

INFORME 1012-1

**MODELO OPERATIVO DE LAS CONDICIONES DE PROPAGACIÓN RADIOELÉCTRICA
EN LATITUDES ALTAS**

(Cuestión 27/6)

(1986-1990)

1. Introducción

Las comunicaciones en ondas decamétricas en latitudes altas son una materia de difícil estudio y aplicación práctica. El estado actual de nuestros conocimientos sobre la ionosfera de alta latitud nos permite efectuar predicciones a largo plazo de las comunicaciones en ondas decamétricas y especificaciones aproximadas en tiempo real de la ionosfera de altas latitudes. Nuestras posibilidades de prever a corto plazo las comunicaciones en ondas decamétricas se basa en nuestra capacidad de proyectar hacia el futuro la morfología observada. Las propiedades especiales de la ionosfera de alta latitud que afectan a las comunicaciones radioeléctricas se han indicado en el Informe 886. Otras recopilaciones de la ionosfera de alta latitud y la predicción de sus propiedades han sido publicadas en los Solar-Terrestrial Predictions Proceedings [Donnelly, 1979, 1980] (véase por ejemplo, Besprozvannaya y otros, [1979], Hunsucker, [1979a, b] y Vondrak, [1979]), un número especial de "Radio Science" [Hunsucker y Greenwald, 1983], Tsunoda [1988] y Belrose [1988].

2. Modelos de la ionosfera de alta latitud

La posibilidad de predecir la propagación radioeléctrica en la banda decamétrica en altas latitudes requiere de un modelo de la distribución espacial temporal de la densidad electrónica en la ionosfera de alta latitud. Dada la estructura espacial muy definida de las regiones auroral y polar en la ionosfera, las predicciones específicas de la propagación pueden ser muy sensibles a la posición y a las variaciones dinámicas de las estructuras.

Entre las características ionosféricas en latitudes altas de las que deben establecerse modelos para efectuar las predicciones en ondas decamétricas están las siguientes [Hunsucker, 1979b]:

- a) Ubicación y extensión del óvalo auroral en función de la actividad magnética.
- b) Parámetros de las regiones E y F en el óvalo auroral, la depresión hacia latitudes medias, la cúspide diurna y el casquete polar.
- c) Perfil de N_e en función de la altura entre las regiones E y F2 (que también es importante para la predicción de la propagación por conductos).
- d) Absorción auroral y absorción polar (efectos de la región D).
- e) Irregularidades de las regiones E y F que dan lugar a propagación por trayectos múltiples, desvanecimientos rápidos y propagación fuera del círculo máximo.

Asimismo [Buchau y otros, 1985]:

- f) Ubicación y extensión de las "manchas " y "arcos alineados con el sol" en el casquete solar, que dan lugar al centelleo.

Las posibilidades actuales de predicción de la propagación en la banda de ondas decamétricas (B.dam) en altas latitudes son estadísticas, a base de datos sinópticos que ignoran las estructuras de pequeña escala (< 100 km) y los fenómenos transitorios (< 3 h). Se ignoran totalmente otras características importantes tales como los arcos aurorales y las subtormentas. Algunos modelos incorporados en los programas de computador para la predicción de la propagación en ondas decamétricas no han sido verificados, en su mayor parte, por datos medidos en trayectos oblicuos.

2.1 Modelos disponibles para las predicciones

La disponibilidad de modelos ionosféricos de altas latitudes para predicciones de propagación en B.dam ha sido revisada por Hunsucker [1979b]. Las características y el proceso de las irregularidades en gran escala (>10 km) y pequeña escala (<10 km) han sido estudiados por Tsunoda [1987] y se ha obtenido un modelo descriptivo.

Hay varios modelos disponibles que incluyen los apartados a) al f) antes mencionados. La información experimental obtenida con ionosondas desde tierra y de satélites [Elkins y Rush, 1973] fue utilizada para desarrollar un modelo de la estructura de la ionosfera de alta latitud. Este modelo fue posteriormente modificado usando información de radar incoherente (ISR) [Vondrak y otros, 1977]. El nuevo modelo retiene los valores de foF2 y hmF2 del modelo original [Elkins y Rush, 1973] e incorpora una capa E auroral (esencialmente equivalente a Es de pantalla) y un valle en el perfil de densidad electrónica obtenido de los datos del radar incoherente, así como un modelo de absorción que varía con la actividad magnética.

