

Valoración de parámetros ionosféricos con ayuda del método Doppler

LUIS LOIS MENÉNDEZ

RESUMEN

Se determinó teóricamente el corrimiento vertical Doppler en frecuencia como función de los parámetros de transporte y pérdida correspondientes a una ionosfera nocturna con perfil electrónico parabólico. Partiendo de las expresiones del corrimiento Doppler para propagación vertical, se obtuvieron relaciones algebraicas entre los parámetros anteriores y los correspondientes al modelo parabólico de la concentración electrónica. Se extendió la aplicación del teorema de equivalencia Doppler, al considerar el campo magnético terrestre en su aproximación cuasi-longitudinal (Q-L), generalizándose las expresiones iniciales y estableciéndose que las relaciones obtenidas se mantienen válidas para propagación inclinada Q-L.

Los resultados obtenidos permiten, en el marco de las aproximaciones utilizadas, valorar los coeficientes de difusión ambipolar y pérdida lineal, y la velocidad vertical de deriva del plasma ionosférico, con ayuda del método Doppler con multifrecuencias o mediante el método de sondeo vertical.

1. INTRODUCCIÓN

Como es conocido (AGY *et al.*, 1965; BAKER *et al.*, 1968), la técnica de sondeo Doppler de alta frecuencia, cuya resolución temporal supera a la de los demás métodos (décimas de segundo), es una potente herramienta de investigación de la ionosfera, especialmente durante fenómenos que cambian rápidamente con el tiempo, tales como los producidos por destellos solares, comienzos súbitos de tormenta (SSC), pulsaciones geomagnéticas, tornados, ciclones, terremotos, explosiones nucleares, etc.

En el presente trabajo se pretenden valorar teóricamente los parámetros de transporte y pérdida de la ionosfera nocturna, con ayuda del método Doppler con multifrecuencias o del método de sondeo vertical. Con tal fin se determinaron y compararon las expresiones del corrimiento vertical Doppler en frecuencia, generalizándolas, al extender la aplicación del denominado teorema de equivalencia Doppler, para considerar propagación cuasi-longitudinal (Q-L) e inclinada.

Manuscrito aprobado el 15 de diciembre de 1980.

L. Lois Menéndez pertenece al Instituto de Geofísica y Astronomía, de la Academia de Ciencias de Cuba.

2. DESARROLLO TEÓRICO. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La expresión correspondiente al corrimiento Doppler en frecuencia para propagación vertical en una ionosfera isotrópica y sin colisiones,

$$\Delta f = (k/cf) \int_0^{\delta} \partial N / \partial t (1 - kN/f^2)^{-1/2} dz \text{ siendo } \delta \stackrel{\text{def}}{=} z_R \quad (1)$$

puede ser integrada, como plantearon LOBACHEVSKI *et al.* (1978), con ayuda de la ecuación de continuidad del plasma ionosférico,

$$- \partial N / \partial t = \beta N + \partial N / \partial z (u + v) + N \partial v / \partial z \quad (2)$$

en ausencia del término de producción electrónica y despreciando tanto el aporte de la recombinación en la baja ionosfera, ya que la mayor contribución a (1) se encuentra en la región de reflexión, como la influencia de los gradientes horizontales en comparación con el vertical. Además, se consideró que la deriva vertical del plasma es sólo función del tiempo en el intervalo de alturas examinado.

Teniendo en cuenta la forma correspondiente de la velocidad vertical de difusión ambipolar,

$$v = -D(\partial \ell_n N / \partial z + 1/H_p) \quad (3)$$

bajo el supuesto de que las temperaturas ionosféricas son funciones homogéneas, y considerando un modelo parabólico de variación de la concentración electrónica con la altura,

$$N = N_m \left\{ 1 - \left[(z - z_m) / (z_m - z_0) \right]^2 \right\} \quad (4)$$

podemos determinar, integrando (1) con ayuda de (2), (3), y (4), la siguiente expresión para el corrimiento vertical Doppler como función de los parámetros ionosféricos de transporte y pérdida.

$$\Delta f = (f/c) \left\{ \left[\beta H h - 2(DH_p^{-1} - u) \right] \left[1 - a(1 - h^2) \right] \Big|_{h_0}^{h_R} \right. \quad (5)$$

$$\left. \left[\beta H(a + 1) \bar{a}^{1/2} + Da^{1/2} H^{-1} \right] \ell_n | 2 \left\{ a \left[1 - a(1 - h^2) \right] \right\}^{1/2} + 2ah \Big|_{h_0}^{h_R} \right\}$$

