

RECOMENDACIÓN UIT-R P.843-1

COMUNICACIONES MEDIANTE LA PROPAGACIÓN POR IMPULSOS METEÓRICOS

(Cuestión UIT-R 221/3)

(1992-1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que la dispersión debida a la ionización provocada por las estelas meteóricas puede ofrecer un procedimiento de comunicación adecuado en ondas decamétricas y métricas;
- b) que se están explotando circuitos de telecomunicaciones bidireccionales entre 30 y 100 MHz, a distancias de hasta 1 800 km;
- c) que la comunicación aprovecha las ráfagas de propagación durante la aparición de estelas meteóricas y puede admitir velocidades de datos de hasta 100 Bd como media a lo largo de una hora, aproximadamente,

recomienda

que se utilice la siguiente información en el diseño y planificación de los sistemas de comunicaciones mediante la propagación por impulsos meteóricos:

1 Variaciones temporales del flujo meteórico

En ciertas épocas del año, aparecen meteoros en forma de precipitaciones y pueden ser prolíficos durante unas pocas horas. Sin embargo, existe un nivel de fondo general de meteoros que incide sobre la Tierra desde todas las direcciones y para fines de planificación de la comunicación conviene considerar únicamente estos meteoros esporádicos.

En el caso de meteoros esporádicos a latitudes medias se produce una variación diaria de la incidencia aproximadamente sinusoidal que presenta un máximo a las 06h00 y un mínimo a las 18h00, hora local. La relación entre el máximo y el mínimo toma como valor medio aproximadamente cuatro. En el hemisferio norte hay una variación estacional de magnitud similar con un mínimo en febrero y un máximo en julio. Existe una variabilidad día a día en la incidencia de los meteoros esporádicos y en los de precipitación.

El flujo medio anual de meteoros incidentes por unidad de superficie y que producen densidades de líneas de electrones q que rebasan un umbral q_0 por metro, $I(q > q_0)$ viene dado por:

$$I(q > q_0) = \frac{160}{q_0} \quad \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

Combinando esta tasa de meteoros global con una variación diaria sinusoidal representativa y el factor estacional, M , puede estimarse a partir de la Fig. 1 las modificaciones temporales medias que experimenta el flujo de meteoros:

$$\frac{160}{q_0} M \left[1 + 0,6 \left(\text{sen} \frac{\pi T}{12} \right) \right] \quad \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (2)$$

siendo:

T : hora local (horas).

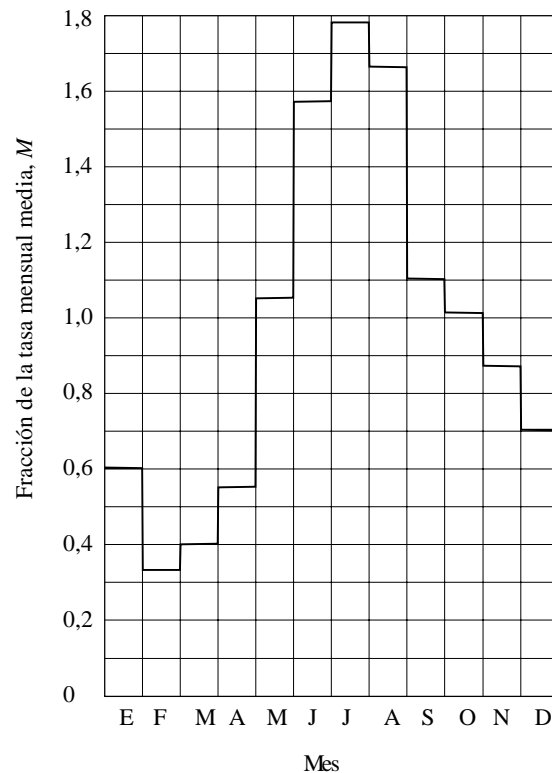
A efectos de planificación puede que sólo sea necesario considerar la combinación más desfavorable de mes y de hora local.

2 Variación espacial en el flujo de meteoros

Los meteoros pueden aparecer en cualquier parte del mundo y a cualquier hora, pero no existe información estadística completa sobre su distribución geográfica y la dirección de las estelas.

FIGURA 1

Variación mensual de la tasa de flujo de meteoros esporádicos con respecto al valor medio



0843-01

Hasta que puedan cuantificarse las variaciones espaciales, se recomienda utilizar para cualquier latitud las estimaciones de flujo basadas en el método indicado en el § 1.

