

RECOMENDACIÓN UIT-R F.1113

**SISTEMAS RADIOELÉCTRICOS QUE EMPLEAN LA PROPAGACIÓN
POR IMPULSOS METEÓRICOS**

(Cuestión UIT-R 157/9)

(1994)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que ciertos experimentos han demostrado ya la viabilidad de utilizar la banda de frecuencias entre 30 y 50 MHz para la transmisión mediante propagación por impulsos meteóricos a distancias más allá del horizonte;
- b) que ya están en servicio sistemas que utilizan este modo de propagación para la transmisión de datos por ráfagas,

recomienda

1. que en la aplicación de sistemas radioeléctricos basados en la propagación por impulsos meteóricos se utilice como orientación la información contenida en el anexo 1.

ANEXO 1

**Sistemas radioeléctricos que emplean la propagación
por impulsos meteóricos****1. Introducción**

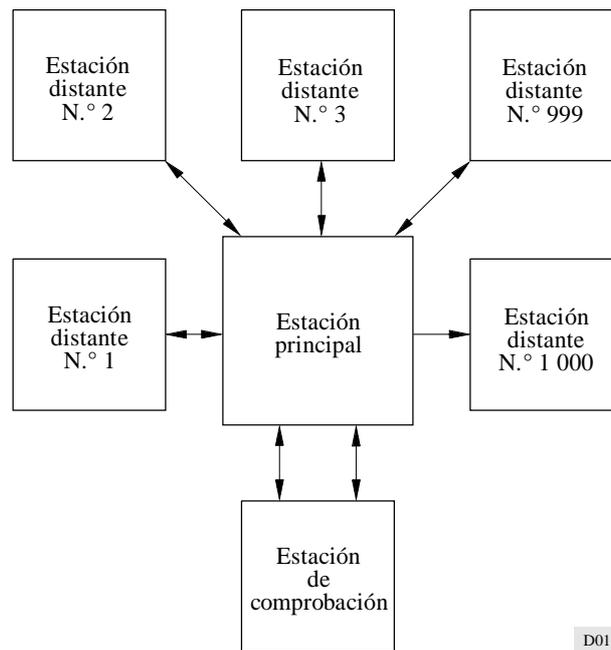
El fenómeno de la propagación por impulsos meteóricos, basado en las reflexiones en las estelas meteóricas ionizadas, se describe en la Recomendación UIT-R PI.843. Los avances recientes en materia de microprocesadores y de electrónica digital hacen que hoy en día sea posible fabricar con un coste comercial realista un sistema de comunicaciones por impulsos meteóricos. En este anexo se describen dos sistemas de este tipo y se presentan los resultados de las pruebas efectuadas con los mismos.

2. Ejemplo de sistema de comunicación por impulsos meteóricos A**2.1 Descripción del sistema**

El sistema se configura en forma de red en estrella con una estación principal central y una capacidad de hasta 1 000 estaciones distantes dentro de la zona de cobertura de 2 000 km de radio (véase la fig. 1). El sistema utiliza un protocolo de paquetes semidúplex con transmisiones de repetición automáticas de un solo elemento, en presencia de errores. Cada una de las estaciones distantes puede comunicar con un número cualquiera de otras estaciones distantes a través de la estación principal central.

Pueden construirse sistemas más grandes utilizando varias estaciones principales que se comunican entre sí mediante la propagación por impulsos meteóricos en transmisiones dúplex, de forma que todas las estaciones distantes puedan comunicarse entre sí a través de combinaciones de estaciones centrales, por una serie de canales de 25 kHz. También es posible construir un sistema sin estación principal, utilizando las técnicas de punto a punto, cuando las estaciones distantes realizan las funciones de control. Este último sistema no es flexible, sino que ha de reconfigurarse para cualquier cambio del número de estaciones.

