

INFORME UIT-R P.2011

PROPAGACIÓN EN FRECUENCIAS POR ENCIMA DE LA MUF BÁSICA

(1997)

1 Introducción

La Recomendación UIT-R P.373 define la MUF básica como «la frecuencia más elevada en que una onda radioeléctrica puede propagarse entre determinadas estaciones terminales, en un momento dado, mediante refracción ionosférica solamente». La Recomendación reconoce además que ello no determina necesariamente la máxima frecuencia de transmisión en esas circunstancias puesto que también presenta una definición para la MUF operacional.

Los diversos mecanismos que pueden contribuir a la propagación por encima de la MUF básica se describen en el § 2. Sin embargo, esta situación se complica por dos razones principales, a saber:

- la definición implica que la MUF básica viene determinada por el modo de propagación extraordinario, sin tener en cuenta ninguna diferencia en la amplitud de la señal con respecto al modo ordinario;
- a efectos de la UIT es necesario predecir las intensidades de la señal; tales predicciones se basan en mapas mensuales de los valores medianos de las características ionosféricas y los valores instantáneos de la MUF básica no serán conocidos. Además, la variabilidad día a día de las características ionosféricas puede dar lugar a que la frecuencia utilizada para las comunicaciones se encuentre algunos días por encima de la MUF básica y otros días por debajo.

Cabe señalar que los valores de la MUF básica instantánea sólo pueden determinarse mediante el examen de los ionogramas de incidencia oblicua medidos a lo largo del trayecto de propagación. Puede obtenerse una aproximación utilizando unos sondeos de incidencia vertical correctamente emplazados y suponiendo homogeneidad de la ionosfera en todo el trayecto. Cabe señalar que los sistemas de evaluación de canal en tiempo real no ofrecerán generalmente una indicación clara sobre la MUF básica.

2 Mecanismos de propagación responsables de la propagación en frecuencias por encima de la MUF básica

Los mecanismos de propagación y las características ionosféricas que pueden dar lugar a una propagación en frecuencias por encima de la MUF básica son los siguientes:

2.1 Irregularidades ionosféricas

Las irregularidades en la ionosfera, detectadas mediante ionogramas de incidencia vertical como dispersión en la capa F, con dispersión en cualquier gama de frecuencias, pueden permitir la propagación por refracción o por dispersión en frecuencias por encima de la MUF básica en la mayoría de esa región de la ionosférica. Este mecanismo puede constatarse mediante ionogramas de incidencia oblicua en los que la máxima frecuencia observada viene determinada por una «ampliación» más allá de la frecuencia de unión. Cabe esperar que las irregularidades ionosféricas tengan densidades de electrones proporcionales al volumen ionosférico total, por consiguiente este efecto puede estar relacionado con la MUF básica.

2.2 Retrodispersión en la superficie y dispersión lateral

Trayectos de dos saltos, fuera del círculo máximo y en una región de dispersión en la superficie de la Tierra con retorno al emplazamiento de recepción, pueden permitir la propagación a frecuencias de hasta la MUF básica de 4 000 km. El coeficiente de dispersión en la superficie depende del acimut, de la presencia de tierra o mar, de las irregularidades del terreno y del enfoque debido a la curvatura ionosférica para ángulo de radiación rasantes. La intensidad de la retrodispersión en frecuencias superiores a la MUF básica para el trayecto deseado dependerá de la relación entre la longitud del trayecto y la longitud de 4 000 km y variará como un múltiplo de la MUF básica.

2.3 Retrodispersión en modo de orden superior

Como una ampliación del caso de retrodispersión en la superficie con dos saltos, puede haber una retrodispersión desde distancias superiores, lo que supone propagación por múltiples saltos, cuando existen unos gradientes de densidad electrónica horizontal en la ionosfera significativos.