3 Estelas subdensas y superdensas

Las estelas ionizadas provocadas por los meteoros se clasifican en subdensas y superdensas según la intensidad de ionización. La frontera entre ambos casos se sitúa en densidades de líneas de aproximadamente 2×10^{14} electrones por metro. La amplitud de las señales dispersadas por estelas subdensas puede calcularse sumando el campo por dispersión creado por cada electrón individual. Las estelas superdensas son aquellas en las que no puede ignorarse el acoplamiento entre los electrones, en cuyo caso, las propiedades reflectantes se calculan como si la estela fuese un largo cilindro metálico. En las frecuencias utilizadas en la práctica, los ecos de las estelas subdensas muestran un comienzo abrupto seguido de una caída exponencial y los de las estelas superdensas presentan envolventes más redondeadas y son de superior duración. Las proporciones relativas de los ecos en las estelas subdensas y superdensas dependerán de la sensibilidad del sistema.

La relación entre el número de estelas de la amplitud de cresta, A , viene dada aproximadamente por la expresión:

$$\text{Número de estelas} \propto (A)^{-\psi}$$

donde ψ varía entre 1,0, para niveles de señal bajos, y más de 2,0, para niveles de señal más elevados, cuando la mayoría de las estelas son superdensas. En muchos enlaces el índice ψ toma un valor entre 1,1 y 1,4.

Los resultados obtenidos en los sistemas utilizados hasta ahora indican que los ecos provienen fundamentalmente de estelas subdensas. Por esa razón se recomienda que la planificación de un sistema típico se base en que todas las estelas meteóricas son del tipo subdenso.

4 Longitud efectiva y radio de las estelas meteóricas

4.1 Longitud efectiva

En la Fig. 2 se representa la geometría de los rayos para un trayecto de propagación mediante impulsos meteóricos, entre el transmisor T y el receptor R. P representa el punto de tangencia y P' es un punto más allá en la estela tal que el trayecto ($R'_1 + R'_2$) supera en longitud al trayecto ($R_1 + R_2$) en media longitud en onda. De esta forma, PP' (de longitud L) se encuentra dentro de la zona principal de Fresnel y la longitud total de la estela dentro de esa zona es 2L. Siempre que R_1 y R_2 sean muy superiores a L se cumple que para casos prácticos:

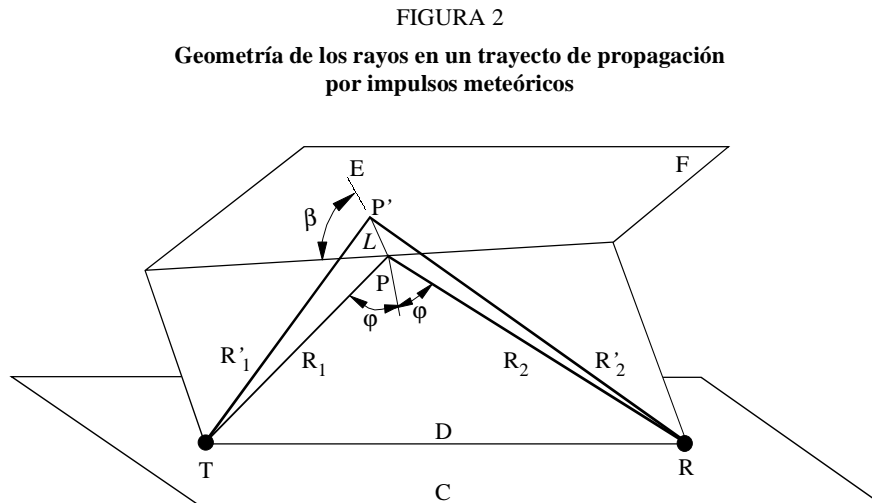
$$L = \left[\frac{\lambda R_1 R_2}{(R_1 + R_2) (1 - \sin^2 \varphi \cos^2 \beta)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

siendo:

φ : ángulo de incidencia

β : ángulo entre el eje de la estela y el plano de propagación

λ : longitud de onda.



C: Superficie de la Tierra

D: Plano de propagación

E: Estela

F: Plano tangente

β : Ángulo entre el eje de la estela y el plano de propagación

T: Transmisor

R: Receptor

0843-02

4.2 Radio de la estela

Con el fin de calcular la sección transversal de dispersión de la estela se acostumbra a suponer que la difusión ambipolar hace que la densidad radial de electrones tenga una distribución gaussiana y que la densidad de volumen se reduce mientras que la densidad de líneas permanece constante.

La estela de ionización que sigue inmediatamente a un meteoro se forma de manera casi instantánea con una anchura finita que recibe el nombre de radio inicial de la estela, r_0 . Una relación empírica entre r_0 y la altura del meteoro es la siguiente:

$$\log r_0 = 0,035 h - 3,45 \quad (4)$$

donde:

h : altura de la estela (km)

r_0 : radio inicial de la estela (m).