FIGURA 1
Diagrama de bloques del sistema



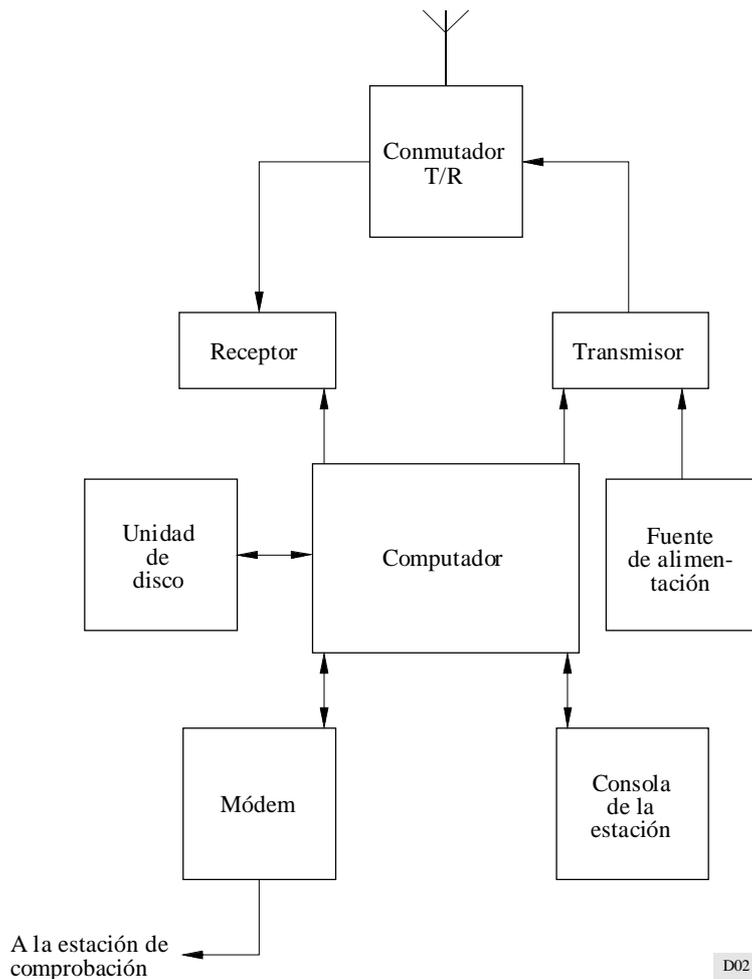
En Europa se ha diseñado un sistema de red con número máximo de funciones del sistema concentradas en la estación principal. Se hace de esta manera para minimizar el tamaño, el coste y el consumo de energía de las estaciones distantes. La estación principal realiza las funciones de iluminación de la estela meteórica, la sincronización del sistema y el encaminamiento de mensajes, aunque es transparente al usuario. Es el único componente del sistema que requiere alimentación mediante la red eléctrica.

2.1.1 Características fundamentales del sistema

El sistema descrito funciona en un modo semidúplex utilizando dos frecuencias alrededor de 46,9 MHz con una sola antena polarizada horizontalmente en cada estación. En la práctica, la antena de la estación principal es un sistema de cuatro antenas «Yagi» conectadas entre sí para lograr una cobertura omnidireccional. Sería posible utilizar la polarización vertical si lo exigiesen razones de tipo operacional, tales como la de las estaciones móviles distantes. El transmisor (véase la fig. 2) tiene una potencia nominal de 500 W. Un conmutador de transmisión/recepción permite efectuar ciclos de llamada/escucha con una duración aproximada de 80 ms. Este ciclo alternado de 40 ms en llamada y 40 ms en escucha, se utiliza para iluminar las estelas meteóricas, y se le conoce como prueba. Las transmisiones de prueba pueden depender de la prioridad en el sistema. La modulación del transmisor de la estación principal tiene una modulación con desplazamiento de fase (MDP) binaria de índice reducido ($\pm 30^\circ$) para minimizar la interferencia de los canales adyacentes. La sincronización de las estaciones distantes se logra con la codificación Manchester de la señal del reloj en los datos.

Las estaciones distantes transmiten con una modulación MDP de índice elevado ($\pm 90^\circ$) para que haya una posibilidad máxima de detección por parte de la estación principal. Se aplican dos protocolos, uno para la adquisición de datos y el otro para la comunicación. En funcionamiento normal, la estación principal envía palabras de prueba y verifica las señales recibidas para validar los elementos de datos procedentes de una estación distante (véase la fig. 3). En cuanto se encuentra un segmento válido se retransmite un acuse de recibo a la estación original distante. Al mismo tiempo, se efectúa una verificación en la memoria de un computador para ver si se han dirigido otros segmentos a dicha estación distante, y en caso afirmativo el primer segmento del mensaje de retorno se adjunta al acuse de recibo. Si se retransmite un segmento de esta manera, se busca un acuse de recibo en la estación distante. En todos los casos, si no llega el acuse de recibo se repite el segmento hasta lograrlo.

