

Una simulación numérica de los modos electromagnéticos VLF en la atmósfera de Titán con el método TLM

J.A. Morente⁽¹⁾, A. Salinas⁽²⁾, J.A. Porti⁽¹⁾, E.A. Navarro⁽³⁾, J.A. Morente-Molinera⁽⁴⁾, J.F. Fornieles⁽²⁾, J.A. Gázquez⁽⁵⁾, M. Rodríguez-Sola⁽¹⁾, N. Novas⁽⁵⁾, R. García-Salvador⁽⁵⁾, S. Toledo-Redondo⁽²⁾ y A. Méndez⁽²⁾
jmorente@ugr.es, asalinas@ugr.es, jporti@ugr.es, enrique.navarro@uv.es, jmoren@correo.ugr.es, jforniel@ugr.es, jgazquez@ual.es, nnovas@ual.es, garciasalvador_r@hotmail.com, sergiotr@ugr.es, amendez@ugr.es

⁽¹⁾ Dpto. de Física Aplicada. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. 18071 Granada.

⁽²⁾ Dpto. de Electromagnetismo y Física de la Materia. Universidad de Granada. 18071 Granada.

⁽³⁾ Dpto. de Física Aplicada. Universidad de Valencia. 46100 Burjassot, Valencia.

⁽⁴⁾ Higher Technical School of Information Technology and Telecommunications Engineering. University of Granada. E-18071 Granada. Spain.

⁽⁵⁾ Dpto. de Arquitectura de Computadores y Electrónica. Univ. Almería. 04120, La Cañada de San Urbano, Almería.

Abstract- A study of the VLF electric field spectra in the Titan's atmosphere is carried out using the Transmission Line Matrix (TLM) method. As observed on the Earth, solar photons and galactic cosmic rays penetrating the upper layers of Titan's atmospheres increase the ionization and contribute to forming an electrical conductivity profile that, starting from low values near the surface, rises with altitude and generates an electromagnetic cavity for waves propagating in the ELF-VLF range. Due to high losses conferred by the electrical conductivity to Titan's atmosphere, the direct numerical and experimental spectra are decreasing functions of the frequency without resonances or other special forms. However, a procedure based on analysis of the late-time response extracts the expected VLF modes with successive peaks and a mean between adjacent resonances of 0.68 kHz, in agreement with the late-time analysis of the experimental measurements sent by Huygens probe, when the conductivity profile with aerosols is introduced in the numerical model.

I. INTRODUCCIÓN

En la Tierra, las descargas eléctricas asociadas a la actividad tormentosa en su atmósfera constituyen la mayor fuente de los campos electromagnéticos naturales existentes en ella. Estos campos quedan atrapados entre la superficie de la Tierra y la ionosfera y, de hecho, son las resonancias de esa enorme cavidad electromagnética que forman estas dos superficies conductoras esféricas. Debido a las dimensiones de la cavidad, los modos electromagnéticos naturales concentran su energía en la banda ELF, entre 3 Hz y 3 kHz, con longitudes de onda ligadas al diámetro de la Tierra y en la banda VLF, entre 3 y 30 kHz, con longitudes de onda relacionadas con la distancia que separa la superficie de la Tierra y la ionosfera [1][2].

La sonda Huygens transportó un conjunto de instrumentos dedicados a la detección de actividad eléctrica natural en Titán. Entre otras magnitudes físicas, midió el campo eléctrico a través de antenas dipolares. La señal obtenida se muestreó, enviándose a la Tierra muestras del espectro de potencia correspondientes a diferentes alturas. En la banda VLF, la sonda Huygens envió 2507 secuencias de datos, pero no todas las secuencias contienen la misma información; mientras las primeras 471 secuencias, tomadas entre los 141 y 61 km de altitud, contienen 32 líneas espectrales entre 180 Hz y 11.34 kHz, con un paso en frecuencia de 360 Hz, el resto

contiene sólo 14 líneas espectrales, desde 720 Hz a 10.08 kHz, con un paso de 720 Hz, por lo que será muy difícil obtener información relevante de estas últimas secuencias. En esta comunicación presentaremos un procedimiento para el análisis de las secuencias de datos con 32 líneas espectrales, basado en la separación entre el *early* y el *late-time*, que sacará a la luz las resonancias de la cavidad electromagnética ionosfera-superficie en Titán y compararemos los resultados con los aportados por la simulación computacional de la atmósfera de Titán mediante el método numérico TLM.