La URSS ha desarrollado modelos estadísticos de la estructura de la ionosfera de alta latitud [Kovalevs-kaya y Zhulina, 1979; Avdiushin y otros, 1979]. Se han observado diferencias entre las predicciones de la URSS y los Estados Unidos de América en el caso de absorción auroral y foF2 en la depresión de latitudes medias durante máximos solares. Durante perturbaciones magnéticas la URSS ha identificado tres regiones diferentes de absorción auroral, mientras que el modelo de Vondrak y otros [1977] muestra dos regiones de absorción incrementada en tiempo y latitud. Los modelos además difieren en la descripción de los gradientes de foF2 en la región de la depresión en los máximos solares [Miller y Gibbs, 1975].

Foppiano y Bradley [1983] desarrollaron un método para predecir la intensidad de la absorción auroral y éste es utilizado en el método del CCIR para calcular la intensidad de campo (Suplemento al Informe 252). La distribución estadística día a día de la absorción se ha encontrado que es log-normal, y la probabilidad de que un dado nivel sea superado es calculable si se conocen dos parámetros, la absorción media, A_m , y la probabilidad de que 1 dB sea superado Q_1 . Foppiano y Bradley [1984] examinaron las variaciones estadísticas de los datos de absorción medidos con un riómetro en días diferentes a una hora dada. Se estableció una nueva expresión aproximada entre A_m y Q_1 , y se presentó la familia de curvas de distribución de amplitud correspondientes a esta relación. Se compararon los resultados obtenidos mediante esta relación y los determinados en investigaciones anteriores. Foppiano y Bradley [1985] han incorporado también variaciones geográficas, diurnas, estacionales y de los ciclos solares. Hargreaves y otros [1985] sugieren que el número de manchas solares se tenga en cuenta en el modelo por medio de un índice de actividad magnética (por ejemplo, A_p) en lugar del número de manchas solares, dado de que la precipitación auroral depende del viento solar y no directamente de las manchas solares.

Zhulina y otros [1983] han elaborado un método para la predicción de la intensidad de la absorción auroral. Este método se basa también en un modelo empírico de la distribución de probabilidad de la intensidad de absorción auroral derivado de observaciones de la absorción del ruido radioeléctrico cósmico efectuadas por medio de riómetros, que a los efectos de este estudio estaban situados en el sector euroasiático del hemisferio septentrional. En este método las variaciones en el espacio y en el tiempo de la absorción auroral se representaron en forma de mapas y cuadros [CCIR, 1982-86a, b]. Una aproximación analítica de estas variaciones de la absorción auroral se describe en el Documento del [CCIR, 1982-86c].

Un modelo que incluye una amplia clasificación de $N(h)$ para la región F en las varias regiones estructurales (depresión, óvalo, etc.) e información cualitativa de los efectos de las regiones D y E en la propagación en B.dam fue utilizado [Rush y otros, 1982] para modificar las medianas mensuales de los modelos ionosféricos, para especificar las condiciones de propagación en B.dam, y con propósitos de predicción.

El uso de modelos teóricos puede incrementar la comprensión de la cadena de eventos que conectan la actividad en el sol con las modificaciones de la ionosfera de altas latitudes y sus efectos en las comunicaciones en B.dam. Esquemas globales que prevean y especifiquen el viento solar, la magnetosfera, la termosfera, el campo geomagnético y

el campo geomagnético y la ionosfera de alta latitud han sido desarrollados [Akasofu, 1981, 1982, 1983; Hakamada y Akasofu, 1982; Fuller-Rowell y otros, 1987].

Modelos teóricos [Watkins, 1978; Sojka y otros, 1982] de la ionosfera de altas latitudes solamente son capaces de reproducir con éxito muchas de las características observadas como la «depresión principal», el «vacío de ionización», la «lengua de ionización», los «picos de ionización aurorales» y los «efectos tiempo universal».

El modelo descriptivo de las irregularidades de la región F obtenido por Tsunoda [1987] parece unificar la mayor parte de las observaciones diversas e independientes en latitudes altas.

