

Documentos del CCIR

[1974-78]: 6/251 (URSS).

[1978-82]: 6/74 (GIT 6/8).

[1982-86]: 6/231 (India).

BIBLIOGRAFÍA

BAILEY, D. K. [1962] Ionospheric forward-scattering. *Monograph on Ionospheric Radio*, 189-199. Ed. W. J. G. Beynon, Elsevier, Londres, Reino Unido.

COLLINS, C. y FORSYTHE, P. A. [1959] A bistatic radio investigation of auroral ionization. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 13, 315-345.

DIEMINGER, W., ROSE, G. y WIDDEL, H. U. [1963] Probabilidad de interferencia entre canales comunes en las bandas I, II y III de ondas métricas en África, a causa de fenómenos de reflexión y dispersión en las capas E y F. *Boletín de Telecomunicaciones*, Vol. 30, 251-256.

INFORME 251-5 *

COMUNICACIONES MEDIANTE LA PROPAGACIÓN POR IMPULSOS METEÓRICOS

(Cuestión 41/6)

(1959-1963-1966-1978-1982-1986-1990)

1. Introducción

La dispersión debida a la ionización provocada por las estelas meteóricas proporciona un procedimiento de comunicación en ondas decamétricas y métricas. Se han explotado circuitos de telecomunicaciones bidireccionales de forma experimental entre 30 y 100 MHz, a distancias de hasta 1300 km. La comunicación aprovecha las ráfagas de propagación durante la aparición de estelas meteóricas y admite velocidades de datos de hasta 100 baudios como media sobre varios minutos.

Las modernas técnicas de telecomunicación, tales como el empleo de minicomputadores para efectuar operaciones interactivas entre los terminales transmisores y receptores han hecho relativamente más atractiva la comunicación mediante impulsos meteóricos para aplicaciones especiales en las que se pueden tolerar retardos posiblemente de unos pocos minutos. Entre estas aplicaciones se encuentra la transmisión intermitente de información entre un gran número de estaciones distantes, y una estación central, transmisiones hacia y desde terminales móviles y las transmisiones de canales de órdenes en los circuitos de longitud media, en onda corta.

El primer indicio de que los meteoros podían provocar la ionización en la atmósfera superior provino de la correlación observada entre las señales transatlánticas en ondas decamétricas y las precipitaciones de meteoros [Pickard, 1931]. En 1943 la observación continuada de estaciones remotas en ondas métricas en los Estados Unidos de América, mostró que se podían recibir, algunas veces, ráfagas de señales no distorsionadas a distancias de hasta 2200 km [Allen, 1948]. Estas ráfagas duran hasta un segundo con una variación diurna en la frecuencia de aparición, que está correlacionada con la incidencia conocida de los meteoros visibles y con las estimaciones teóricas.

Los experimentos subsiguientes utilizaron las técnicas tanto de retrodispersión como dispersión hacia adelante. A mediados de los años cincuenta, se obtuvo junto a estudios teóricos, una considerable cantidad de información sobre la propagación por impulsos meteóricos. Esta actividad culminó en un importante conjunto de artículos que incluye las descripciones de dos sistemas de telecomunicación experimentales [Forsyth y otros, 1957; Vincent y otros, 1957].

En la siguiente década se realizaron ulteriores trabajos que permitieron realizar mejores estimaciones del comportamiento probable de un sistema de comunicación por impulsos meteóricos. Los resúmenes de la situación técnica aparecieron en un libro [McKinley, 1961] y un extenso artículo de recopilación [Sugar, 1964]. Un sistema experimental de comunicación más perfeccionado que emplea la repetición automática de la transmisión cuando hay errores presentes (ARQ) y recepción por diversidad, proporciona una velocidad mínima de transmisión de 50 baudios sobre un circuito de 1000 km [Bartholomé y Vogt, 1968]. Kokjer y Roberts [1986] han descrito aplicaciones a redes de sistemas de comunicación por impulsos meteóricos. [Cannon y Reed, 1987], que también han estudiado la teoría y

* Este Informe debe señalarse a la atención de la Comisión de Estudio 3.



los fundamentos de la propagación por impulsos meteóricos, presentan una perspectiva histórica del desarrollo de los sistemas de comunicaciones por impulsos meteóricos. Se destacan las propiedades especiales que distinguen las comunicaciones por impulsos meteóricos de las demás formas de radiocomunicaciones, y se detalla en ese marco, la evolución de los sistemas de comunicaciones por impulsos meteóricos.

