

SECCIÓN 5B: INFLUENCIA DEL TERRENO (INCLUIDA LA PROPAGACIÓN POR ONDA DE SUPERFICIE)

INFORME 714-2

PROPAGACIÓN DE LA ONDA DE SUPERFICIE EN UNA ATMÓSFERA EXPONENCIAL

(Cuestión 3/5)

(1978-1982-1990)

1. Introducción

En las antiguas curvas de propagación de la onda de superficie, que fueron sustituidas por las de la Recomendación 368 no se tenía en cuenta la refracción troposférica. Se consideraba la troposfera como el vacío; es decir, que su índice de refracción, n , y su índice de refracción modificado, m , eran:

$$n = 1, \quad m = n + \frac{h}{a} = 1 + \frac{h}{a} \quad (1)$$

donde h es la altura y a el radio de la Tierra.

En los Atlas del CCIR de las curvas de propagación de la onda de superficie para frecuencias superiores a 30 MHz [CCIR, 1955 y 1959], se ha considerado que el índice de refracción de la troposfera decrece linealmente con la altura, lo que se ha descrito por la relación:

$$n = n_s - \frac{k-1}{k} \cdot \frac{h}{a}, \quad m = n_s + \frac{h}{ka} \quad (2)$$

en la que $n_s \approx 1,0003$ es el valor de n en la superficie, y k el factor radio ficticio de la Tierra, que se supone de 4/3 en las curvas. La expresión (2) encierra la (1) para $n_s = k = 1$.

En realidad, la troposfera tiene un índice de refracción medio que varía exponencialmente con la altura:

$$n = 1 + (n_s - 1) \exp(-h/h_s) \quad (3)$$

donde $h_s (\approx 7 \text{ km})$ es la altura de la troposfera. Bean y Button [1966] han hecho una descripción completa de este modelo, que se ha aceptado como atmósfera de referencia en la Recomendación 369. Para $h \gg h_s$, tiende a la expresión (1). Para $h \ll h_s$, tiende a la expresión (2) con $h_s = ka(n_s - 1)/(k - 1)$.

En frecuencias inferiores a 10 MHz, los efectos altura-ganancia son pequeños para valores medios de la altura y, en parte, por este motivo, las curvas de propagación de la onda de superficie sólo se aplican al caso en que los dos terminales están situados al nivel del suelo. Por otra parte, por debajo de 3 MHz aproximadamente, la gama de alturas que entran en consideración para determinar el índice de atenuación del campo en función de la distancia sobre la superficie de la Tierra, se extiende hasta la región en que el índice de refracción de la troposfera empieza a separarse de modo apreciable del valor que corresponde a una disminución lineal con la altura apropiada para el empleo de un radio igual a 4/3 del radio terrestre. De ello se deduce que el índice de atenuación del campo en función de la distancia sobre la superficie de la Tierra no justifica el empleo de una atmósfera en la que el índice de refracción disminuye linealmente hasta alturas ilimitadas.

En el límite superior de 10 MHz, para las curvas de propagación de la onda de superficie que figuran en la Recomendación 368, se puede todavía, en la práctica, emplear un radio ficticio igual a 4/3 del radio verdadero de la Tierra para los puntos extremos situados al nivel del suelo; en cambio, la troposfera puede tener un efecto extremadamente pequeño en el límite inferior de 10 kHz, en el que la gama de alturas que entran en consideración para la determinación del índice de atenuación del campo en función de la distancia se extiende a varios kilómetros por encima de la Tierra. Entre el empleo de un radio ficticio igual a 4/3 del radio terrestre para 10 MHz y el empleo del radio verdadero en 10 kHz hay, por tanto, una transición que se acentúa hacia 3 MHz y que prácticamente desaparece en 10 kHz.

2. Análisis teórico

Durante estos últimos años, se ha elaborado en el Reino Unido [Rotheram, 1970] un método de análisis que permite tener en cuenta los efectos de una troposfera con una variación exponencial del índice de refracción en función de la altura. En los puntos siguientes se describen los métodos utilizados para calcular la intensidad de campo en varias aplicaciones.