FIGURA 2
Estación principal



El sistema se controla mediante un monitor conectado a la estación principal por radio o por línea terrestre. Esta conexión permite instalar el monitor en las oficinas de la administración al tiempo que permite que la estación principal esté alejada en una ubicación ideal con bajo ambiente de ruido. El monitor del sistema verifica el comportamiento general y almacena todos los datos transmitidos, de forma que los usuarios pueden obtenerlos del monitor en lugar de recibirlos en tiempo real.

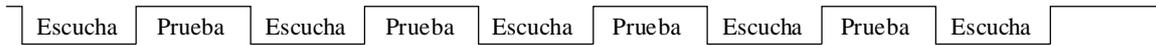
En este sistema se optimiza una estación distante de adquisición de datos, en términos de consumo de energía y funcionamiento fiable, en condiciones típicas desde -30 °C a $+60\text{ °C}$. El ciclo de trabajo del transmisor de 100 W se limita a 1% . El receptor tiene una sensibilidad de -118 dBm y hay un almacenamiento intermedio para los paquetes de datos o para los mensajes de texto breve (véase la fig. 4).

Se optimiza un segundo tipo de estación distante de comunicaciones, en términos de velocidad máxima de transferencia de información, que es función de la relación señal/ruido. El ciclo de trabajo del transmisor de 300 W se limita a 10% . El receptor tiene una sensibilidad de -121 dBm y hay un almacenamiento intermedio con una capacidad de hasta 20 octetos de memoria (véase la fig. 5).

El protocolo de comunicación utiliza la diversidad espacial y temporal naturales de las estelas meteóricas para atender automáticamente a una agrupación máxima de $1\ 000$ estaciones distantes. Cuando se presenta un trayecto se envían datos y acuses de recibo durante un mismo acontecimiento. Las cadenas de datos largas requieren varios acontecimientos y una recombinación en el receptor. El texto se transmite en una serie de segmentos a los que se da acuse de recibo al final del mensaje. Es posible observar continuamente la relación señal/ruido y modificar de forma adaptable la velocidad de datos entre 2 kbit/s y 64 kbit/s para maximizar el caudal.

FIGURA 3
Protocolo típico de intercambio de datos por ráfagas meteóricas

1. La estación principal transmite y escucha alternativamente



2. La estación principal recibe mensajes de las estaciones distantes



2A. La estación distante tiene un mensaje para enviar y su receptor escucha la llegada de la señal de prueba

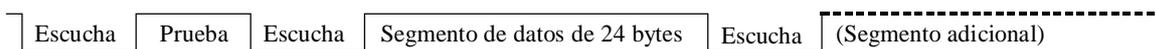


2B. Mensaje de la estación distante (Longitud mayor 24 octetos)

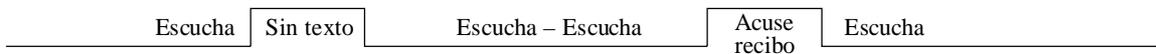


2C. Si todos los mensajes no pueden enviarse en un acontecimiento meteórico, los mensajes o partes de mensajes restantes se almacenan hasta el próximo acontecimiento que aparezca.

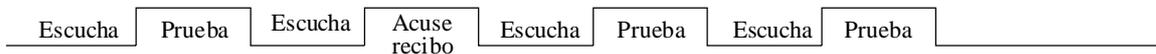
3. La estación principal envía mensajes a las estaciones distantes