Unas pruebas realizadas en Canadá, mostraron que incluso a frecuencias tan altas como 104 MHz los circuitos por impulsos meteóricos no estaban enteramente libres de interrupciones en las regiones árticas, como se esperaba [Maynard, 1968]. Sin embargo, en latitudes inferiores, en Noruega, no existen tales dificultades [Ince y otros, 1978]. Esta discrepancia puede estar relacionada con la ocurrencia de fulguraciones solares excepcionalmente intensas durante el periodo en el cual las pruebas fueron realizadas que fue de máxima actividad solar. Santeford [1976] presentó un Informe sobre resultados de pruebas efectuadas en invierno en el sistema de comunicación por impulsos meteóricos de Alaska, que indicaba la existencia de efectos de propagación por trayectos múltiples debidos a la ionización auroral del 8% del tiempo aproximadamente. Estos efectos de propagación por trayectos múltiples estaban correlacionados con importantes perturbaciones magnéticas. La explotación de enlaces por impulsos meteóricos se centra actualmente más en la utilización de circuitos que requieren únicamente una comunicación ocasional tales como la transmisión de información meteorológica [Smith, 1978], de señales horarias [Minullin y otros, 1971] o como un sistema de canales de órdenes [Brown y Williams, 1978]. La anchura de banda de coherencia excepcionalmente grande de las señales por impulsos meteóricos [Akram y otros, 1977] no ha sido aún explotada.

Hay un modelo de comunicaciones por impulsos meteóricos elaborado por Haakinson [1983], que permite predecir la fiabilidad de un sistema de comunicaciones por impulsos meteóricos. Los tiempos de espera necesarios para terminar la transferencia de mensajes de una estación principal a una distante se predicen en función de los parámetros del sistema, la separación entre estaciones y las condiciones temporales.

En un modelo más avanzado de comunicaciones por dispersión meteórica, desarrollado por Weitzen [1986], se define la relación entre, por una parte, el ritmo de afluencia de los meteoros aprovechables y, por otra, los diagramas de antena, los parámetros de enlace, las pérdidas por rotación de Faraday y la polarización. Este modelo puede utilizarse para determinar: 1) los valores de dependencia de las comunicaciones mediante meteoros; 2) el efecto de diversos diagramas de antena sobre el comportamiento del sistema; 3) los compromisos globales de comportamiento relacionados con el empleo de polarización vertical y horizontal. Weitzen y Ralston [1988] han proporcionado un estudio relativo de los avances realizados sobre los fenómenos de dispersión por meteoros.

Este Informe resume los principales factores que determinan las características de la dispersión por meteoros y que deberían considerarse en el diseño de sistemas de comunicación que aprovechan este modo de propagación.

2. Distribución de los meteoros

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

La distribución de los meteoros esporádicos en relación con su masa es tal que el número de los que exceden de un valor de masa dada es, aproximadamente, inversamente proporcional a dicho valor. Los meteoros aparecen en todas las partes del mundo y a todas horas, pero la información estadística es incompleta en cuanto a su distribución geográfica y a las direcciones de las estelas.

De los datos de observaciones y de la teoría se puede obtener una estimación del número de meteoros incidentes en la atmósfera [Eshleman y Manning, 1954]. El flujo medio anual de meteoros incidentes por unidad de superficie y que producen densidades de líneas de electrones q que exceden un umbral q_0 por metro, $I(q > q_0)$ viene dado por:

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

Se sabe [Manning y Eshleman, 1959] que los meteoros esporádicos presentan una variación de la incidencia diaria aproximadamente sinusoidal con un máximo a las 06h00 y un mínimo a las 18h00, hora local. El valor medio de la relación entre el máximo y el mínimo es aproximadamente 4. Existe una variación estacional de similar magnitud con un mínimo en febrero y un máximo en julio [Sites, 1978]. Existe una variabilidad día a día en la incidencia tanto de los meteoros esporádicos como en los de precipitación. Algunas estadísticas combinadas de la incidencia diaria de los dos tipos se indican en Millman, [1978].

3. Posiciones de las regiones de óptima dispersión

Las propiedades de dispersión de las estelas rectas de ionización meteóricas son fuertemente sensibles a la forma. Para que sean efectivas es necesario que las estelas satisfagan aproximadamente una condición de reflexión especular. Esto requiere que la estela ionizada sea tangencial a un esferoide oblongo cuyos focos son los terminales transmisor y receptor (véase la fig. 1). En la superficie celeste más efectiva, la fracción de estelas meteóricas incidentes que se espera tengan orientaciones útiles es aproximadamente de un 5% [Eshleman y Manning, 1954]. La fig. 2 muestra los porcentajes estimados de estelas útiles para una separación entre terminales de 1000 km. Se puede ver que las regiones óptimas de dispersión se sitúan alrededor de 100 km a cada lado del círculo máximo, independientemente de la longitud del trayecto.