Introduciendo el parámetro $x = a^{1/2} = f/f_c$, podemos obtener, teniendo en cuenta los valores característicos del índice de refracción en la base de la ionosfera y el nivel de reflexión de la señal, las siguientes expresiones

$$\begin{aligned} h_k &= -(1 - x^2)^{1/2} \\ h_0 &= -1 \end{aligned} \quad (6)$$

Entonces no es difícil evaluar (5) y demostrar que toma la siguiente forma

$$\Delta f = (f/c) \left[2(DH_p^{-1} - u) + \beta H \right] - \quad (7)$$

$$- (f_c/2c) \left[\beta H(x^2 + 1) + D/H \right] \ell_n |(1+x)/(1-x)|$$

donde es posible distinguir los términos relacionados con la difusión, deriva, y pérdida del plasma ionosférico

$$\Delta f = \Delta f_D + \Delta f_u + \Delta f_\beta \quad (8)$$

$$\Delta f_D = (D/C) \left[2(f/H_p) - (f_c/2H) \ell_n |(1+x)/(1-x)| \right] \quad (9)$$

$$\Delta f_u = -2(f/c)u \quad (10)$$

$$\Delta f_\beta = (\beta H/C) \left[f - (f_c/2)(x^2 + 1) \ell_n |(1+x)/(1-x)| \right] \quad (11)$$

De la expresión (10) se deduce, como era de esperar, que los movimientos verticales hacia arriba (abajo), que determinan un aumento (disminución) de la trayectoria de fase, conducen correspondientemente a un corrimiento Doppler en frecuencia negativo (positivo). Lamentablemente, a diferencia de (10), las fórmulas (9) y (11) dependen en forma complicada del parámetro x , por lo que un análisis similar se dificulta; no obstante, se destaca el rol significativo que desempeñan los segundos términos, ya que garantizan valores asintóticos correctos cuando $x \rightarrow 1$.

Ahora compararemos el corrimiento Doppler (7), obtenido por nosotros, con el logrado por AGY *et al.* (1965) para un modelo parabólico con propagación vertical. Este último puede ser escrito como sigue,

$$\Delta f = - (f/c) \left[dz_0/dt + dz_m/dt + (2H/f_c) df_c/dt \right] + \quad (12)$$

$$+ \left[(H/C) (df_c/dt) - (f_c/2C) (dz_0/dt - dz_m/dt) \right] \ell_n |(1+x)/(1-x)| +$$

$$+ x^2 \left[(f_c/2C) (dz_0/dt - dz_m/dt) + (H/C) df_c/dt \right] \ell_n |(1+x)/(1-x)|$$

Las funciones x , $\ell_n |(1+x)/(1-x)|$, y $x^2 \ell_n |(1+x)/(1-x)|$ son linealmente independientes en el intervalo abierto (0,1), ya que, en el mismo, su wronskiano no es idénticamente nulo. Por ello, de las expresiones (7) y (12) podemos obtener un sistema de tres ecuaciones independientes,

$$dz_0/dt + dz_m/dt + (2H/f_c) df_c/dt = - \left[2(D/H_p - u) + \beta H \right]$$

$$dz_0/dt - dz_m/dt - (2H/f_c) df_c/dt = \beta H + D/H \quad (13)$$

$$dz_0/dt - dz_m/dt + (2H/f_c) df_c/dt = - \beta H$$

cuya solución podemos escribir como

$$df_c/dt = - (f_c/2) (\beta + D/H^2)$$

$$dz_0/dt = u - D(H_p^{-1} - 1/2H) \quad (14)$$

$$dz_m/dt = u - D/H_p$$

De (13) también es posible obtener las relaciones inversas que nos muestren la dependencia de los parámetros de transporte y pérdida de la ionosfera con las variaciones temporales de los parámetros de la capa parabólica

$$\beta = (1/H) (dz_m/dt - dz_0/dt) - (2/f_c) df_c/dt$$

$$D = 2H (dz_0/dt - dz_m/dt) \quad (15)$$

$$u = 2(H/H_p) dz_0/dt + \left[1 - 2(H/H_p) \right] dz_m/dt$$

Las relaciones (7) y (15) nos permiten resolver los coeficientes ionosféricos nocturnos de pérdida lineal y difusión ambipolar y la velocidad vertical de deriva tanto con el método Doppler con multifrecuencias como con ayuda del método de sondeo vertical. Estos valores pueden ser aprovechados en el futuro para resolver diferentes tareas tanto de física de la ionosfera como de la propagación de radio-ondas. En particular, el conocimiento de la velocidad de deriva del plasma permite evaluar el campo eléctrico efectivo que condiciona dicho desplazamiento vertical en condiciones tranquilas y perturbadas.