2.4 Modos de propagación por conducto

En algunos casos una radiación con ángulo bajo puede penetrar en conductos formados por perfiles de altura de densidad electrónica particular. En tales casos, puede ser posible la propagación a larga distancia y a mayores frecuencias de la MUF básica. Este mecanismo, combinado por ejemplo con la retrodispersión en la superficie fuera del círculo máximo, puede contribuir a que se produzca una propagación a una frecuencia superior a la MUF básica.

2.5 Propagación cordal por saltos

Las inclinaciones en la ionosfera, fundamentalmente a ambos lados del ecuador magnético pero también en las depresiones subaurorales, pueden permitir trayectos de rayos que van de una refracción en un emplazamiento a otra, sin que se produzca una reflexión en el suelo intermedia. Se ha observado una propagación transecuatorial de este tipo hasta frecuencias bastante elevadas en la gama de ondas métricas, quizá asociada con las irregularidades ionosféricas. Este modo, combinado con la retrodispersión en la superficie, puede dar lugar a una propagación muy significativa por encima de la MUF básica.

2.6 Dispersión ionosférica directa

La energía de la señal puede dispersarse desde cualquiera de las regiones ionosféricas, tanto a lo largo de un trayecto de círculo máximo como en otras orientaciones. En latitudes elevadas, aurorales y ecuatoriales los fuertes gradientes de densidad de ionización pueden permitir una dispersión significativa en la región F, pero cuando los gradientes no son intensos probablemente la dispersión por la región E es más importante y, en este caso, se limitaría a distancias de unos 2 000 km. El Informe 260-2 del ex CCIR (1974) (oficialmente suprimido) considera con detalle el modo de dispersión ionosférico. Este Informe indica que, al menos para frecuencias por encima de 30 MHz, la intensidad de la señal varía en razón inversa de la potencia $7,5$ de la frecuencia.

2.7 Propagación por la capa E esporádica

La aparición de la capa E esporádica puede permitir la propagación, por reflexión parcial o por dispersión, a frecuencias muy elevadas. Puede que este modo de propagación no sea reconocido y, en cualquier caso, no se incluye en muchos procedimientos de predicción. Por consiguiente, puede considerarse como otro fenómeno que contribuye a la propagación por encima de la MUF básica esperada, para unas longitudes de trayecto de hasta 2 000 km.

2.8 Dispersión auroral

Las irregularidades alineadas con el campo en la región auroral, asociadas con las perturbaciones geomagnéticas, son un caso especial de la capa E esporádica. Las reflexiones en estas irregularidades obedecen a unas condiciones particulares de specularidad, pero en esas condiciones es posible una propagación en frecuencias bastante elevadas de la gama de ondas métricas. Aunque se ha observado propagación multisalto, el efecto generalmente se limitará a longitudes de trayecto inferiores a 2 000 km.

2.9 Dispersión por meteoros

En la Recomendación UIT-R P.843 se considera la propagación mediante reflexión o dispersión por ionización meteórica transitoria. Si se dan las circunstancias geométricas adecuadas, pueden aparecer fenómenos de propagación de corta duración en frecuencias elevadas de la gama de ondas métricas para longitudes de trayecto inferiores a 2 000 km.

3 Datos de medición recopilados

La mayoría de los datos de medición limitados actuales incluyen ejemplos de variaciones de la intensidad de la señal con la frecuencia, o con el tiempo al variar la MUF básica, sobre trayectos específicos. Estas mediciones se describen en Hagn y otros [1993]. Los datos de que se dispone no son suficientes para el establecimiento de modelos completos que incluyan la dependencia con la longitud del trayecto, el emplazamiento, la hora, etc.

4 Modelos estadísticos de la intensidad de señal en frecuencias por encima de la MUF básica

Los bancos de datos del UIT-R incluyen observaciones de la intensidad de señal en frecuencias superiores a la MUF básica, aunque se desconocen los valores para dicha MUF básica correspondientes a cada medición y no han podido determinarse sin mediciones adicionales especiales. Los resultados se tratan de forma estadística.