Este aspecto, junto con el hecho de que las estelas se encuentran fundamentalmente a una altura entre 90 y 110 km, sirven para establecer las dos regiones de «manchas calientes» hacia las que deberían dirigirse ambas antenas. Las dos manchas calientes varían de importancia relativa según la hora del día y la orientación del trayecto [Eshleman y Manning, 1954]. Generalmente, las antenas utilizadas en la práctica tienen haces suficientemente anchos como para cubrir las dos manchas calientes. Así no se optimiza el comportamiento pero por otro lado se evita la necesidad del balanceo del haz. Sin embargo, en los sistemas experimentales se ha utilizado un haz escindido con un nulo a lo largo del trayecto según el círculo máximo [Davis y otros, 1957].

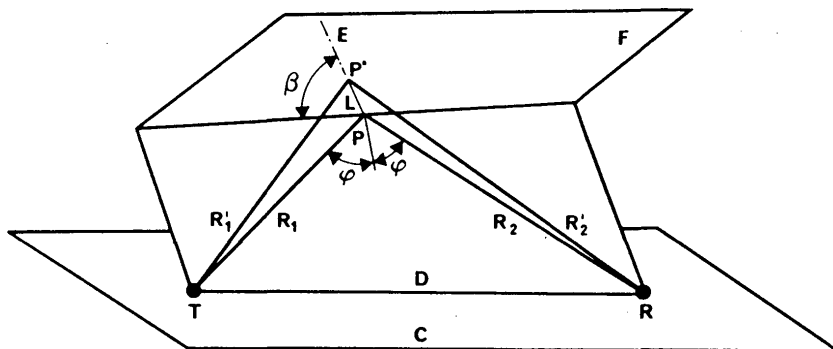


FIGURA 1 – Geometría de los rayos en un trayecto de propagación por impulsos meteóricos

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

(Véase el punto 5 del texto para una explicación de los términos L, P, P', R₁, R₂, R'₁, R'₂ y ϕ)

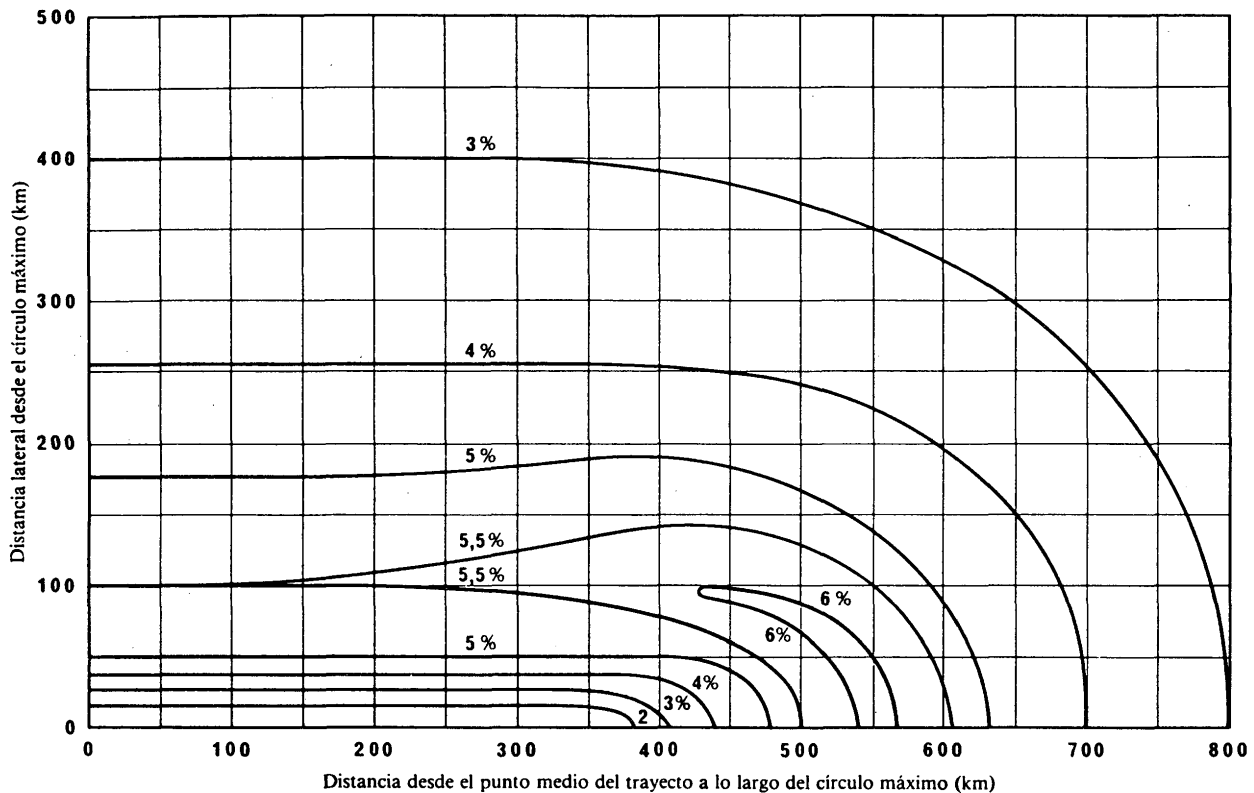


FIGURA 2 – Porcentajes estimados de estelas útiles en función de la posición donde se produce la dispersión para una separación entre terminales de 1000 km [Eshleman y Manning, 1954]