3A. La estación distante recibe mensajes de la principal



4. La estación principal escucha a la distante pero no hay cola de datos en ninguna de ellas



4A. La estación distante escucha a la principal pero no tiene datos para enviar

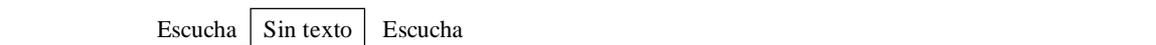


FIGURA 4
Estación típica de adquisición de datos

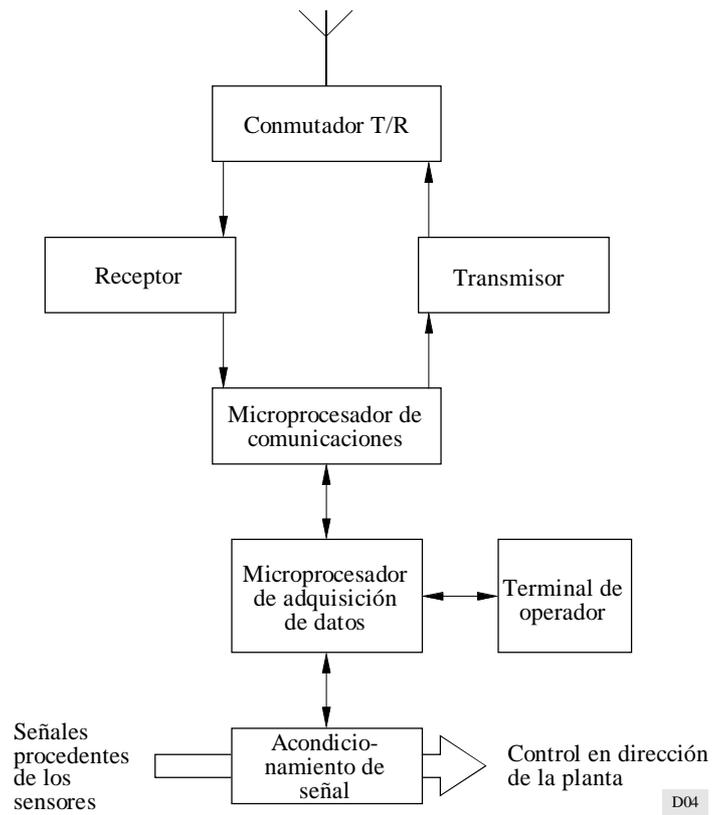
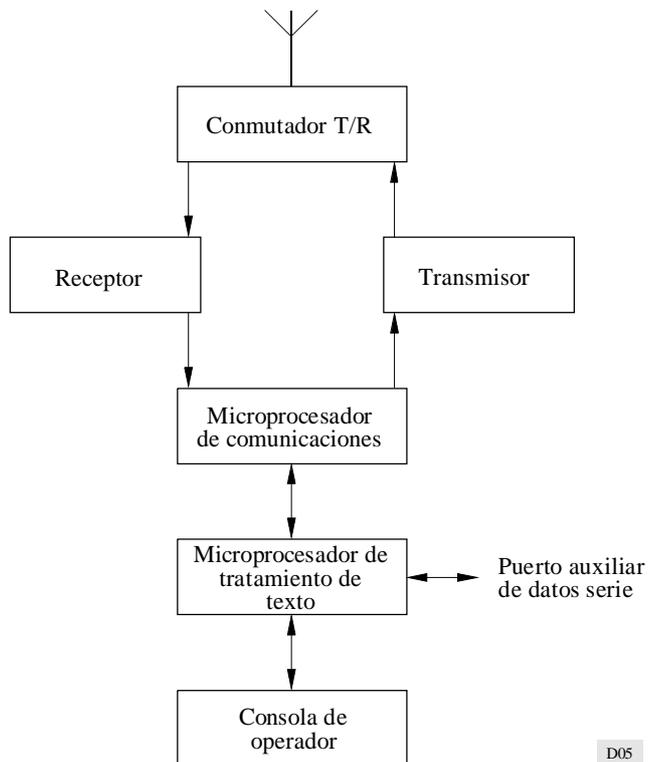


FIGURA 5
Estación típica de comunicación de texto y datos



2.1.2 Sensibilidad al ruido de los sistemas por impulsos meteóricos

Se ha demostrado que los enlaces por ráfagas meteóricas son relativamente poco afectados por las perturbaciones atmosféricas tales como las Auroras Boreales. En el caso ideal, el comportamiento de un sistema que utiliza la propagación por ráfagas meteóricas estaría limitado únicamente por el ruido galáctico. Por tanto, ha de diseñarse el receptor para que decodifique señales cuya magnitud es comparable a la del ruido galáctico. En la práctica, hay también ruido artificial que a menudo es transitorio y muy grande en comparación con el ruido galáctico. Por este motivo, el receptor tiene que tener una amplia gama dinámica y algún tipo de protección para evitar los efectos de saturación de las crestas de alta energía.

