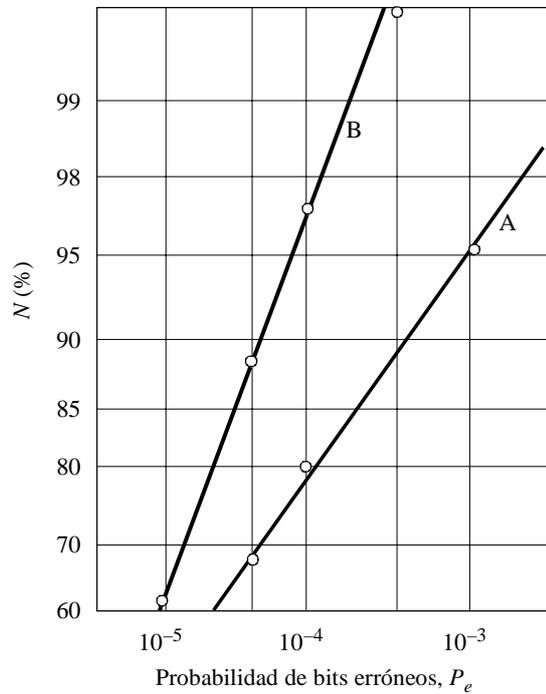
FIGURA 12

Immunidad al ruido del módem en los canales con desvanecimiento



a) Prueba del simulador

A: 1 rayo
 B: 2 rayos
 Velocidad de transmisión: 1 200 bit/s



b) Pruebas del enlace de sincronización

A: 3 600 km
 B: 4 300 km
 Velocidad de transmisión: 1 200 bit/s

ANEXO 4

Diversidad de modo y de polarización en sistemas de radiocomunicaciones de datos en ondas decamétricas**1 Introducción**

La amplitud de una señal radioeléctrica de ondas decamétricas recibida fluctúa cuando su dirección de polarización cambia respecto a la antena receptora, apareciendo los mínimos cuando la polarización es ortogonal y los máximos cuando la polarización es paralela. El desvanecimiento debido a cambios de polarización ha sido confirmado por experimentos que han revelado que un nivel mínimo de señal recibida en un elemento de la antena coincide a menudo con un nivel de señal máximo en un elemento ortogonal. Este efecto puede aprovecharse utilizando un sistema de elementos de antena ortogonal para mejorar la calidad de funcionamiento del sistema.

Muchos módems de tonos serie de ondas decamétricas incorporan técnicas de ecualización adaptativa como las descritas en el Anexo 2. Algunos módems utilizan una forma de onda en la que se inserta periódicamente un preámbulo en el tren de datos. El preámbulo, compuesto por símbolos conocidos, permite estimar la respuesta impulsiva instantánea del canal. Un ecualizador adaptativo puede entonces utilizar la respuesta impulsiva estimada para combinar energía de diferentes trayectos que tengan retardos distintos. La respuesta se mantiene mediante un procedimiento de los mínimos cuadrados para actualizar el ecualizador adaptativo.

Después de la ecualización, la existencia de varios modos de propagación distintos puede resultar ventajosa, al ser improbable que sufran desvanecimientos simultáneos, con lo que aumenta la probabilidad de recibir alguna de la energía transmitida. Este fenómeno, conocido por diversidad de modo, puede aprovecharse mientras la energía transmitida que llega al receptor sea suficiente para superar el ruido. La máxima utilidad de la ganancia por diversidad de modo se produce cuando la diferencia de retardos de trayecto es suficientemente grande para evitar el desvanecimiento plano. Utilizando los elementos de la antena ortogonal, puede crearse a la entrada del demodulador un multitrayecto artificial de algún valor fijo. De esta manera, la ganancia por diversidad de polarización puede lograrse aprovechando la capacidad del módem para afrontar la interferencia entre símbolos y mejorar la calidad de funcionamiento mediante diversidad de modo.

Se han considerado dos técnicas diferentes. La primera, denominada diversidad de transmisión, utiliza dos antenas ortogonales excitadas cada una por un transmisor independiente pero enganchado en fase y frecuencia, con la entrada de banda base a uno de los transmisores retardada, y comunicando con un receptor de una sola antena. La segunda, denominada diversidad de recepción, utiliza un solo transmisor y una sola antena, pero dos receptores enganchados en fase y frecuencia conectados a antenas ortogonalmente polarizadas. Las salidas del receptor se conectaron a un combinador de diversidad, también con un trayecto retardado en banda base, que producía la entrada al módem. Las salidas del receptor se conectaron a un combinado de diversidad cuya función era combinar las dos señales para formar la señal de entrada al módem. Este sencillo combinador posibilita la diversidad de recepción sin modificar el módem. Los receptores de ondas decamétricas emplean un CAG para acomodar la amplia gama dinámica de una señal, de manera que el nivel de salida se mantenga próximo a algún nivel fijado. Cuando el nivel de la señal de entrada al receptor se reduce durante un desvanecimiento, la ganancia del receptor aumenta por la acción del CAG. Por tanto la tensión CAG es una medida conveniente de la relación S/N instantánea. El diseño del combinador debe dar más importancia a la componente con mejor S/N frente a la componente con peor S/N . Por ello, las tensiones del CAG de los receptores son utilizados por el combinador de diversidad para determinar la proporción de las dos señales que componen la suma. La señal resultante se aplicó entonces a la entrada del módem.

En el caso del sistema descrito en el Anexo 2, donde la capacidad del ecualizador se extiende a más de 5 ms, se ha descubierto que el retardo de banda base de 2,7 ms es el óptimo. Se ha comprobado que los mejores resultados se obtenían cuando el trayecto retardado era el trayecto más débil, lo cual se debe a las técnicas de sincronización particulares que se utilizan en el módem. Por ello, el procedimiento de utilizar un retardo de señal con las antenas verticales aseguró en ambas técnicas que la señal de mayor potencia precedía a la señal más débil.

2 Conclusiones

Este tipo de diversidad puede mejorar considerablemente la calidad de funcionamiento de los sistemas de radiocomunicaciones de datos en ondas decamétricas. La diversidad de transmisión puede reducir la proporción de errores hasta en cuatro órdenes de magnitud mientras que la diversidad de recepción hasta en 3 órdenes de magnitud. La mejora que ofrece la diversidad de polarización puede evaluarse considerando la cantidad de potencia de transmisión adicional requerida para mejorar la calidad de funcionamiento de un sistema sin diversidad hasta alcanzar el nivel logrado con diversidad. En el caso de los módems que incorporan ecualización adaptativa, la utilización de la diversidad de transmisión equivale a un aumento en la potencia del transmisor de unos 6 a 8 dB mientras que la diversidad de recepción simple equivale a un aumento de la potencia de 3 a 4 dB. En el caso de los sistemas que emplean diversidad de transmisor, dos transmisores de 100 W pueden reemplazar a un transmisor de 1 kW si se logra una ganancia de 7 dB. Esta reducción en la potencia de transmisión unida al hecho de que la diversidad de polarización puede aplicarse tanto al extremo transmisor como receptor de un enlace sin necesidad de modificar los módems existentes podría reducir notablemente los costos. El tipo de diversidad empleado en una determinada aplicación dependerá del tipo de enlace. Es decir, la estación de base probablemente emplearía la diversidad, mientras que una estación a distancia no. La diversidad de transmisión y recepción son especialmente útiles cuando la calidad de funcionamiento de los enlaces de comunicaciones de datos con plataformas móviles o ubicaciones remotas puede mejorarse con antenas, receptores y transmisores adicionales instalados en el emplazamiento de la estación de base.