4. Estelas subdensas y superdensas

Las estelas ionizadas provocadas por los meteoros pueden clasificarse en subdensas y superdensas según la intensidad de ionización. Se puede calcular la amplitud de las señales dispersadas por estelas subdensas sumando el campo dispersado que surge de cada electrón individual. Las estelas superdensas son aquellas para las cuales el acoplamiento entre los electrones no puede ignorarse, en cuyo caso, las propiedades reflectantes se calculan como si la estela fuera un largo cilindro metálico. La frontera entre ambos casos se sitúa en densidades de líneas de aproximadamente 2×10^{14} electrones por metro. A las frecuencias utilizadas en la práctica los ecos de las estelas subdensas muestran un comienzo abrupto seguido de una caída exponencial, mientras que los de las estelas superdensas tienen envolventes más redondeadas y son de superior duración [Sugar, 1964]. Las proporciones relativas de los ecos en las estelas subdensas y superdensas dependerán de la sensibilidad del sistema.

Las amplitudes de cresta de las reflexiones de las estelas superdensas y subdensas varían como $q^{1/4}$ y q , respectivamente, donde q es la densidad de líneas de electrones. Puesto que q es proporcional a la masa del meteorito, y puesto que la tasa de incidencia de los meteoritos esporádicos que exceden una determinada masa es inversamente proporcional a esta masa aproximadamente, el número de señales, N , observadas en un tiempo dado con amplitudes de cresta superiores a un determinado nivel A es el siguiente:

$$\text{Para estelas subdensas: } N \sim A^{-1} \quad (2)$$

$$\text{Para estelas superdensas: } N \sim A^{-4} \quad (3)$$

De esta forma 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 ahora es el de $N \sim A^{-1.2}$, que indica que los ecos provienen de forma predominante de las estelas subdensas. El mismo resultado se puede expresar como:

$$D_C \sim p_R^{-0.6} \quad (4)$$

donde

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

p_R : potencia recibida correspondiente al umbral A .

El ciclo de trabajo puede expresarse por tanto como:

$$D_c \sim p_T^{0.6} \quad (5)$$

donde

p_T : potencia del transmisor.

5. Longitud efectiva, altura media y radio de las estelas meteóricas

Considérese la geometría de los rayos para un trayecto de propagación mediante impulsos meteóricos entre el transmisor T y el receptor R, que se indica en la fig. 1. P representa el punto de tangencia y P' un punto más allá en la estela tal que $(R'_1 + R'_2)$ excede $(R_1 + R_2)$ en media longitud de onda. Así PP' (de longitud L) está dentro de la zona principal de Fresnel y la longitud total de la estela dentro de esta zona es $2L$. Siempre que R_1 y R_2 sean muy superiores a L se cumple que:

$$L = \left[\frac{\lambda R_1 R_2}{(R_1 + R_2) (1 - \sin^2 \varphi \cos^2 \beta)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

donde

φ : ángulo de incidencia,

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

y

λ : longitud de onda.

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. Estas suposiciones conducen a una ecuación para la densidad de volumen, N_v , en electrones por metro cúbico en función del radio, r , y del tiempo desde el momento de formación, t , que es:

$$N_v(r, t) = \frac{q}{\pi (4Dt + r_0^2)} \exp \left[\frac{-r^2}{(4Dt + r_0^2)} \right] \quad (7)$$

donde

q : densidad de líneas de electrones por metro,

D : coeficiente de difusión ambipolar ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$),

y

r_0 : radio inicial de la estela (m).

Tanto D como r_0 varían estrechamente con la altura. De los resultados experimentales [Greenhow y Hall, 1960] se pueden deducir las siguientes fórmulas empíricas para el cálculo de la altura media de las estelas, que es función de la frecuencia (véase el punto 8):

$$h = -17 \log f + 124 \quad (8)$$

donde

h : altura media de la estela (km),

y

f : frecuencia de la onda (MHz).

La altura media de la estela es función de los otros parámetros del sistema además de la frecuencia. Sin embargo la ecuación (8) es una buena aproximación.