2.1.3 Diseño y utilización: variación en función de la frecuencia

El sistema puede funcionar a cualquier frecuencia comprendida entre 20 y 120 MHz, siempre que no esté presente una ionización regular. El alcance llegaría hasta 1 600 km utilizando las estelas ionizadas de los meteoros a 80-100 km por encima de la Tierra. La gama de frecuencias preferida es de 40 a 50 MHz para maximizar el ciclo de trabajo de información.

2.2 Resultados de pruebas

2.2.1 Resultados de operaciones

El funcionamiento obtenido en la red europea para todas las distancias ha sido mejor de lo previsto en la mayoría de los modelos de computador publicados. Las diferencias mayores se presentan en distancias cortas en las que las velocidades de datos obtenidas han llegado hasta cinco veces los valores previstos. Las experiencias realizadas en las Islas Británicas han demostrado que se logra una comunicación fiable para todas las distancias comprendidas entre 0 y 1 600 km. El sistema se utiliza para tomar mediciones en puntos alejados y enviar regularmente los datos resultantes a la central. Típicamente, se envían ocho muestras de 12 bits desde cada ubicación distante durante cada intervalo de 15 min.

En ensayos realizados en diciembre y enero de los años 1986 a 1989 se establecieron ocho estaciones distantes de baja potencia para adquisición de datos, enviando datos con intervalos de 5 min mediante enlaces por ráfagas meteóricas, con distancias de 1 520, 1 040, 816, 608, 464, 256, 141 y 24 km. Todos los datos se recibieron satisfactoriamente a lo largo del periodo de pruebas en el intervalo de 5 min, antes del envío de los datos siguientes.

2.2.2 Efectos observados relativos a la sensibilidad a la interferencia y al ruido

La experiencia en Europa muestra que el único factor significativo para determinar la calidad de un enlace por ráfagas meteóricas es el nivel de la interferencia en la banda, en el emplazamiento de la estación. Otros servicios en esa gama de frecuencias utilizan propagación con visibilidad directa. Los efectos de la interferencia pueden reducirse a menudo girando o modificando el ángulo de elevación de la antena con respecto a su posición normal. Una antena giratoria de haz ancho y baja ganancia permite utilizar una gran zona de cielo; se pueden efectuar variaciones de ángulos de antena de hasta 25° en cualquier plano con poco efecto sobre la calidad de funcionamiento del enlace. Hay que señalar que la técnica de las ráfagas meteóricas se puede aplicar con una relación señal/ruido pequeña, con lo que se mantiene la integridad del enlace, aunque con una velocidad de datos inferior.

2.2.3 Variación observada en función de la frecuencia

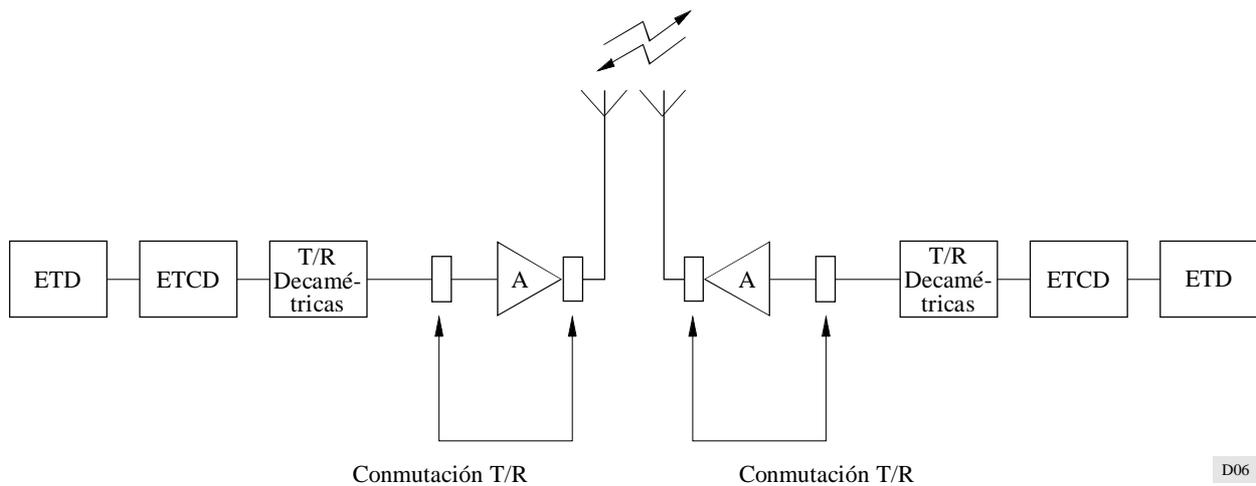
El sistema descrito utiliza un solo par de frecuencias alrededor de 46,9 MHz; por tanto, no se cuenta todavía con datos operacionales sobre la variación en función de la frecuencia.