5 Potencia recibida y pérdidas de transmisión básicas

5.1 Potencia recibida

Como todo sistema práctico de comunicación mediante impulsos meteóricos se basa fundamentalmente en estelas subdensas, las fórmulas relativas a estelas superdensas tienen menor importancia. Se pueden efectuar estimaciones del comportamiento satisfactorias utilizando las fórmulas para el caso de estelas subdensas, suponiendo unos valores de q en la gama de 10^{13} a 10^{14} electrones/m según los parámetros predominantes del sistema.

La potencia recibida, $p_R(t)$, después de la dispersión en las estelas subdensas a las frecuencias utilizadas en la práctica es la siguiente:

$$p_R(t) = \frac{p_T g_T g_R \lambda^2 \sigma a_1 a_2(t) a_2(t_0) a_3}{64\pi^3 R_1^2 R_2^2} \quad (5)$$

donde:

- λ : longitud de onda (m)
 - σ : superficie de reflexión de la estela (m^2)
 - a_1 : coeficiente de pérdida debido al radio inicial de la estela
 - $a_2(t)$: coeficiente de pérdida debido a la absorción ionosférica
 - a_3 : coeficiente de pérdida debido a la absorción ionosférica
 - t : tiempo en segundos medido desde el instante de la formación completa de la primera zona de Fresnel
 - t_0 : mitad del tiempo invertido por el meteoro en atravesar la primera zona de Fresnel
 - p_T : potencia de transmisor (W)
 - $p_R(t)$: potencia disponible en la antena receptora (W)
 - g_T : ganancia de la antena transmisora relativa a una antena isótropa en el espacio libre
 - g_R : ganancia de la antena receptora relativa a una antena isótropa en el espacio libre
- Se supone que las antenas transmisora y receptora no tienen pérdidas.

R_1, R_2 : distancias (m) (véase la Fig. 2).

La superficie de reflexión viene dada por:

$$\sigma = 4 \pi r_e^2 q^2 L^2 \sin^2 \alpha \quad (6)$$

donde:

r_e : radio efectivo del electrón = $2,8 \times 10^{-15}$ m,

α : ángulo entre el vector eléctrico incidente en la estela y la dirección del receptor desde este punto.

Puesto que L^2 es directamente proporcional a λ , la superficie de reflexión, σ , es también proporcional a λ y por tanto la potencia recibida para las estelas subdensas varía según λ^3 . Normalmente se utiliza la polarización horizontal en ambos terminales. El término $\sin^2 \alpha$ de la ecuación (6) es entonces próximo a la unidad para las estelas en las dos manchas calientes.

El factor de pérdida a_1 viene expresado por:

$$a_1 = \exp \left[- \frac{8 \pi^2 r_0^2}{\lambda^2 \sec^2 \varphi} \right] \quad (7)$$

Éste representa las pérdidas que provienen de la interferencia entre la rerradiación de los electrones, allí donde el espesor de la estela en formación es comparable con la longitud de onda.

El factor $a_2(t)$ considera el incremento del radio de la estela por difusión ambipolar, que puede expresarse mediante:

$$a_2(t) = \exp \left[- \frac{32 \pi^2 D t}{\lambda^2 \sec^2 \varphi} \right] \quad (8)$$

siendo D la constante de difusión ambipolar en m^2s^{-1} que viene dada por la expresión:

$$\log D = 0,067 h - 5,6 \quad (9)$$

El incremento del radio debido a la difusión ambipolar puede ser apreciable aún durante un periodo corto como el necesario para la formación de la estela. El efecto total en relación con la potencia reflejada es el mismo que aparecería si toda la estela que está en la primera zona de Fresnel se hubiera expandido en una extensión igual a la que tiene en su punto medio. Puesto que esta parte de la estela tiene una longitud de $2L$, el radio en el punto medio es el que aparece después de un intervalo de tiempo de L/V (s), siendo V la velocidad del meteoro en ms^{-1} . Denominando t_0 a este intervalo de tiempo, su valor para estelas próximas al punto medio del trayecto ($R_1 \approx R_2 = R$) es:

– Para estelas ortogonales al plano de propagación ($\beta = 90^\circ$):

$$t_0 \approx \left(\frac{\lambda R}{2V^2} \right)^{1/2} \quad (10)$$

– Para estelas en el plano de propagación ($\beta = 0^\circ$):

$$t_0 \approx \left(\frac{\lambda R}{2V^2} \right)^{1/2} \cdot \sec \varphi \quad (11)$$

Substituyendo en la ecuación (8) t_0 dado por la ecuación (10), se obtiene para el caso $\beta = 90^\circ$:

$$a_2(t_0) = \exp \left[- \frac{32 \pi^2}{\lambda^{3/2}} \left(\frac{D}{V} \right) \left(\frac{R}{2} \right)^{1/2} \frac{1}{\sec^2 \varphi} \right] \quad (12)$$

Para $\beta = 0^\circ$, la expresión entre corchetes hay que multiplicarla por $\sec \varphi$.