Cabe señalar que la variación día a día en un mes de la MUF básica tendrá una gama interdecilos del 30 al 40% del valor mediano de la MUF básica. Las frecuencias utilizadas para las comunicaciones en esta gama serán algunos días inferiores a la MUF básica y otros días, superiores. Por consiguiente, para establecer modelos de estas circunstancias debe combinarse la intensidad de la señal para un trayecto con refracción a la frecuencia inmediatamente por debajo de la MUF básica con las contribuciones de la propagación por encima de la MUF básica descrita anteriormente y a continuación incluir los valores estadísticos de la variabilidad día a día.

Este método dará una estimación de la probabilidad de que aparezca un determinado valor de la intensidad de la señal y ello puede ser adecuado para evaluar la compatibilidad. Sin embargo, puede que el método no sea apropiado para predecir la calidad de funcionamiento del circuito cuando la función de transferencia de canal en términos de tasa de desvanecimiento, la dispersión del retardo y la dispersión y deriva de la frecuencia pueden ser distintas para frecuencias por debajo y por encima de la MUF básica.

5 Definición de pérdidas ABM

La reducción de la intensidad de la señal en frecuencias por encima del valor mediano mensual de la MUF básica del trayecto, con respecto a la intensidad en un trayecto con refracción a una frecuencia inmediatamente por debajo de la MUF básica, se denomina pérdidas ABM.

6 Fórmulas existentes para las pérdidas

Las diversas fórmulas propuestas para las pérdidas ABM se describen en Hagn y otros [1993].

6.1 El modelo Phillips-Abel

Este modelo, basado en mediciones efectuadas en Estados Unidos de América, es el único que tiene por objeto relacionar los valores instantáneos de la MUF básica. El modelo supone que la ionosfera está compuesta por un cierto número de zonas que produce cada una de ellas una MUF básica para el trayecto distinta. Se supone, además, que estas MUF presentan una distribución normal y la desviación típica de la variación de la MUF espacial, σ , es el parámetro utilizado en el modelo.

Phillips señala un valor de σ entre 1 y 4 MHz, dependiendo de la perturbación ionosférica, para una longitud del trayecto de unos 3 000 km. Posteriores mediciones llevadas a cabo por Wheeler y Hagn han indicado unos valores para σ comprendidos entre 0,9 y 3 MHz.

En este modelo, las pérdidas por encima de la MUF, L_m , (dB), vienen dadas por la expresión:

$$L_m = 10 \log p$$

siendo:

$$p = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x/a} \exp(-x/2\sigma) d(x/a) \quad \text{y } x = f - f_b$$

Obsérvese que este modelo utiliza la diferencia entre la frecuencia de funcionamiento, f , y la MUF básica, f_b .

6.2 El modelo de la Recomendación UIT-R P.533

Para distancias de hasta 7 000 km, la Recomendación UIT-R P.533 predice el valor de L_m para cada uno de los modos de propagación considerados antes de llevar a cabo un sumatorio para obtener la intensidad de campo global.

En dicha Recomendación se indican los criterios para considerar cada modo potencial y para estos modos el valor de L_m viene dado por:

$$L_m = 0 \text{ dB}$$

cuando $f \leq f_b$ para el modo considerado.

Para los modos E (hasta una distancia máxima de 4 000 km) y cuando $f > f_b$

$$L_m = 130 \left[\frac{f}{f_b} - 1 \right]^2 \text{ dB, ó 81 dB tomándose entre ambos valores el menor.}$$

Para modos F2 (hasta una distancia de 7 000 km), y cuando $f > f_b$

$$L_m = 36 \left[\frac{f}{f_b} - 1 \right]^{1/2} \text{ dB, ó 62 dB tomándose entre ambos valores el menor.}$$

El modelo no incluye específicamente las pérdidas ABM para distancias superiores a 9 000 km.

Obsérvese que este modelo utiliza la relación entre la frecuencia de funcionamiento, f , y la MUF básica, f_b .