II. LA ATMÓSFERA DE TITÁN COMO CAVIDAD RESONANTE

La Fig. 1 muestra los últimos perfiles de conductividad propuestos en [3] para Titán junto con el de la Tierra, pudiéndose observar como la conductividad aumenta con la altura hasta alcanzar valores propios de un conductor a 100 km en la Tierra y a valores superiores a los 400 km en Titán.

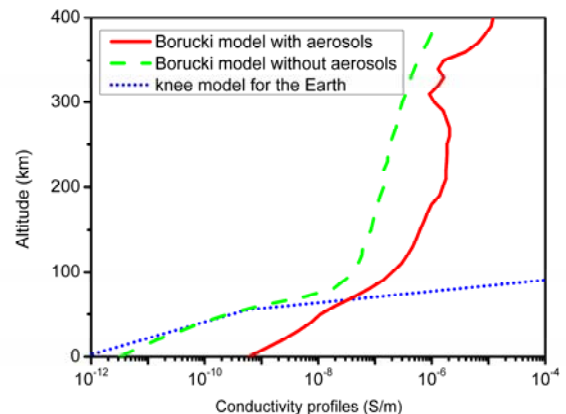


Fig. 1. Perfiles de conductividad en las atmósferas de Titán y la Tierra.

III. MODELO NUMÉRICO TLM PARA MODOS TRANSVERSALES

Para realizar una malla TLM adecuada [2],[4] que nos permita una simulación eficaz de los modos transversales en la atmósfera de Titán, debe tenerse en cuenta varias consideraciones como el tamaño de los nudos, la excitación y las fronteras externas. Considerando que una longitud de

onda debe de ser muestreada al menos entre 6 u 8 veces y que el primer modo transversal debe de tener una longitud de onda de aproximadamente el doble del valor de la distancia que separa la ionosfera de la superficie, se ha elegido una longitud $\Delta r = 5$ km para el tamaño de los nudos en la dirección radial. Para las direcciones acimutal y cenital, se ha elegido $\Delta\vartheta = \Delta\varphi = \Delta r/r_0$, con $r_0=2575$ km el radio de Titán, con el fin de minimizar el error numérico asociado a la dispersión de la malla TLM [5]. El pequeño tamaño de los nudos impide una simulación total de la cavidad y sólo se ha considerado el volumen limitado por las superficies de coordenadas esféricas mostradas en la Fig. 2.

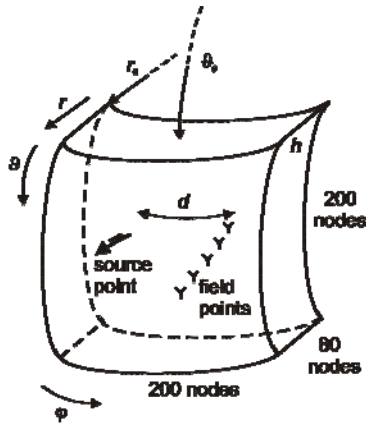


Fig. 2. Geometría y coordenadas en la malla TLM.

Para la excitación se ha elegido un pulso dado por una doble exponencial usualmente utilizado para la simulación de descargas eléctricas [6], mientras que, en este caso, dada las elevadas pérdidas óhmicas asociadas a las corrientes de conducción los resultados son independientes de la frontera absorbente implementada.

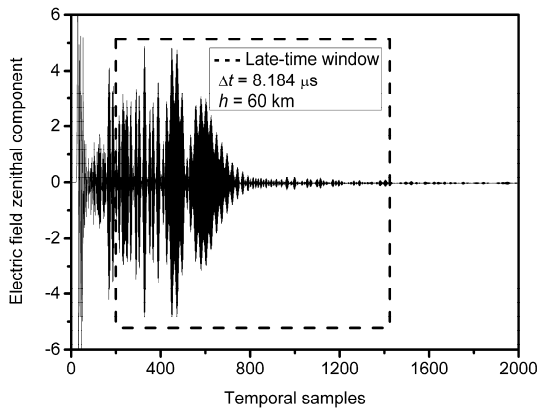


Fig. 3. Campo eléctrico a 60 km de altitud.