2.2 Especificación en tiempo real

Para optimizar el rendimiento del sistema, los sistemas de _____ comunicaciones en B.dam y los radares en B.dam _____ necesitan especificaciones en tiempo real de las características ionosféricas aurorales y polares importantes, tales como arcos, depresión de latitudes medias y cúspide polar. Los satélites de órbitas polares de alta inclinación pueden examinar las regiones aurorales y polares en tiempo real y en varias longitudes de ondas ópticas. Un trazado de rayo en tiempo casi real permitiría la predicción de las características de propagación en ondas decamétricas tales como la disponibilidad de modos, la dispersión, los modos múltiples y la propagación fuera del círculo máximo.

2.3 Predicciones a corto plazo

Para mejorar los programas de predicción existentes, podrían utilizarse mediciones desde satélites de parámetros del viento solar (como velocidad, densidad y campo magnético interplanetario), para predecir las características del óvalo auroral, la entrada total de energía magnetosférica, y la morfología del sistema de corrientes [Vondrak, 1979]. Satélites de gran altura que proveyeran imágenes globales en tiempo real de la respuesta ionosférica a la entrada de partículas desde la magnetosfera, podrían ayudar apreciablemente en la predicción de cambios detallados en la estructura, tamaño y ubicación de regiones ionosféricas con aumentos de densidad electrónica. Están obteniéndose datos adicionales en la ionosfera de alta latitud (óvalo auroral, cúspide y casquete polar) en la gama de latitud magnética invariante de 69° a 81° mediante un radar de dispersión incoherente _____ [Kelly, 1983]. Dentro del propio casquete polar, una sonda digital con base en tierra suministra mediciones permanentes de la parte inferior de la capa F [Buchau y otros, 1987].

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKASOFU, S.-I. [1981] Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere. *Space Sci. Rev.*, Vol. 28, 121.
- AKASOFU, S.-I. [1982] Prediction of development of geomagnetic storms by using the solar wind-magnetosphere energy coupling function, *Planet and Space Sci.*, Vol. 29, 1151.
- AKASOFU, S.-I. [1983] Energy flow and dynamical coupling in the solar wind-magnetosphere-ionosphere system. *Radio Sci.*, Vol. 18, 971-980.
- AVDIUSHIN, S. I., DANILOV, A. D., MALISHEV, A. B., NOVIKOVA, G. N. y SVIDSKY, P. M. [1979] Forecasting ionospheric and geomagnetic conditions in the forecasting center of IAG. *STPP**, Vol. I, 104.
- BELROSE, J.S. [1988] - HF Communications and remote sensing in the high latitude region. AGARD LS N° 162, Media Effects on electronic systems in the high latitude regions. ISBN 92-835-0478-X, páginas 5-1 a 5-42.
- BESPROZVANNAYA, A. S., SHIROCHOV, A. V. y SHCHUKA, T. I. [1979]. On the approach to forecasting polar ionospheric conditions. *STPP*, Vol. II, 528.
- BUCHAU, J., WEBER, E.J., ANDERSON, D.N., CARLSON, Jr., H.C., MOORE, J.G., REINISCH, B.W. y LIVINGSTON, R.C. [1985] Ionospheric Structures in the polar cap: Their origin and relation to 250-MHz Scintillation. *Radio Science*, Vol. 20, No. 3, 325-338.
- BUCHAU, J., REINISCH, B.W., ANDERSON, D.N., WEBER, E.J. y DOZOIS, C. [1987] Polar cap plasma convection measurements and their relevance to the real-time modelling of the high latitude ionosphere, proceedings of the ionospheric effects symposium, the effects of the ionosphere on communications, navigation, and surveillance systems. Eds. J.M. Goodman, J.A. Klobuchar, H. Soicher, G. Joiner, US Government Printing Office, Washington D.C., 20402.
- DONNELLY, R. F. Ed. Solar-Terrestrial Predictions Proceedings:
- Vol. I [1979] Prediction Group Reports. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-023-00041-9, Washington, DC 20402.
- Vol. II [1979] Working Group Reports and Reviews. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00471-6, Washington, DC 20402.
- Vol. III [1980] Solar Activity Predictions. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00473-2, Washington, DC 20402.
- Vol. IV [1980] Predictions of Terrestrial Effects of Solar Activity. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00479-1, Washington, DC 20402.

* La abreviatura STPP se utiliza para designar las «Solar-Terrestrial Predictions Proceedings», publicadas en cuatro volúmenes por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) del Departamento de Comercio de Estados Unidos de América, y editadas por R. F. Donnelly (véase [Donnelly, 1979 y 1980]).