2.1 Intensidad de campo cerca de la superficie a distancias cortas

La intensidad de campo creada por un transmisor cerca de la superficie vecina al mismo, puede definirse por la teoría de la Tierra plana de Sommerfeld. A medida que aumenta la distancia pueden aplicarse las correcciones debidas a la curvatura efectiva de la Tierra descritas por Bremmer [1949]. Aún deben aplicarse otras correcciones para una atmósfera exponencial. La teoría de Sommerfeld ampliada es útil hasta distancias del orden de $10 \lambda^{1/3}$ (km) y alturas del orden de $35 \lambda^{2/3}$ m, donde λ es la longitud de onda en metros.

2.2 Región de visibilidad directa

En la región de visibilidad directa, el campo se compone de la suma de las ondas directa y reflejada. Éstas se hallan a partir de una representación integral por el método de la fase estacionaria que es equivalente al de la óptica geométrica. Difiere del de la atmósfera lineal en que los puntos de fase estacionaria y las integrales de fase deben evaluarse numéricamente.

2.3 Región de difracción

La región de difracción se halla a distancias superiores a unos $10 \lambda^{1/3}$ km (véase el punto 2.1) próxima a la superficie o más allá del horizonte radioeléctrico para terminales elevados. El campo puede en este caso representarse por la serie de residuos o por la serie de modos de guíaonda. Asociados con cada modo existen un valor propio, la constante de propagación, y una función propia, la función altura-ganancia. La constante de propagación determina la variación del modo con la distancia. La función altura-ganancia determina la variación del modo con la altura. La función propia es la solución de una ecuación diferencial ordinaria de segundo orden y el valor propio se halla imponiendo las condiciones de contorno. Existe una infinidad de modos pero sólo se necesitan unos pocos. Se utilizan hasta 9 modos. Se emplea un método exacto de alisamiento de la Tierra, la transformación de Langer [1937]. Para los modelos de las expresiones (1) y (2) anteriores, se conocen soluciones ajustadas en términos de funciones de Airy. Para el modelo exponencial, las soluciones no pueden expresarse en términos de funciones normalizadas. Se utilizan las aproximaciones WKB, funciones integrales de Airy, [Bremmer, 1960 y 1962] para obtener aproximaciones iniciales a los valores propios. La ecuación diferencial de Riccati, que da la impedancia de onda o del coeficiente de reflexión de la onda, se integra luego numéricamente, y el valor propio se halla por el método de Newton. La función altura-ganancia se halla entonces por integración numérica.

2.4 Diferencias de propagación en una atmósfera lineal y una atmósfera exponencial

En algunas condiciones, el valor de la intensidad de campo de la onda de superficie es insensible al modelo de perfil de refracción utilizado. En otras, los resultados obtenidos con un perfil lineal y uno exponencial pueden diferir en más de 20 dB. En alguno de estos casos, los cálculos más simples del perfil lineal [Kirby y Hughes, 1989] pueden ajustarse para que sus resultados se aproximen mucho a los resultados del perfil exponencial.

Cuando ambos terminales están cerca de la superficie, es decir, cuando las altitudes de los terminales son inferiores a $5f^{-2/3}$ km para una frecuencia de f MHz, [Millington, 1958], ambos perfiles dan el mismo valor de intensidad de campo, excepto a distancias superiores a unos 200 km. A 100 MHz, la diferencia de intensidad de campo calculada es aproximadamente de 1 dB a 500 km. Esta diferencia aumenta al aumentar la longitud de onda. Puede demostrarse [Rotheram, 1981] que incluso en estas longitudes de onda mayores, puede hacerse que los cálculos del perfil lineal concuerden con los cálculos del perfil exponencial a largas distancias si el factor radio ficticio de la Tierra se ajusta a un valor que sea inferior al valor nominal de $4/3$. El valor apropiado de este radio efectivo de la Tierra modificado depende de la longitud de onda y, en menor grado, del valor de la conductividad de la Tierra. Su valor varía entre el valor nominal de $4/3$ a 30 MHz y se aproxima asintóticamente al valor de 1 a 10 kHz [Rotheram, 1970; Gerks, 1971].