La relación entre la constante de difusión ambipolar D y la velocidad del meteoro V (necesaria para evaluar la potencia recibida) se puede aproximar por:

$$D / V = [0,0015 h + 0,035 + 0,0013 (h - 90)^2] 10^{-3} \quad (13)$$

$a_2(t)$ es el único término dependiente del tiempo y fija el tiempo de decrecimiento de la potencia de la señal reflejada. La definición de una constante tiempo, T_{un} como el retardo necesario para que la potencia recibida disminuya en un factor e^2 (es decir 8,7 dB) conduce a:

$$T_{un} = \frac{\lambda^2 \sec^2 \varphi}{16 \pi^2 D} \quad (14)$$

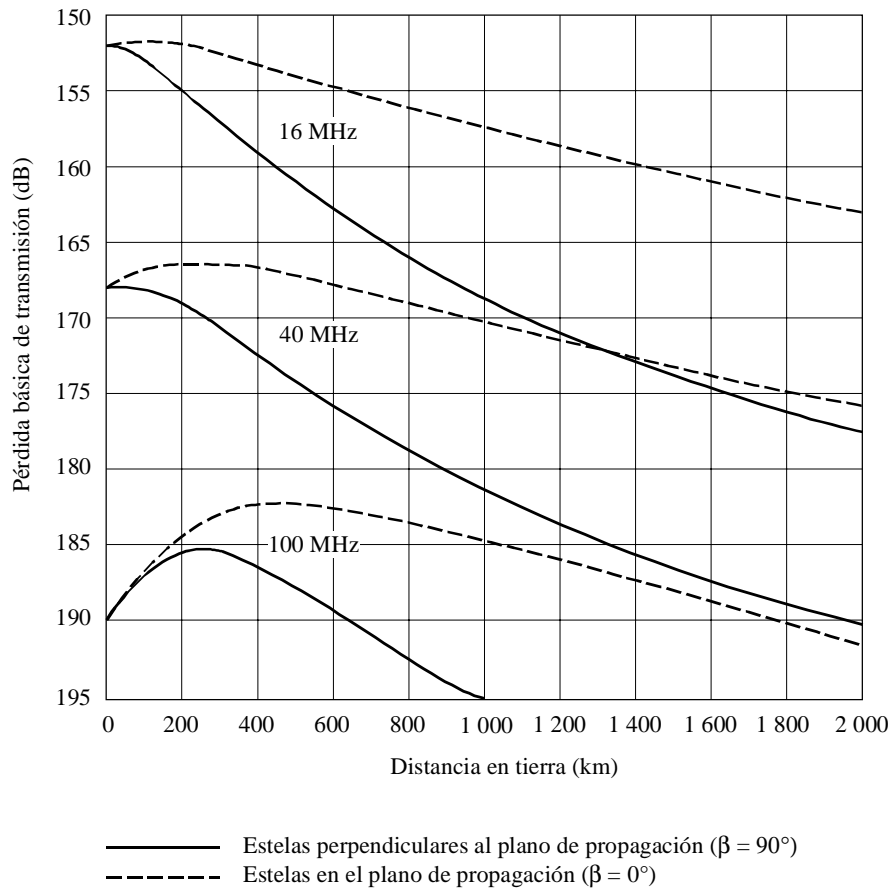
Con reflexión en incidencia rasante $\sec^2 \varphi$ será mayor y por tanto ocurre lo mismo con la constante de tiempo del eco. La constante de tiempo del eco aumenta también mediante la utilización de frecuencias inferiores.

5.2 Pérdida básica de transmisión

En la Fig. 3 se presentan las curvas de la pérdida básica de transmisión deducidas de la ecuación (5) para $q = 10^{14}$ electrones/m. Como el ángulo β puede tomar cualquier valor entre 0° y 90° se muestran únicamente estos dos extremos. Se observa claramente la ventaja de una pérdida de propagación menor al utilizar frecuencias más bajas. Para deducir dichas curvas se han usado las alturas medias de los meteoros de la ecuación (15). Convendría resaltar que la predicción del comportamiento del sistema depende en forma crítica de las alturas supuestas.