7 Factores que deben considerarse para ulterior desarrollo de fórmulas sobre las pérdidas ABM

7.1 Modelo magnetoiónico que debe suponerse para la determinación de la MUF básica

La Recomendación UIT-R P.533 utiliza el valor mediano mensual previsto en el modo de onda o para la MUF básica de la región E y el valor mediano mensual en el modo de onda x para la región F2. Ello puede representar la mejor referencia de frecuencias para las fórmulas de las pérdidas ABM, pero esta conclusión debe confirmarse.

7.2 Referencia de amplitud

Se supone unas pérdidas ABM de 0 dB a frecuencias inferiores al valor mediano mensual de la MUF básica para el modo correspondiente. Por consiguiente, según la Recomendación UIT-R P.533 parece adecuado predecir las pérdidas ABM con respecto a la intensidad de campo o a la intensidad de señal previstas para el valor mediano mensual de la MUF básica, ignorando la absorción de desviación. Esta referencia parece apropiada para las formulaciones basadas en los conceptos actualmente utilizados, pero puede que convenga emplear otras referencias si se formulan modelos de maneras distintas.

7.3 Factor de proporcionalidad de la frecuencia

Como se ha indicado anteriormente, el procedimiento recomendado utiliza la relación entre la MUF básica y la frecuencia de funcionamiento mientras que el método Phillips-Abel utiliza la diferencia de frecuencias. Los diversos mecanismos descritos en el § 2 probablemente dependerán de la relación entre las frecuencias o variarán con la frecuencia absoluta independientemente de la MUF básica para el trayecto. Por consiguiente, para ondas decamétricas parece conveniente basar la formulación en la relación entre frecuencias. Si se establecen métodos para la evaluación de la compatibilidad en ondas métricas puede que convenga utilizar una formulación que no incluya la MUF básica para el trayecto.

7.4 Dependencia con la longitud del trayecto

Los actuales métodos no incluyen una dependencia con respecto a la longitud del trayecto. Sin embargo parece probable que predominen distintos mecanismos para longitudes de trayecto inferiores a 2 000 km, donde los modos de la región E son importantes, en comparación con el caso para trayectos de mayor longitud, en que la relación entre la MUF del trayecto y la MUF de 4 000 km puede ser importante.

7.5 Margen para la ganancia de antena de transmisión y recepción

La mayoría de los mecanismos descritos en el § 2 adquieren más importancia para ángulos de elevación bajos. En consecuencia, la propagación por encima de la MUF básica puede disminuir en importancia cuando se utilizan antenas con ángulos de elevación altos. Este efecto puede incluirse de forma general modificando la tendencia con la distancia de las pérdidas ABM para longitudes de trayecto cortas, suponiendo que se utilicen las antenas adecuadas para el trayecto deseado.

Además del mecanismo debido a las irregularidades ionosféricas, por el cual la relación de frecuencias puede ser limitada, y el mecanismo debido a la dispersión ionosférica directa, es probable que la mayoría de los mecanismos impliquen propagación fuera del círculo máximo. Se necesitan más estudios para determinar si debe utilizarse la ganancia de antena a lo largo del círculo máximo, la máxima ganancia de antena o alguna función de la ganancia de antena.

8 Calidad de las señales ABM para consideraciones de fiabilidad y compatibilidad

Algunos de los mecanismos descritos en el § 2 no exigen la existencia de una irregularidad ionosférica significativa pero dependen de la propagación normal en algún sentido junto con la retrodispersión en la superficie. En estos casos, es probable que la función transferencia de canal sea bastante similar a la de la propagación en frecuencias por debajo de la MUF básica.

Por otro lado, algunos mecanismos pueden ser muy significativos en algunos casos, por ejemplo en latitudes ecuatoriales o elevadas y en condiciones con perturbaciones magnéticas. En estos casos, la función de transferencia puede contener fuertes dispersiones en el tiempo de propagación y en la frecuencia con variaciones rápidas. De ser así, cabe esperar una degradación en la calidad de la señal vocal, especialmente de las señales musicales, particularmente en el caso de señales con modulación en doble banda lateral y detección por envolvente. La calidad de funcionamiento de los sistemas con modulación digital dependerá del diseño de la modulación y de la velocidad de señalización.