3. Ejemplo de sistema de comunicación por impulsos meteóricos B

3.1 Descripción del sistema

Pruebas de un sistema de transmisión de datos por canal meteórico se efectuaron en Francia durante el primer semestre de 1988, con un enlace punto a punto entre dos estaciones fijas situadas a 350 km una de otra, y a todas las horas del día y de la noche.

FIGURA 6
Diagrama de bloques del enlace



- El bloque DCE realiza las funciones de modulación MDF y de sincronismo (módem radio).
- El bloque DTE realiza las funciones de comunicación, codificación y tratamiento de datos.

El mensaje emitido se estructura en un formato de bloques. Estos bloques son de dos tipos:

- bloque de cabecera (un bloque por mensaje),
- bloque de datos (número dependiente de la longitud del mensaje).

La codificación utilizada se aplica por bloques, según un código de corrección de errores de Reed-Solomon (23,13) que puede compensar proporciones de errores de hasta 5%.

La velocidad binaria utilizada es de 16 kbit/s; los caracteres se componen de 6 bits.

El procedimiento es de tipo «semidúplex» efectuándose una retransmisión con parada y espera (repetición de los bloques no recibidos, únicamente).

Las pruebas se efectuaron:

- con varios niveles de potencia del transmisor: 1 kW – 200 W – 100 W, algunas pruebas a 50 W
- a diferentes frecuencias: alrededor de 40 MHz
- para diferentes tamaños de mensajes: 900 – 500 – 250 – 100 – 50 – 10 caracteres

Se utilizaron antenas Yagi de 5 elementos con polarización horizontal, cuyo diagrama permite iluminar toda la zona de cobertura de gran concentración de meteoros.

Estas antenas están especialmente bien adaptadas para este tipo de transmisión; tienen una ganancia de 9,5 dBi.

3.2 Resultados de las pruebas

Se efectuaron los tres tipos de pruebas que figuran a continuación.

3.2.1 Ensayo del canal

Permite medir las características siguientes durante un periodo de observación T , determinado:

τ_m : duración media de una estela meteórica

$$\tau_m = \frac{\sum \text{duración de las estelas}}{\text{número de estelas}}$$

θ_m : duración media entre dos estelas meteóricas

$$\theta_m = \frac{\sum \text{duración entre dos estelas}}{\text{número de estelas}}$$

de las que se puede deducir d_o : duración de abertura del canal (es decir, porcentaje del tiempo medio durante el cual el canal está abierto):

$$d_o = \frac{\tau_m}{\tau_m + \theta_m}$$

La duración media de una estela meteórica, τ_m , se calcula identificando la continuidad de desarrollo del procedimiento.

Para una potencia de 1 kW, la actividad del canal meteórico da una duración media de las estelas de 400 ms, y una duración media entre dos estelas de 700 ms.

Para una potencia de 200 W, la actividad disminuyó débilmente (duración media de las estelas: 330 ms – duración media entre dos estelas: 800 ms).

Por el contrario, para una potencia de 100 W, la actividad se hizo muy débil (duración media de las estelas: 350 ms – duración media entre dos estelas: 43 s).

Puede deducirse que la duración de la abertura del canal fue del 36% para 1 kW, 29% para 200 vatios y 0,8% para 100 W.

Las pruebas han demostrado que la actividad meteórica media útil es aproximadamente estable durante las 24 h; no ha podido demostrarse que exista una actividad mayor hacia las 06.00 h y menor hacia las 18.00 h, como se indica en la Recomendación UIT-R PI.843.

Nota 1 – Estos resultados de las pruebas de la actividad del canal para potencias de emisión elevadas (1 kW a 200 W) son muy superiores a los resultados teóricos obtenidos con la fórmula deducida de los experimentos COMET.