FIGURA 3

Perdida básica de transmisión para estelas subdensas dada por la ecuación (5) con $q = 10^{14}$ electrones/m y polarización horizontal



0843-03

6 El techo de eco subdenso y la altura media de la estela

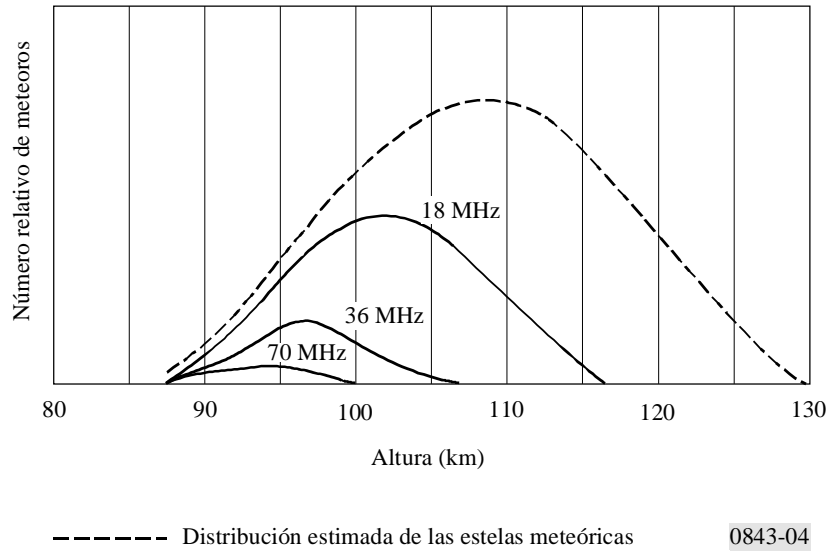
Tanto el radio inicial de la estela como el coeficiente de difusión ambipolar aumentan con la altitud. Como consecuencia, los coeficientes de pérdida a_1 y $a_2(t_0)$ se combinan para reducir el número de meteoros subdensos que aparecen cerca de la zona superior de la región meteórica y que son útiles para fines de comunicación. Este efecto se conoce generalmente, como techo del eco subdenso. Se ha observado que en el caso monoestático existen también semejantes restricciones. La Fig. 4 muestra la distribución de la altura de los ecos subdensos según medidas realizadas a distintas frecuencias de radar. Se puede observar que la altitud más baja a la que aparecen ecos subdensos es de 85 km y que la distribución de altitudes es aproximadamente gaussiana a cualquier frecuencia.

La altura media de la estela h (km) a la frecuencia f (MHz) es:

$$h = -17 \log f + 124 \quad (15)$$

La altura media de la estela es función de otros parámetros del sistema además de la frecuencia. Sin embargo, la ecuación (15) constituye una buena aproximación.

FIGURA 4
Distribución de la altura de los meteoros subdensos que proporcionan ecos a frecuencias de 18, 36 y 70 MHz



7 Ubicaciones de las regiones de dispersión óptima

Las propiedades de dispersión de las estelas rectas de ionización meteóricas son muy sensibles a la forma. Para que sean eficaces es necesario que las estelas satisfagan aproximadamente una condición de reflexión especular. Ello exige que la estela ionizada sea tangencial a un esferoide alargado cuyos focos son los terminales transmisor y receptor (véase la Fig. 2). En la superficie celeste más efectiva, la fracción de estelas meteóricas incidentes que se espera tengan orientaciones útiles es, aproximadamente, de un 5%. En la Fig. 5 aparecen los porcentajes estimados de estelas útiles para una separación entre terminales de 1000 km. Puede observarse que las zonas de dispersión óptimas están situadas aproximadamente a 100 km a cada lado del círculo máximo, independientemente de la longitud del trayecto.

La fracción de estelas utilizables, p , para cualquier longitud de trayecto, D' , puede estimarse mediante la fórmula siguiente:

$$p = \frac{4L}{3\pi D'} \frac{[3(\xi^2 - \eta^2) - (1 - \eta^2)] [(\xi^2 - 1)(\xi^2 - \eta^2) - 4\xi^2 h^2 / D'^2] - 4\eta^2(\xi^2 - 1)h^2 / D'^2}{(\xi^2 - \eta^2)^2 (\xi^2 - 1) [(\xi^2 - 1)(\xi^2 - \eta^2) - 4\xi^2 h^2 / D'^2]^{1/2}} \quad (16)$$

siendo:

$$\xi = (R_1 + R_2) / D'$$

$$\eta = (R_1 - R_2) / D'$$

8 Estimación de la frecuencia de impulsos útil

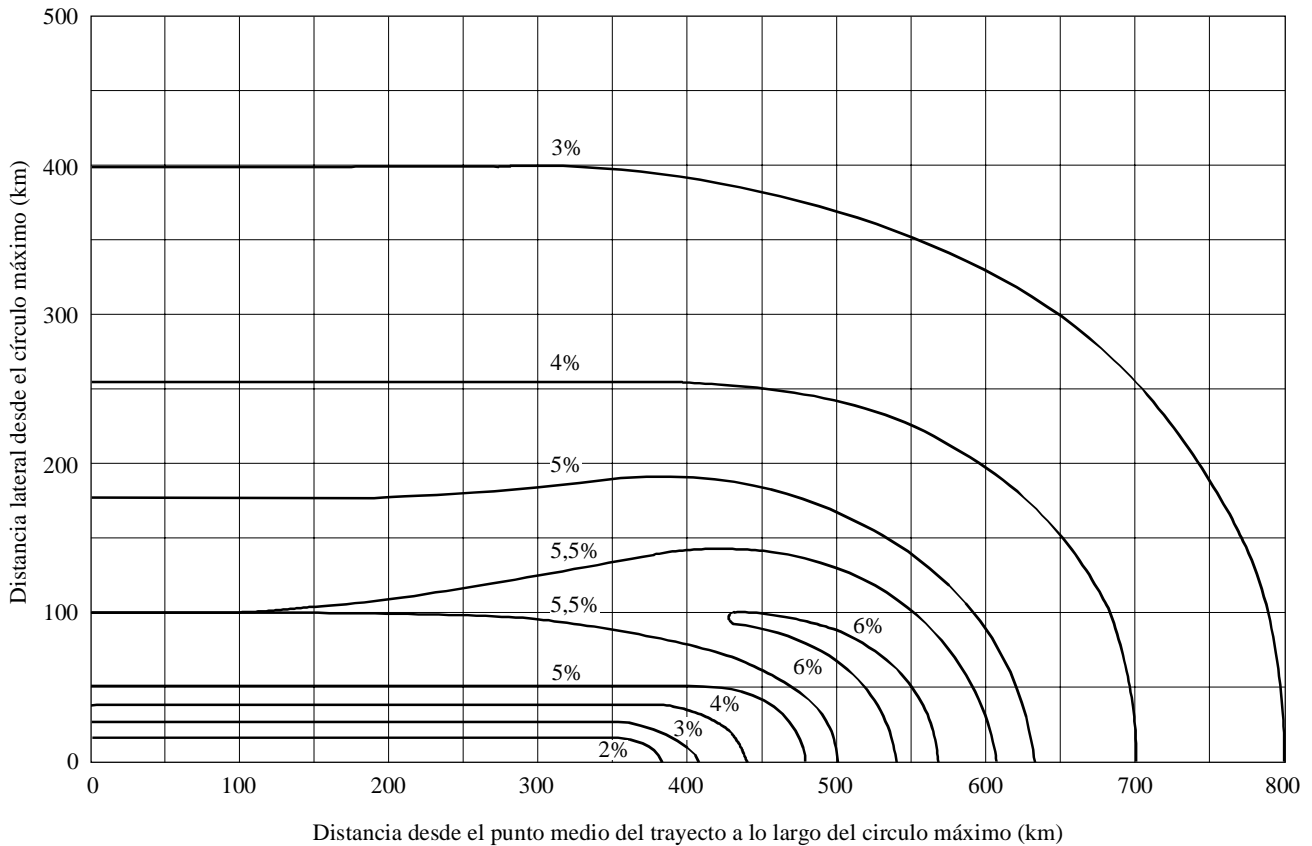
Puede efectuarse una evaluación del balance de potencia de un enlace de comunicaciones mediante impulsos meteóricos a partir de la altura media de la estela y de otras expresiones indicadas anteriormente. Una vez considerado viable un enlace, es necesario realizar un análisis más detallado para determinar la velocidad a la que se podrá transmitir las señales mediante impulsos meteóricos.

Normalmente los métodos más rigurosos de estimación de la frecuencia de impulsos útil se componen de las siguientes etapas:

- a) Establecimiento de la mínima potencia de señal recibida útil.
- b) Utilización de las ecuaciones del § 5 para describir la variación de los parámetros del sistema.
- c) Cálculo de la fracción de estelas útiles en función de la situación de la dispersión mediante la ecuación (16).
- d) Combinación de la ecuación (2) con la distribución de altura verdadera estimada de las estelas meteóricas a fin de calcular, en función de q , la densidad de volumen de dichas estelas en la atmósfera.
- e) Integración de los resultados de c) y d) en toda la región meteórica utilizando en cada punto el q_{min} obtenido en b).

FIGURA 5

Porcentajes estimados de estelas útiles en función de la posición donde se produce la dispersión para una separación entre terminales de 1 000 km



0843-05

9 Consideraciones sobre la antena

El efecto descrito en el § 7, junto con el hecho de que las estelas se encuentran fundamentalmente a una altura entre 90 y 110 km, sirve para establecer las dos zonas de «manchas calientes» hacia las que deben dirigirse ambas antenas. La importancia relativa de estas dos zonas varía según la hora del día y la orientación del trayecto. Normalmente, las antenas utilizadas en la práctica deben tener haces suficientemente anchos como para cubrir ambas zonas. Por consiguiente, no se optimiza el comportamiento pero por otro lado se evita la necesidad de desplazar el haz.