Se han deducido diferentes relaciones empíricas entre el radio de la estela inicial y la altura del meteoro. Brown y Williams [1978] dan la siguiente expresión media:

$$\log r_0 = 0,035 h - 3,45 \quad (9)$$

6. Constante de difusión ambipolar

Una buena estimación de la constante de difusión ambipolar viene dada por la expresión [Greenhow y Neufeld, 1955; McKinley, 1961].

$$\log D = 0,067 h - 5,6 \quad (10)$$

Basándose en los resultados de Greenhow y Hall [1960], se puede aproximar la razón entre la constante de difusión ambipolar D , y la velocidad del meteoro V (requerida en el cálculo de la potencia recibida) por:

$$D/V = [0,0015 h + 0,035 + 0,0013 (h - 90)^2] 10^{-3} \quad (11)$$

donde

V : velocidad del meteoro (m/s).

7. Potencia recibida

7.1 Estelas subdensas

La potencia recibida, $p_R(t)$, después de la dispersión en las estelas subdensas a las frecuencias utilizadas en la práctica viene dada [McKinley, 1961; Sugar, 1964] como sigue:

$$p_R(t) = \frac{p_T g_T g_R \lambda^2 \sigma a_1 a_2(t) a_2(t_0) a_3}{64\pi^3 R_1^2 R_2^2} \quad (12)$$

donde

- λ : longitud de onda (m),
 - σ : superficie de reflexión de la estela (m²),
 - a_1 : coeficiente de pérdida debido al radio inicial de la estela,
 - $a_2(t)$: coeficiente de pérdida debido a la difusión de la estela,
 - 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 del 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.

La superficie de reflexión viene dada por:

$$\sigma = 4 \pi r_e^2 q^2 L^2 \sin^2 \alpha \quad (13)$$

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 (13) es entonces próximo a la unidad para las estelas en las dos manchas calientes.

El factor de pérdida a_1 viene expresado por:

$$a_1 = \exp \left[-\frac{8\pi^2 r_0^2}{\lambda^2 \sec^2 \varphi} \right] \quad (14)$$

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:

$$a_2(t) = \exp \left[-\frac{32\pi^2 D t}{\lambda^2 \sec^2 \varphi} \right] \quad (15)$$

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. 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 ($\beta = 90^\circ$):

$$t_0 \approx \left(\frac{\lambda R}{2 V^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

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

$$t_0 \approx \left(\frac{\lambda R}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{\sec \varphi}{V} \quad (17)$$

Substituyendo en la ecuación (15) t_0 dado por la ecuación (16), se obtiene para el caso $\beta = 90^\circ$:

$$a_2(t_0) = \exp \left[-\frac{32\pi^2}{\lambda^{3/2}} \left(\frac{D}{V} \right) \left(\frac{R}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sec^2 \varphi} \right] \quad (18)$$

Para $\beta = 0^\circ$, la expresión entre corchetes de la ecuación (18) hay que multiplicarla por $\sec \varphi$.

$a_2(t)$ 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:

$$T_{un} = \frac{\lambda^2 \sec^2 \varphi}{16\pi^2 D} \quad (19)$$

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.

7.2 Estelas superdensas

La fórmula de la potencia recibida para el caso de estelas superdensas se basa generalmente en el supuesto de reflexión sobre un cilindro metálico cuya superficie coincide con la región donde la constante dieléctrica es nula [McKinley, 1961; Sugar, 1964]. Se desprecia generalmente el efecto de la refracción en la porción subdensa de la estela. Como en el caso subdenso, la potencia recibida varía en función de λ^3 y la duración del eco según λ^2 . Sin embargo la máxima potencia recibida es ahora proporcional a $q^{1/2}$ en lugar de ser proporcional a q^2 como en las estelas subdensas. De esta forma, el incremento de la potencia recibida con la intensidad de ionización es más modesto.

7.3 Valores típicos de la pérdida básica de transmisión

Puesto que cualquier sistema práctico de comunicación por impulsos meteóricos cuenta principalmente con estelas subdensas, las fórmulas para el caso superdenso tienen menor importancia. Utilizando las fórmulas para el caso subdenso se pueden realizar entonces estimaciones satisfactorias del comportamiento, suponiendo valores de q en la gama de 10^{13} a 10^{14} electrones/m según los parámetros predominantes del sistema.

En la fig. 3 se presentan las curvas de la pérdida básica de transmisión deducidas de la ecuación (12) 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 (8). Convendría resaltar que la predicción del comportamiento del sistema depende en forma crítica de las alturas supuestas.