- ELKINS, T. y RUSH, C. [1973] A statistical predictive model of the polar ionosphere. *An Empirical Model of the Polar Ionosphere*. Ed. T. Elkins. AFCRL-TR-73-0331. Air Force Cambridge Research Laboratories, Hanscom AFB, MA 01731, Estados Unidos de América.
- FOPPIANO, A. J. y BRADLEY, P. A. [octubre de 1983] Predicción de la absorción auroral de las ondas de alta frecuencia con incidencia oblicua. *Boletín de Telecomunicaciones*, Vol. 50, X, 547-560.
- FOPPIANO, A. J. y BRADLEY, P. A. [1984] Day-to-day variability of riometer absorption, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 46, 689-696.
- FOPPIANO, A. J. y BRADLEY, P. A. [1985] Morphology of background auroral absorption, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 47, 663-674.
- FULLER-ROWELL, T.J., REES, D., QUEGAN, S., BAILEY, G.J. y MOFFETT, R.J. [1987] Interactions between neutral thermospheric composition and the polar ionosphere using a coupled ionosphere-thermosphere model, *J. Geophys. Res.* (Pendiente de publicación).
- HAKAMADA, K. y AKASOFU, S. I. [1982] Simulation of three dimensional solar wind disturbances and resulting geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.*, Vol. 31, 3.
- HARGREAVES, J.K., REENEY, M.T. y BURNES, C.J. [1985] Statistics of auroral radio absorption in relation to prediction models. AGARD-CP-321, 7.3-1 a 7.3-10.
- HUNSUCKER, R. D. [1979a] Morphology and phenomenology of the high latitude E and F regions. *STPP*, Vol. II, 543.
- HUNSUCKER, R. D. [1979b] High latitude E and F region ionosphere predictions. *STPP*, Vol. II, 513.
- HUNSUCKER, R. D. y GREENWALD, R. A., Guest Editors [1983] Including special papers: radio probing of the high-latitude ionosphere and atmosphere: new techniques and new results, *Radio Sci.*, Vol. 18, 6.
- KELLY, J. D. [1983] Sondrestrom radar - initial results, *Geophysical Research Letters*, Vol. 10, 1112-1115.
- KOVALEVSKAYA, E. M. y ZHULINA, E. M. [1979] The statistical properties of the disturbed high latitude ionosphere in radio wave propagation computations. *STPP*, Vol. III, D2-16.
- MILLER, D. C. y GIBBS, J. [1975] Ionospheric analysis and modeling. Scientific Report 2, AFCRL-TR-75-0549. Air Force Cambridge Research Laboratories, Hanscom AFB, MA 01731, Estados Unidos de América.
- RUSH, C. M., ROSICH, R. K., BROOKS, C. B., LEISE, D. L. y POKEMPNER, M. [1982] A simplified model of the high latitude ionosphere for telecommunications purposes. NTIA Report 82-94. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, Washington DC 20402.
- SOJKA, J. J., SCHUNK, R. W. y RAITT, W. J. [1982] Seasonal variations of the high latitude F region for strong convection. *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, 187.
- TSUNODA, R.T. [1988] High-latitude F-region irregularities: A review and synthesis. *Physica Scripta. Review of Geophysis*, 26, 719-760.
- VONDRAK, R. R. [1979] Ionospheric predictions, magnetosphere-ionosphere interactions. *STPP*, Vol. II, 476.
- VONDRAK, R., SMITH, G., HATFIELD, V., TSUNODA, R., FRANK, V. y PERREAULT, P. [1977] Chatanika model of the high-latitude ionosphere for application to HF propagation prediction. RAD-TR-78-7. Rome Air Development Center, Hanscom AFB, MA 01731, Estados Unidos de América.
- WATKINS, B. [1978] A numerical computer investigation of the polar F region ionosphere. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 26, 559.
- ZHULINA, E. M., KISHCHA, P. V., LUKASHKIN, V. M. y SHIROCHKOV, A. V. [1983] Additional energy losses on high-latitude radio links (en ruso), 208. Editorial Nauka, Moscú, URSS.

Documentos del CCIR

[1982-86]: a. 6/48 (URSS); b. 6/49 (URSS); c. 6/194 (URSS).