Por regla general se prefiere la polarización horizontal, pero puede ser útil la polarización vertical para distancias superiores a 1 000 km, aproximadamente, para las que se requiere un ángulo de cobertura bajo en las antenas.

10 Consideraciones sobre la elección de frecuencias

La elección de frecuencias en un sistema de comunicaciones basado en impulsos meteóricos viene influenciada por varios factores.

10.1 Ciclo de trabajo de información

Las dependencias con la longitud de onda de la máxima potencia recibida, $p_{R_{máx}}$ y del ciclo de trabajo, D_C , como está implícito en la ecuación (5) son las mismas que para la potencia del transmisor fijo y para las ganancias de las antenas:

$$p_{R_{máx}} \sim \lambda^3 \quad (17)$$

Esta relación es válida tanto para las estelas subdensas como para las superdensas. La influencia sobre el ciclo de trabajo dependerá de la frecuencia relativa de aparición de estos dos tipos de estela. Suponiendo una frecuencia de aparición intermedia, el ciclo de trabajo varía con la longitud de onda como sigue:

$$\begin{aligned} D_C &\sim p_{R_{m\acute{a}x}} T_{un} \\ &\sim \lambda^5 \end{aligned} \quad (18)$$

En puntos de recepción muy tranquilos, el ruido predominante a frecuencias superiores a 25 MHz es de origen cósmico y la intensidad varía según $\lambda^{2,3}$. Por tanto, el ciclo de trabajo de información, I_C , para una anchura de banda determinada, es decir la proporción del tiempo en que se rebasa una relación señal/ruido dada, varía con la longitud de onda como sigue:

$$I_C \sim \lambda^{2,7} \quad (19)$$

La frecuencia relativa de aparición de las reflexiones en función de la amplitud de la señal depende de la sensibilidad del sistema. Un resultado experimental común en los sistemas utilizados hasta el presente se puede expresar como:

$$D_C \sim p_R^{-0,6} \quad (20)$$

siendo:

D_C : ciclo de trabajo (proporción de tiempo en que se rebasa el umbral A)

p_R : potencia recibida correspondiente al umbral A .

Como la potencia de ruido es proporcional a la anchura de banda, B , la utilización de la ecuación (20) da lugar a la siguiente:

$$I_C \sim B^{-0,6} \quad (21)$$

La capacidad media del canal, C , es el producto de la velocidad de transmisión de la señal y del ciclo de trabajo. El primer término se puede suponer proporcional a la anchura de banda. Por consiguiente, la capacidad media del canal está relacionada con la anchura de banda mediante la siguiente expresión:

$$C \sim B^{0,4} \quad (22)$$

Para obtener la máxima transferencia de la información, la anchura de banda debe ser lo mayor posible.

Además de las cuestiones relativas a disponibilidad de anchura de banda, el incremento del ruido en una anchura de banda mayor y, por consiguiente, el menor grado de disponibilidad de la relación señal/ruido necesaria, conduce a una reducción del ciclo de trabajo de información, lo cual implica a su vez un mayor retardo en los mensajes. Además, se alcanza un punto en que el sistema tiene que aprovechar las estelas superdensas en cuyo caso deja de ser válida la ecuación (20). Cuando el exponente de p_R , al que es proporcional D_C , se hace inferior a -1 , no se obtiene ninguna ventaja aumentando la velocidad de transmisión de la señal. Puede observarse que el exponente debe ser inferior a -1 en frecuencias por debajo de 40 MHz para tener en cuenta las señales por dispersión ionosférica que enmascaran las señales por impulsos meteóricos más débiles.

No es probable que la anchura de banda utilizable esté limitada por la anchura de banda de coherencia, puesto que ésta es del orden de varios MHz para la parte principal del impulso. Aún durante las colas de los impulsos, donde hay desvanecimiento a causa de los esfuerzos cortantes del viento, la anchura de banda de coherencia es de varios centenares de kHz.

10.2 Interferencia

Las elevadas pérdidas de trayecto asociadas a las señales de comunicaciones mediante ráfagas meteóricas exigen mantener al mínimo el nivel de las señales interferentes. En consecuencia, la frecuencia de funcionamiento debe ser superior a la correspondiente a la propagación por los modos ionosféricos normales.

10.3 Absorción ionosférica

Conviene minimizar la absorción ionosférica lo cual exige la utilización de la frecuencia más elevada posible. Esto es particularmente importante en los sistemas que funcionan a elevadas latitudes, donde la absorción auroral y del casquete polar pueden atenuar e incluso absorber totalmente la señal si la frecuencia de funcionamiento es demasiada baja.