Las expresiones (14) y (15) fueron obtenidas en base del corrimiento vertical Doppler, obviando el campo magnético terrestre. No obstante, generalizaremos los resultados anteriores para el caso de propagación inclinada Q-L.

AGY *et al.* (1965) demostraron que, despreciando el campo geomagnético, la curvatura de la ionosfera, y las colisiones, el corrimiento Doppler observado en radio-ondas de frecuencia f , incidentes en la ionosfera con un ángulo Θ_0 , coincide con el observado en radio-ondas de frecuencia

$f \cos \Theta_0$ emitidas verticalmente. Por ello establecieron un teorema de equivalencia para los corrimientos Doppler,

$$\Delta f(f, \Theta_0) = \Delta f(f \cos \Theta_0, 0) \quad (16)$$

En el caso de propagación inclinada Q-L, como el ángulo α entre el rayo y la normal al frente de onda es despreciable, el corrimiento Doppler está dado por

$$\Delta f = - (f/C) \int_s \partial_{\mu} / \partial t ds \quad (17)$$

Partiendo de (17), no es difícil demostrar, considerando la aproximación Q-L de la ecuación de Appleton-Hartree sin colisiones, la ley de Snell para ionosfera plana, y despreciando la variación temporal del parámetro magneto-iónico Y_L , que el teorema ampliado de equivalencia es expresable como

$$\Delta f(f, \Theta_0, Y_L) = (1 \pm Y_L)^{-1/2} \Delta f(f \cos \Theta_0 (1 \pm Y_L)^{1/2}, 0, 0) \quad (18)$$

donde los signos \pm corresponden respectivamente a los modos ordinario y extraordinario de propagación de las radio-ondas.

Teniendo en cuenta (18), resulta simple generalizar las expresiones del corrimiento Doppler (7) y (12), que respectivamente serán

$$\begin{aligned} \Delta f = (f \cos \Theta_0 / C) \left[2(DH_p^{-1} - u) + \beta H \right] - \\ - \left[f_c / 2C (1 \pm Y_L)^{1/2} \right] \left[\beta H (x^2 + 1) + D/H \right] \ell_n |(1+x)/(1-x)| \quad (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta f = - (f \cos \Theta_0 / C) (dz_0/dt + dz_m/dt + (2H/f_c) df_c/dt) + \\ + (1 \pm Y_L)^{-1/2} \left[(H/C) df_c/dt - (f_c/2C) (dz_0/dt - dz_m/dt) \right] \times \quad (20) \\ \times \ell_n |(1+x)/(1-x)| + x^2 (1 \pm Y_L)^{-1/2} \left[(f_c/2C) (dz_0/dt - dz_m/dt) + \right. \\ \left. + (H/C) df_c/dt \right] \ell_n |(1+x)/(1-x)| \end{aligned}$$

$$\text{pero con } x = f \cos \Theta_0 (1 \pm Y_L)^{1/2} / f_c \quad (21)$$

$$tg \Theta_0 = L / (2z_0 + xz_m \ell_n |(1+x)/(1-x)|)$$

Comparando las expresiones (19) y (20) obtenemos las relaciones de los coeficientes de difusión y pérdida, y de la velocidad de deriva, con las derivadas temporales de los parámetros del modelo parabólico en la forma de las ecuaciones (14) y (15).

3. SUMARIO Y CONCLUSIONES

Se valoraron, preliminarmente, los coeficientes de pérdida lineal y difusión ambipolar, y la velocidad vertical de deriva del plasma ionosférico, utilizando los cálculos teóricos del corrimiento Doppler en frecuencia, bajo los siguientes supuestos: (1) condiciones nocturnas (producción electrónica nula); (2) perfil electrónico parabólico; (3) gradientes horizontales y colisiones despreciables; (4) las temperaturas ionosféricas y la derivada del plasma son sólo funciones del tiempo (funciones homogéneas); (5) propagación cuasilongitudinal; y (6) se desprecia el aporte de la recombinación.