Parece que pueden explicarse solamente por la presencia simultánea de otro mecanismo de propagación. La altura de la antena sobre el suelo (17 m), elegida de manera que puedan establecerse enlaces de hasta 1 000 km, permite obtener ganancias considerables para ángulos de elevación bajos. Esto pudiera favorecer a los enlaces por difusión troposférica, que son teóricamente posibles para la distancia considerada y cuya explotación es factible con los procedimientos utilizados en el canal meteórico. La existencia de este fenómeno ha sido confirmada estimando, abertura por abertura, el tiempo de propagación de la señal (la difusión troposférica a baja altitud corresponde a un tiempo de propagación mucho más corto que la reflexión de las estelas meteóricas a altitudes elevadas).

3.2.2 Prueba de la proporción de bits erróneos

Esta prueba permite medir la proporción de bits erróneos en las estelas debida únicamente a las características del canal, sin la utilización de códigos de corrección de errores.

Se comparó el mensaje recibido con un mensaje de referencia de 900 caracteres. El conjunto de bits erróneos (por carácter) se almacenó en un fichero; se introdujo en éste una ventana de 60 caracteres, en pasos de un carácter. Cuando la proporción de bits erróneos fue de 5% en esta ventana (la cifra corresponde a la capacidad máxima del código de corrección de errores de Reed-Solomon utilizado), el canal meteórico se consideró cerrado. Se almacenó en memoria la posición del último carácter de la ventana.

El cálculo de la proporción de bits erróneos se efectuó en el conjunto de datos que precedió a este último carácter.

- Esta proporción fue de 1,7% a 1 kW y de 2,5% a 200 W.
- Para una potencia de 100 W, resultó muy elevada (7,4%) y sólo pudo utilizarse el comienzo de la estela para el código empleado.

3.2.3 Prueba del sistema

Permite medir las características del sistema para evaluar su adaptación al canal y, determinar si el procedimiento utilizado es el adecuado.

Esta es la única prueba que tiene en cuenta el parámetro «tamaño de mensaje».

3.2.3.1 Velocidad de transmisión

La característica esencial es la velocidad de transmisión media, D , en caracteres útiles por segundo:

$$D = \frac{\text{tamaño del mensaje recibido}}{\text{tiempo de transmisión}}$$

A potencia constante, la velocidad de transmisión media aumenta en función de la longitud del mensaje. La velocidad máxima (187 caracteres/s) se obtuvo para mensajes de 500 caracteres con 1 kW de potencia. A 200 W, la velocidad no fue más que de 122 caracteres/s. Para mensajes de 250 caracteres, la velocidad fue de 158 caracteres/s con 1 kW y de 116 caracteres/s con 200 W.

Hubo una disminución importante de la velocidad de transmisión para potencias inferiores a 100 W: para los mensajes de 100 caracteres, las velocidades fueron de 84 caracteres/s con 1 kW, de 63 caracteres/s con 200 W, de 13 caracteres/s con 100 W, 1 carácter/s con 50 W y de 0,02 caracteres/s con 30 W.

En definitiva, se ha podido constatar que las velocidades de transmisión son relativamente estables durante un intervalo de unos 15 min.

3.2.3.2 Idoneidad del procedimiento

Para los enlaces punto a punto, se recibe un mensaje de tamaño definido después de un número importante de intercambios entre las dos estaciones. La proporción de bloques erróneos (BER) viene dada por la fórmula:

$$BER = \left(1 - \frac{\text{número de bloques recibidos}}{\text{número de bloques transmitidos}} \right) \times 100$$

que permite determinar la eficacia del procedimiento, evaluando el número de intercambios.

El sistema funcionó bien con una potencia de 1 kW: se recibió un mensaje de longitud definida con pocos intercambios de procedimiento (proporción de bloques erróneos: 27%).

Para una potencia de 200 W, se produjeron numerosos intercambios (proporción de bloques erróneos: 48%), lo que implicó una disminución de su eficacia; dejó de ser óptimo pero continuó siendo satisfactorio y los intercambios no saturaron el sistema.

Para una potencia de 100 W, se recibió un mensaje tras un número muy elevado de intercambios entre las dos estaciones (proporción de bloques erróneos > 50%). En definitiva para las potencias inferiores a 100 W, el procedimiento dejó de ser adecuado.