Una señal electromagnética generada por un pulso o por una excitación transitoria tiene dos partes, una primera parte, denominada *early-time*, asociada con la excitación, y una segunda parte, o *late-time*, que contiene la información sobre el camino recorrido y la frontera del sistema [7]. La Fig. 3 muestra la evolución temporal del campo eléctrico a 60 km de altitud, mientras que en la Fig. 4 se representa el espectro del campo eléctrico a diferentes altitudes, siendo en todos los casos representados por líneas relativamente suaves, no mostrándose resonancias u otras formas destacables. Sin embargo, la situación cambia considerablemente cuando se

elimina de la secuencia temporal las muestras asociadas al *early-time*, de duración similar a la del pulso de excitación, y se analiza el *late-time*; en este caso, una sucesión de picos resonantes se observan en el espectro *late-time* que se muestra en la Fig. 5. Midiendo la distancia en frecuencia entre picos, se obtienen las distribuciones que se muestran en la Fig. 6 para los dos perfiles de conductividad mostrados en la Fig. 1. Un ajuste con funciones gaussianas da un valor

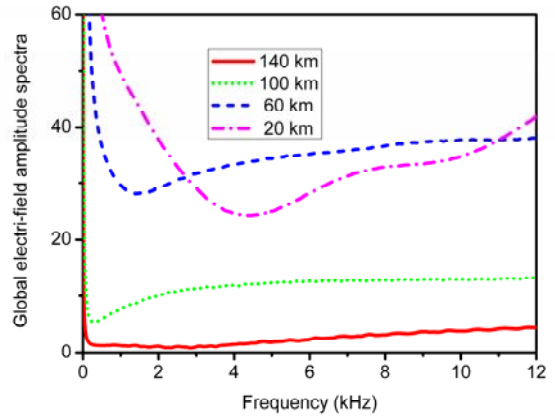


Fig. 4. Espectros del campo eléctrico dados por el TLM.

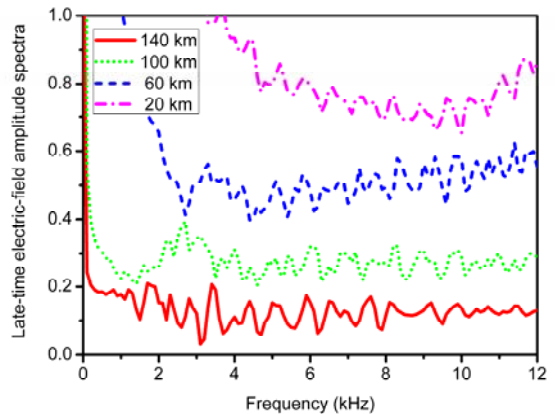


Fig. 5. Espectros *late-time* del campo eléctrico a diferentes altitudes.

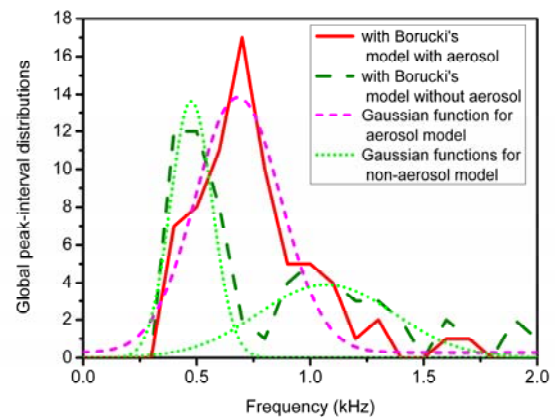


Fig. 6. Distribución de la distancia entre picos en los espectros *late-time* generados por el método TLM en la simulación de la cavidad de Titán.

central de 0.68 kHz para la conductividad con aerosoles y picos a 0.48 y 1.07 kHz para el caso de ausencia de estos.