Se concluyó la posibilidad de estimar, teóricamente, los parámetros de transporte y pérdida de la ionosfera nocturna mediante los métodos Doppler con multifrecuencias y sondeo vertical.

La exactitud de la valoración propuesta mejora, empleando el método Doppler, bajo condiciones perturbadas y frecuencias de sondeo cercanas a la crítica de la capa F2.

4. RECOMENDACIONES

Se recomienda evaluar prácticamente los parámetros nocturnos de transporte y pérdida de la ionosfera, utilizando las expresiones obtenidas, así como atenuar las restricciones impuestas como hipótesis de trabajo, incluyendo el término de producción electrónica, el aporte de la recombinación, los gradientes horizontales, la consideración de otros modelos de la concentración electrónica, etc., para ampliar la base teórica de este estudio y perfeccionar los resultados logrados.

5. LISTA DE SÍMBOLOS UTILIZADOS

<i>D</i>	Coeficiente de difusión ambipolar
<i>H</i>	Altura de una atmósfera homogénea. Escala de altura
<i>H_p</i>	Escala de altura del plasma
<i>L</i>	Distancia entre el transmisor y el receptor
<i>N</i>	Concentración electrónica de la capa parabólica
<i>N_m</i>	Máximo de concentración electrónica de la capa parabólica
<i>S</i>	Trayectoria de las radio-ondas
<i>Y_L</i>	Componente longitudinal del parámetro magneto-iónico $Y(f_H \cos \theta / f)$
<i>a</i>	Parámetro magneto-iónico (f_c^2 / f^2)

c	Velocidad de la luz en el espacio libre
f	Frecuencia de la radio-onda emitida
f_c	Frecuencia crítica de la capa parabólica
f_H	Girofrecuencia de los electrones
h	Altura equivalente: $(z - z_m)/(z_m - z_0)$
h_0	Altura equivalente de la base de la capa parabólica
h_R	Altura equivalente de reflexión de la radioseñal
k	Constante ionosférica de valor $8,06 \cdot 10^7 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-2}$
u	Velocidad vertical de deriva del plasma
v	Velocidad vertical de difusión ambipolar
x	Relación adimensional (f/f_c)
z	Coordenada según la vertical
z_0	Altura de la base de la capa parabólica
z_m	Altura del máximo de concentración electrónica de la capa parabólica
z_R	Altura de reflexión de la radio-señal
Δf	Corrimiento Doppler en frecuencia
α	Ángulo entre la normal al frente de onda y el rayo
β	Coefficiente de pérdida lineal
θ	Ángulo entre la normal al frente de onda y el campo magnético terrestre
μ	Índice de refracción de fase
θ_0	Ángulo de incidencia en la ionosfera

REFERENCIAS

- AGY, V., BAKER, D. M., y JONES, R. M. (1965): Studies of solar flare effects and other ionospheric disturbances with a high frequency Doppler technique. *NBS Tech. Note*, 306, 85 pp.
- BAKER, D. M., CHANG, N., DAVIES, K., DONNELLY, R. F., y JONES, J. E. (1968): A review of some ionospheric studies based on a high-frequency Doppler technique. *ESSA Tech. Rept.* ERL 78-SDL 1, 64 pp.
- LOBACHEVSKI, L. A., CERGUYENKO, N. P., CERGUYENKO, O. C., y YUDOVICH, L. A. (1978): Efectos ionosféricos de las subtormentas magnéticas en la ionosfera nocturna por los datos de sondeo Doppler [en ruso]. *Geomagnet. Aeron.*, 18(3):427-431.

ABSTRACT

The Doppler vertical shift in frequency was theoretically determined as a function of the transport and loss parameters corresponding to a nocturnal ionosphere with an electronic parabolic profile. Starting with the expressions of the Doppler shift for vertical propagation, the algebraical relations between the former parameters and those corresponding to a parabolic model of the electron concentration were obtained. Taking into account the earth's magnetic field in its quasilongitudinal (Q-L) approximation the application of the Doppler equivalence theorem was extended, generalizing the initial expressions and establishing that the relations obtained remain valid for oblique and Q-L propagation. In the frame of the approxi-

mations used, the results obtained render the possibility of making an evaluation of the ambipolar diffusion and linear loss coefficients, and the vertical drift velocity of the ionospheric plasma either with the help of the Doppler technique with multifrequency or by the vertical sounding method.

CDU 550:388.2