Cuando uno o ambos terminales están a gran altitud, falla la aproximación del perfil lineal. Este sobrestima tanto la intensidad de campo como la distancia desde un terminal al horizonte radioeléctrico. Para una altitud de la antena de 10 km, el error en la estimación de la distancia al horizonte radioeléctrico es de unos 11 km [Millington, 1958]. Si los valores de la intensidad de campo en función de la distancia se calculan con ambos perfiles, se observa que pueden hacerse concordar los resultados del perfil lineal con los del perfil exponencial a largas distancias si la curva del perfil lineal se desplaza en una magnitud igual a la diferencia de distancias al horizonte radioeléctrico.

3. Programa de computador

Se ha desarrollado un programa GRWAVE _____ utilizando los métodos antes descritos [Rotheram, 1981]. Como datos de entrada se introducen las constantes n_s y h_s de la expresión (3), las constantes de la superficie de la Tierra, la frecuencia radioeléctrica y la polarización. _____

Se calcula la intensidad de campo para todos los pares de alturas y todas las distancias. Naturalmente para cada modo basta sólo un valor propio y una integración de la ecuación diferencial altura-ganancia. Algunos códigos se introducen a la entrada para controlar el modo de operación y la magnitud de los valores de salida. El principal valor de salida es la intensidad de campo en cada punto. Este valor viene dado en $\mu\text{V}/\text{m}$ para un transmisor de momento dipolar $5 \lambda/2 \pi$ (amperios-metro) que produce una intensidad de campo de $1,5 \times 10^5 \mu\text{V}/\text{m}$ a 1 km, correspondiente al campo producido en el espacio libre por un radiador isótropo de 3/4 kW que es equivalente a $1,732 \times 10^5 \mu\text{V}/\text{m}$ a 1 km para un radiador isótropo de 1 kW. La pérdida de transmisión y la intensidad de campo con relación al espacio libre son también valores de salida. Para el interior de la región de visibilidad directa se da información acerca de la estructura de los lóbulos de interferencia. Utilizando otro código pueden obtenerse otros valores de salida tales como las constantes de propagación y las funciones altura-ganancia o valores de salida muy detallados para el diagnóstico de errores.

Nota. — El programa se encuentra en la Secretaría del CCIR, a disposición de las administraciones. De proporcionarse los parámetros adecuados, el servicio del computador de la UIT podrá efectuar los cálculos que se le soliciten.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEAN, B. R. y DUTTON, E. J. [1966] *Radio Meteorology*, Dover Publications Inc., Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- BREMMER, H. [1949] *Terrestrial Radio Waves*. Elsevier, Londres, Reino Unido.
- BREMMER, H. [1960 y 1962] On the theory of wave propagation through a concentrically stratified troposphere with a smooth profile. Parte I: Discussion of the extended WKB approximation. *NBS J. Res.*, **64D**, 467 (1960). Parte II: Expansion of the rigorous solution. *Ibid.*, **66D**, 31 (1962).
- CCIR [1955] Atlas de curvas de propagación por ondas de superficie entre 30 Mc/s y 300 Mc/s. UIT, Ginebra.
- CCIR [1959] Atlas de curvas de propagación por ondas de superficie entre 30 y 10 000 Mc/s. UIT, Ginebra.
- GERKS, I. H. [julio de 1971] Computing the effects of tropospheric refraction at frequencies below 10 Megahertz. *Radio Sci.*, Vol. 6, 7, 681-687.
- Kirby, R.C. y Hughes, K.A. [1989] *Electronic Engineers Handbook*, Editado por D.G. Fink y D. Christiansen, 3ª edición, McGraw-Hill, New York, 1989, para. 18-76.
- LANGER, R. E. [1937] On the correction formulas and the solutions of the wave equations. *Phys. Rev.*, Vol. 51, 669-676.
- MILLINGTON, G. [octubre-diciembre de 1958] Propagation at great heights in the atmosphere. *Marconi Rev.*, Vol. XXI, 131, 143-160, 4º trimestre.
- ROTHERAM, S. [diciembre de 1970] Ground-wave propagation at medium and low frequencies. *Electron. Lett.*, Vol. 6, 25, 794.
- ROTHERAM, S. [octubre de 1981] Ground-wave propagation; Part I, Theory for short distances; Part II, Theory for medium and long distances, and reference propagation curves. *Proc. IEE*, Part F, Vol. 128, 5, 275-285.