IV. ANÁLISIS *LATE-TIME* DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Para ilustrar el funcionamiento del método, consideraremos un sistema físico hipotético con dos resonancias en la

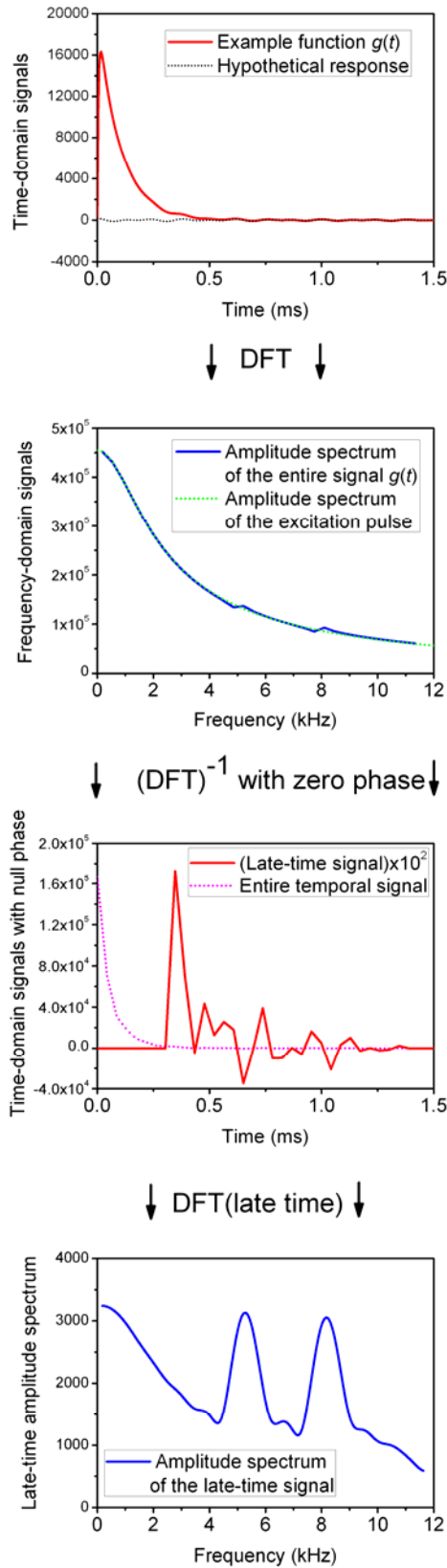


Fig. 7. Procedimiento de análisis aplicado a la función ejemplo.

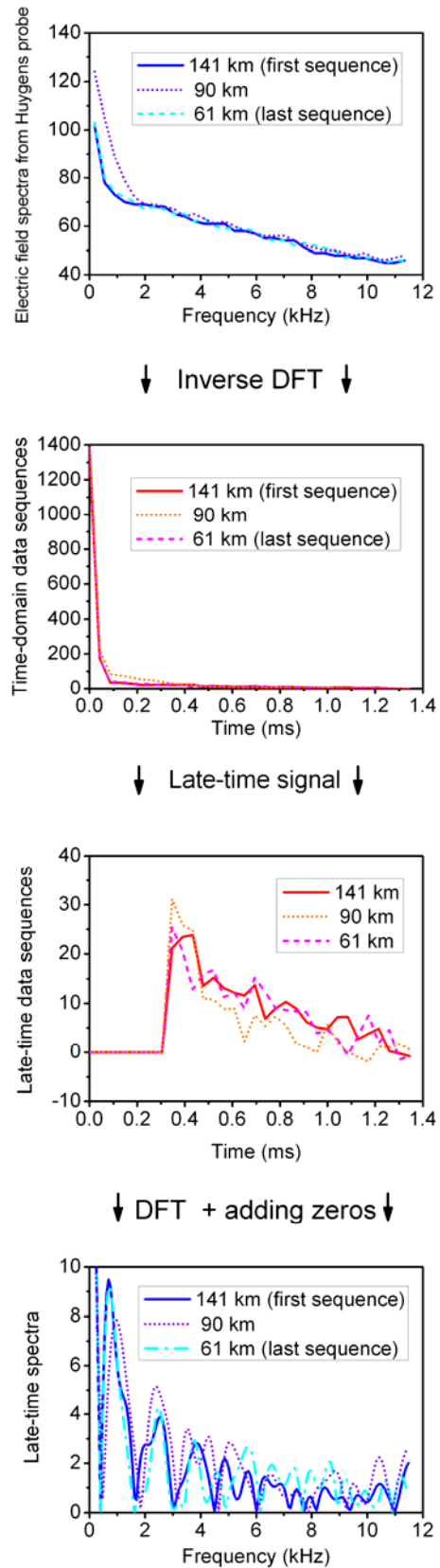


Fig. 8. Análisis de tres de los espectros enviados por la sonda Huygens.