8. El techo de eco subdenso

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 $a_2(h)$ 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 presentada por McKinley [1961] 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. Milson [1979] proporciona un procedimiento para estimar el número de impulsos meteóricos que se pueden detectar, basado en una valoración del techo del eco subdenso.

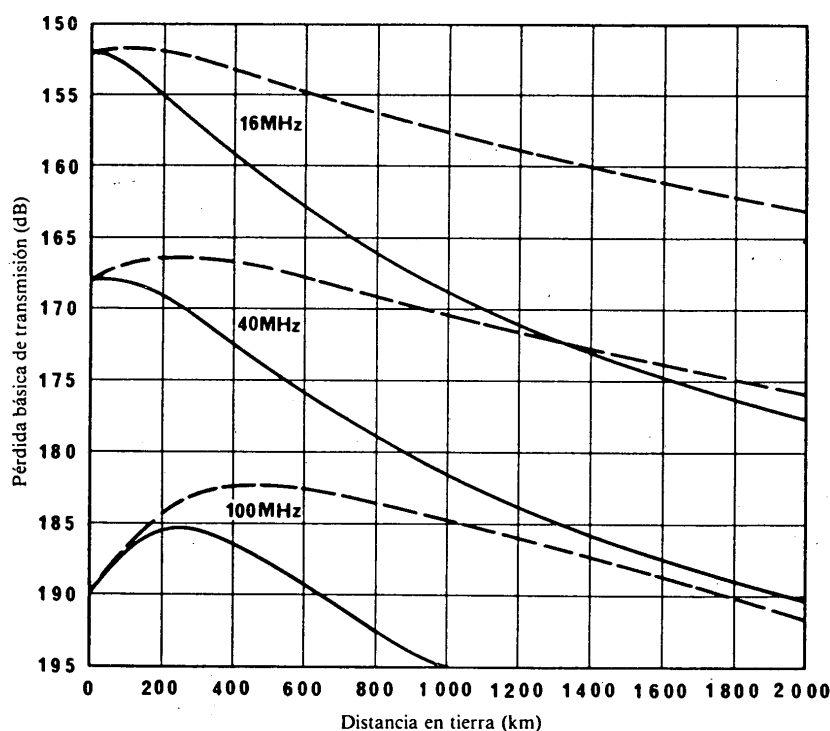


FIGURA 3 - Pérdida básica de transmisión para estelas subdensas dada por la ecuación (13) con $q = 10^{14}$ electrones/m y polarización horizontal

- Estelas perpendiculares al plano de propagación ($\beta = 90^\circ$)
- - Estelas en el plano de propagación ($\beta = 0^\circ$)

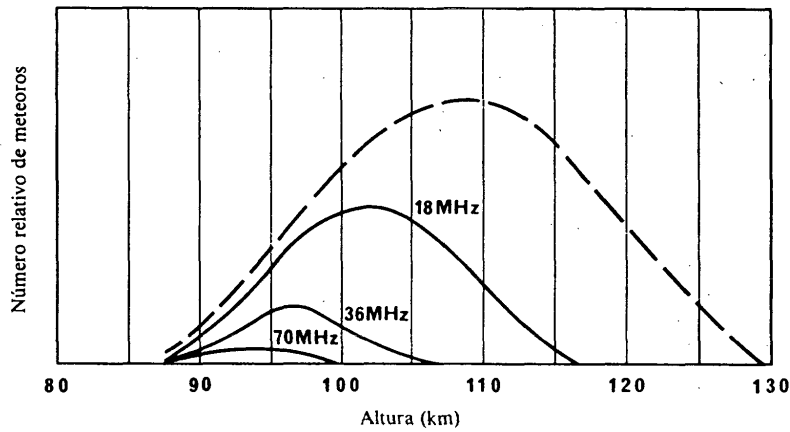


FIGURA 4 – Distribución de la altura de los meteoros subdensos que proporcionan ecos a frecuencias de 18, 36 y 70 MHz [McKinley, 1961]

— — Distribución estimada de las estelas meteóricas

9. Dependencia del ciclo de trabajo de información con la longitud de onda

Las dependencias con la longitud de onda de la máxima potencia recibida, $p_{R\text{máx}}$ y del ciclo de trabajo, D_C , como está implícito en la ecuación (12) son las mismas que para la potencia del transmisor fijo y para las ganancias de las antenas:

$$p_{R\text{máx}} \sim \lambda^3 \quad (20)$$

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 relación intermedia entre las de las ecuaciones (2) y (3) de la forma $N \sim A^{-2}$, entonces $N \sim p_{R\text{máx}}^{-1}$ y el ciclo de trabajo varía con la longitud de onda como sigue:

$$D_C \sim p_{R\text{máx}} T_{un} \sim \lambda^5 \quad (21)$$

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 excede una relación señal/ruido dada, varía con la longitud de onda como sigue:

$$I_C \sim \lambda^{2.7} \quad (22)$$

Un estudio más completo de esta relación, en varios supuestos, se encuentra en [Eshleman 1957]. Puesto que la potencia de ruido es proporcional a la anchura de banda, B , la utilización de la ecuación (4) conduce a:

$$I_C \sim B^{-0.6} \quad (23)$$

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 tanto la capacidad media del canal está relacionada con la anchura de banda como sigue:

$$C \sim B^{0.4} \quad (24)$$

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

Dejando aparte la cuestión de la disponibilidad de la anchura de banda, el incremento de ruido en una anchura de banda mayor y por tanto 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 mayor retardos en los mensajes. Además, se alcanza un punto donde el sistema tiene que aprovechar las estelas superdensas en cuyo caso la ecuación (4) deja de ser válida, como se puede ver comparando los exponentes de N en las ecuaciones (2) y (3). Cuando el exponente de p_R al que es proporcional D_G , se hace inferior a -1 , no existe ninguna ventaja en aumentar la velocidad de transmisión de la señal [Montgomery y Sugar, 1957]. Se puede observar que el exponente debe ser inferior a -1 para frecuencias inferiores a 40 MHz al considerar señales de dispersión ionosférica que enmascaran las señales más débiles por impulsos meteóricos.

La anchura de banda utilizable no es probable que esté limitada por la anchura de banda de coherencia, puesto que ésta es del orden de varios MHz para la parte principal del impulso [Akram y otros, 1977]. Aun 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. Consideraciones prácticas para la elección de frecuencia

La elección de la frecuencia en un sistema de comunicaciones por impulsos meteóricos se ve limitada por diversos factores. En primer lugar, la ecuación (22) ha demostrado que el ciclo de trabajo de la información aumenta cuando se reduce la frecuencia. En segundo lugar, la alta pérdida del trayecto asociada con las señales para comunicación por impulsos meteóricos exige mantener al mínimo el nivel de señales interferentes. Por tanto, la frecuencia de trabajo debe ser superior a la correspondiente a la propagación por los modos ionosféricos normales. En tercer lugar, conviene minimizar la absorción, lo que también exigirá la utilización de la frecuencia más elevada posible. Esto es particularmente importante en los sistemas que operan a elevadas latitudes, donde la absorción auroral y el casquete polar puede atenuar e incluso absorber totalmente la señal si la frecuencia de explotación es demasiado baja [Maynard, 1968]. Por último, Cannon [1986] ha demostrado que, en ciertos momentos, la rotación Faraday de las señales para comunicación por impulsos meteóricos linealmente polarizadas reducirá seriamente la capacidad del enlace de comunicaciones a frecuencias inferiores a unos 40 MHz. Evidentemente, la primera limitación está en contradicción con las tres últimas, por lo que, cuando elija la frecuencia, el diseñador del sistema ha de juzgar el peso que conviene dar a cada una de ellas.

11. Efectos Doppler

La reflexión en la cabeza del meteoro provoca desplazamientos de frecuencia por efecto Doppler que pueden abarcar toda la banda audible. El desplazamiento de frecuencia por efecto Doppler causado por la estela meteórica resulta de los movimientos del viento ionosférico y puede ser del orden de 20 Hz a 40 MHz [Millman, 1978].

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKRAM, F., SHEIKH, N. M., JAVED, A. y GROSSI, M. D. [1977] Impulse response of a meteor-burst communications channel determined by ray-tracing techniques. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-25, 467-470.
- ALLEN, E. W., hijo [1948] Reflections of very-high frequency radio waves from meteoric ionization. *Proc. IRE*, Vol. 38, 346-352.
- BARTHOLOMÉ, P. J. y VOGT, I. [1968] COMET - A new meteor-burst system incorporating ARQ and diversity reception. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-16, 268-278.
- BROWN, D. W. y WILLIAMS, H. P. [1978] The performance of meteor-burst-communications at different frequencies. *Aspects of Electromagnetic Wave Scattering in Radio Communications*. Ed. A. N. Ince. AGARD Conf. Proc., 244, 24-1 to 24-26.
- CANNON, P. S. [1986] Polarization rotation in meteor burst communication systems. *Radio Sci.*, Vol. 21, 3, 500-510.
- CANNON, P. S. y REED, A. P. C. [1987] - The evolution of meteor-burst communications systems. J. Institution of Electronics and Radio Engineers, Vol. 57, Nº 3, 101-112.
- DAVIS, G. W. L., GLADYS, S. J., LANG, G. R., LUKE, L. M. y TAYLOR, M. K. [1957] The Canadian «JANET» system. *Proc. IRE*, Vol. 45, 1666-1678.
- ESHLEMAN, V. R. [1957] On the wavelength dependence of the information capacity of meteor-burst propagation. *Proc. IRE*, Vol. 45, 1710-1717.
- ESHLEMAN, V. R. y MANNING, L. A. [1954] Radio communication by scattering from meteoric ionization. *Proc. IRE*, Vol. 42, 530-536.
- FORSYTH, P. A., VOGAN, E. L., HANSEN, D. R. e HINES, C. O. [1957] The principles of JANET - a meteor-burst communication system. *Proc. IRE*, Vol. 45, 1642-1657.