10.4 Rotación de Faraday

En algunos momentos, la rotación de Faraday de las señales para comunicaciones por impulsos meteóricos reducirá notablemente la capacidad del enlace de comunicaciones en frecuencias inferiores a unos 40 MHz.

El primer factor influye de forma contraria a los otros tres por lo que al elegir la frecuencia, el diseñador del sistema debe juzgar la importancia que conviene dar a cada uno de ellos.

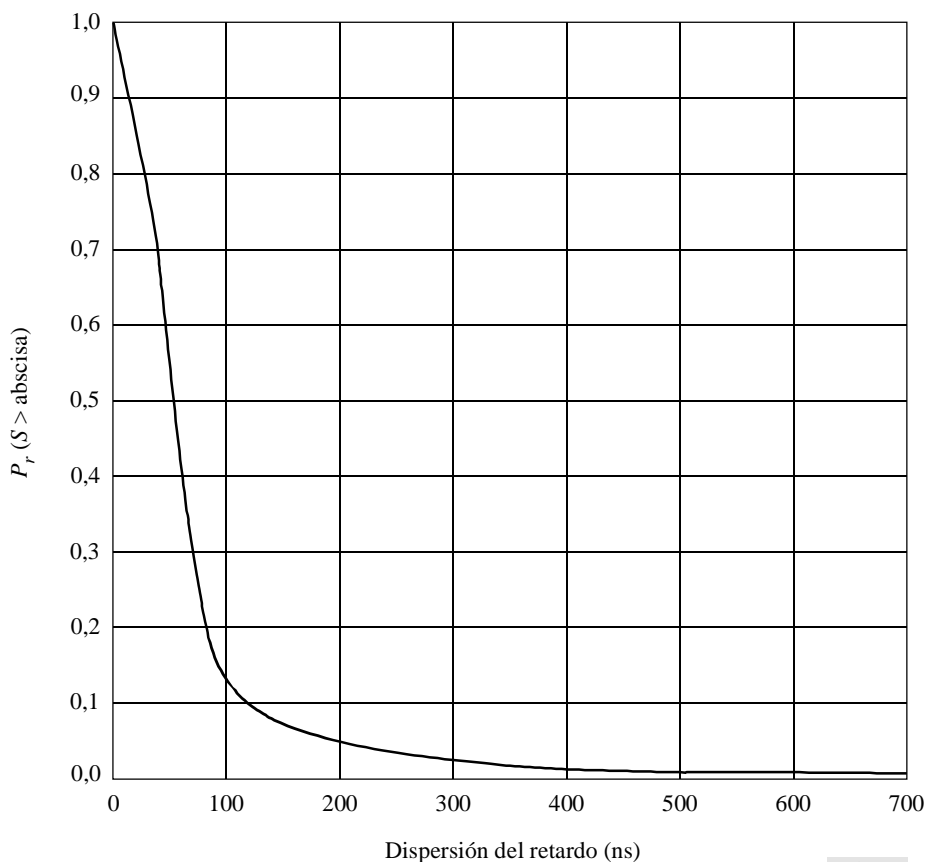
11 Efectos Doppler

La reflexión en la cabeza del meteoro provoca desplazamientos de frecuencia por efecto Doppler que pueden abarcar toda la banda de audio. El desplazamiento de frecuencia por efecto Doppler causado por la estela meteórica es el resultado de los movimientos del viento ionosférico y puede ser del orden de 20 Hz para una frecuencia de 40 MHz. Otros mecanismos de propagación, distintos de la dispersión por meteoros, pueden dar lugar a un mayor grado de propagación por trayecto múltiple y dispersión por efecto Doppler.

12 Efectos multitrayecto

El análisis de los perfiles de respuesta al impulso recogidos en un enlace de 500 km sometido a ráfagas de meteoritos, revela que la mayoría del tiempo sólo existe un único trayecto entre el transmisor y el receptor y, en consecuencia, la velocidad de señalización no se ve obstaculizada por la presencia de la propagación multitrayecto. Únicamente el 12% de las estelas hipodensas y el 71% de las hiperdensas dan algún indicio de multitrayecto. Este hecho queda reflejado por la distribución de la dispersión del retardo (véase la Fig. 6), la cual indica que para el 90% del tiempo el valor cuadrático medio de la dispersión del retardo, S , es inferior a 100 ns y para el 99% del tiempo está por debajo de 400 ns. Hay que señalar que en algunos casos aislados se ha informado sobre dispersiones del retardo que oscilan entre 1,0 y 7,0 μ s. A la vista de lo anterior, cabe concluir que las condiciones en que estas estelas producen una considerable dispersión del retardo se dan con una relativa escasa frecuencia.

FIGURA 6
Estadísticas de dispersión del retardo



0843-06