Por consiguiente, dependiendo de la sensibilidad del método de modulación a estos efectos, puede ser conveniente basar la determinación de la máxima frecuencia para la planificación de un servicio deseado en la MUF básica mientras que la evaluación de la interferencia a efectos de compatibilidad pueden basarse en una frecuencia más elevada que incluya la propagación ABM.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

HAGN, G.H., GIBSON, A.J. y BRADLEY, P.A. [mayo de 1993] Propagation on frequencies above the basic MUF. Proc. 7th International Ionospheric Effects Symposium, Alexandria, VA, Estados Unidos de América.

BIBLIOGRAFICA

ASHKALIYEV, Y.F. [1972] Behaviour of a high-frequency signal at the reception point when the operating frequency approaches the maximum usable frequency. *Geomag.i Aeronom.*, **2**, 305-306.

BAHAR, E. y BARRICK, D.E. [1983] Scattering cross sections for composite surfaces that cannot be treated as perturbed physical optics problems. *Radio Sci.*, Vol. 18, 129-137.

BRADLEY, P.A. [1989] Above the MUF loss. IEE Conf. Publ. No. 301 (2), 257-262. Proc. 5th International Conference on Antennas and Propagation.

CROFT, T.A. [1967] Computation of HF ground backscatter amplitude. *Radio Sci.*, Vol. 2, 739-746.

GIBSON, A.J. [1993] HF propagation at frequencies above the MUF by ground sidescatter, Part 1 (Theory). NRPP Research Note 137, Rutherford Appleton Laboratory, Reino Unido.

GIBSON, A.J. y BRADLEY, P.A. [1991] A new formulation for above the MUF loss. IEE Conf. Publ. No. 339, 122-125. Proc. 6th International Conference on Antennas and Propagation.

GIBSON, A.J. y BRADLEY, P.A. [1991] Above the MUF loss for E and F2 modes. CCIR, GTM 6/1, Doc. 383.

HUNT, K. [1991] Above the MUF loss for E and F2-modes. CCIR, GTM 6/1, Doc. 392.

KULIZHSKY, A.V. y TININ, M.V. [1993] Reflection and propagation of the radio signal in a multilayer medium with random large-scale irregularities. *Waves in Random Media*, **3**, 39-50.

- PHILLIPS, M.L. [1963] Auxiliary procedures used in theoretical evaluation of HF backscatter observations and other communications problems. External Tech. Memo. E14, 20-23, ITT Electro-Physics Labs., Hyattsville, MD, Estados Unidos de América.
- SILBERSTEIN, R. y DIXON, F. [1965] Great-circle and deviated-path observations on cw signals using a simple technique. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-13, 52-63.
- SUESSMANN, P. [1990] Proposal for a revised calculation of the over-the-MUF loss in Report 894. CCIR, GTM 6/1. Doc. 351(Rev.1).
- WAGEN, J.F. y YEH, K.C. [1986] A numerical study of waves reflected from a turbulent ionosphere. *Radio Sci.*, Vol. 21, **4**, 583-604.
- WHEELER, J.L. [1966] Transmission loss for ionospheric propagation above the standard MUF. *Radio Sci.*, Vol. 1, **11**, 1303-1308.
- ZERNOV, N.N. [1980] Scattering of waves of the SW range in oblique propagation in the ionosphere. *Radio Phys. Quantum Electron.*, Vol. 23, **2**, 109-114.
- ZERNOV, N.N., GHERM, V.E., ZASLOV, N. Yu y NIKITIN, A.V. [1992] The generalisation of Rytov's method to the case of inhomogeneous media and HF propagation and scattering in the ionosphere. *Radio Sci.* Vol. 27, **2**, 235-244.
- ZERNOV, N.N. y LUNDBORG, B. [1993] The statistical theory of wave propagation and HF propagation in the ionosphere with local inhomogenities. IRF Scientific Report 215, Swedish Institute of Space Physics, S-755 91, Uppsala, Suecia.
-