- GREENHOW, J. S. y HALL, J. E. [1960] The importance of initial trail radius on the apparent height and number distributions of meteor echoes. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, Vol. 121, 183-196.
- GREENHOW, J. S. y NEUFELD, E. L. [1955] The diffusion of ionized meteor trails in the upper atmosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 6, 133-140.
- HAACKINSON, E. J. [1983] Meteor burst communications model. NTIA Rep. 83-116, PB83-194134. US Dept. of Commerce, Office of Telecommunications, Institute for Telecommunication Sciences, Boulder, CO, Estados Unidos de América.
- INCE, A. N., VOGT, I. M. y WILLIAMS, H. P. [1978] A review of scatter communications. AGARD Conf. Proc. No. 244, *Aspects of Electromagnetic Wave Scattering in Radio Communications*, 21-1 to 21-31. Ed. A. N. Ince. NASA Accession No. N79-10299. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Estados Unidos de América.
- KOKJER, K. J. y ROBERTS, T. D. [1986] - Networked meteor-burst data communication. *IEEE Communications Magazine*, 24, 11, 23-29.
- MANNING, L. A. y ESHLEMAN, V. R. [1959] Meteors in the ionosphere. *Proc. IRE*, Vol. 47, 186-199.
- MAYNARD, L. A. [1968] Meteor-burst communications in the Arctic. *Ionospheric Radio Propagation*, 165-173. Plenum Press, Nueva York, N.Y., Estados Unidos de América.
- McKINLEY, D. W. R. [1961] *Meteor Science and Engineering*. McGraw-Hill Book Co. Inc., Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- MILLMAN, G. H. [1978] HF scatter from overdense meteor trails. *Aspects of Electromagnetic Wave Scattering in Radio Communications*. Ed. A. N. Ince. AGARD Conf. Proc., 244, 6-1 to 6-14.
- MILSON, J. D. [1979] Some aspects of meteor-burst communications system design. Marconi Survey Series, 79/9A.
- MINULLIN, R. G., PALII, G. N., SIDOROV, V. V., SUKHOTSKII, A. V. e IVANOVA, Yu. D. [1971] Time measurements-locking in to the state standard of time by using reflections from meteors. 1971 Consultants Bureau, Plenum Publishing Corp., Nueva York. Trans. from *Izmeritel'naya Tekhnika*, 1, 22-24.
- MONTGOMERY, G. F. y SUGAR, G. R. [1957] The utility of meteor bursts for intermittent radio communication. *Proc. IRE*, Vol. 45, 1684-1693.
- PICKARD, G. W. [1931] A note on the relation of meteor showers and radio reception. *Proc. IRE*, Vol. 19, 1166-1170.
- SANTEFORD, H. S. [1976] Meteor burst communication system: Alaska winter field test program. NOAA Tech. Memo NWS-Hydro-30, PB-260 449/4. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Boulder, CO 80303, Estados Unidos de América.
- SITES, F. J. [1978] Communications via meteor trails. *Aspects of Electromagnetic Wave Scattering in Radio Communications*. Ed. A. N. Ince. AGARD Conf. Proc., 244, 25-1 to 25-21.
- SMITH, H. C. [1978] Meteor-burst data communication system. 28th Annual Conference of the IEEE Vehicular Technology Society, 22-24 March, Denver, Colo, Estados Unidos de América, Conf. Record, 497-502.
- SUGAR, G. R. [1964] Radio propagation by reflection from meteor trails. *Proc. IEEE*, Vol. 52, 116-136.
- VINCENT, W. R., WOLFRAM, R. T., SIFFORD, B. M., JAYE, W. E. y PETERSON, A. M. [1957] A meteor-burst system for extended range VHF communications. *Proc. IRE*, Vol. 45, 1693-1700.
- WEITZEN, J. A. [1986] - Predicting the arrival of meteors useful for meteor burst communication. *Radio Science*, Vol. 21, 1009-1020.
- WEITZEN, J. A. y RALSTON, W. T. [1988] Meteor scatter - an overview. *IEEE Trans. Ant. y Prop.*, Vol. 36, N° 12, 1813-1819.