banda VLF a las frecuencias de 5 y 8 kHz que ha sido excitado con un pulso. Como la respuesta no forzada de un sistema puede ser escrita como una serie de oscilaciones naturales expresadas por el producto de cosenos y funciones exponenciales decrecientes, la respuesta completa puede ser escrita como [6][7]:

$$g(t) = 20 \times 10^3 \left(e^{-10^4 t} - e^{-2 \cdot 10^4 t} \right) + 80 e^{-t \cdot 10^3 \ln 2} \left(\cos 2\pi \times 5 \times 10^3 t + \cos 2\pi \times 8 \times 10^3 t \right) \quad (1)$$

La función anterior y su DFT (Discrete Fourier Transform) se muestran en la Fig. 7. Inicialmente las resonancias son imperceptibles en el espectro, pero, después de pasar el espectro al dominio del tiempo y eliminar el *early-time*, la posterior vuelta al dominio de la frecuencia hace que aparezcan visibles claramente las resonancias. El proceso comentado anteriormente se describe gráficamente en la Fig. 7.

Una vez descrito y validado el procedimiento de análisis, se ha aplicado a los 471 espectros enviados por la sonda Huygens. En la Fig. 8 se muestra tres de ellos y las sucesivas etapas de su análisis: Paso al dominio del tiempo, eliminación del *late-time*, y vuelta al dominio de la frecuencia. Los nuevos espectros, tal como ocurriese con los campos generados por el modelo numérico TLM, presentan una sucesión de picos que deben estar asociados a las sucesivas reflexiones de la onda electromagnética sobre la superficie de la Tierra y en la ionosfera y que generan una sucesión de resonancias que comienza con la semilongitud de onda que se ajusta a la distancia superficie-ionosfera y continua con sus sucesivos múltiplos. Medida la distancia en frecuencia entre picos contiguos, puede generarse la distribución mostrada en la Fig. 9 que, una vez ajustada mediante dos funciones gaussianas, aporta máximos a los valores de 0.67 kHz y 1.1 kHz, siendo el segundo pico prácticamente el doble del primero y generado por la pérdida de algunos de los picos. La distribución mostrada en la Fig. 9 es similar a la obtenida mediante los datos numéricos TLM (Fig. 6) cuando el perfil de conductividad con aerosoles es introducido en la simulación numérica.

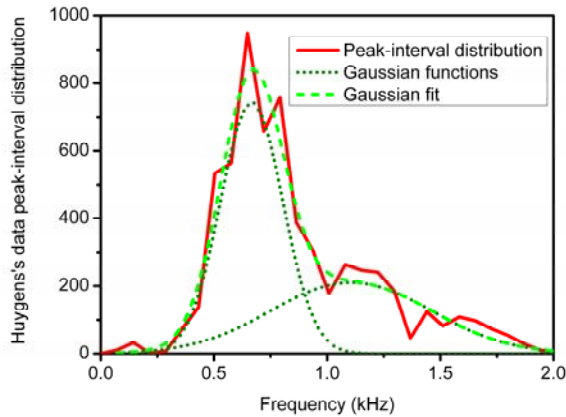


Fig. 9. Distribución de la distancia entre picos para los datos medidos por la sonda Huygens en la atmósfera de Titán, tras el procedimiento de análisis.

V. CONCLUSIONES

La sonda Huygens midió el campo eléctrico natural en la banda VLF en la atmósfera de Titán. Siguiendo un modelo terrestre, los espectros enviados deberían contener las resonancias asociadas a las múltiples reflexiones de una onda electromagnética sobre las superficies conductoras que, para estas frecuencias, representan la superficie del planeta o satélite y su ionosfera. Sin embargo, los espectros recibidos son aparentemente planos y carentes de resonancias. Este

hecho es explicado por la simulación computacional mediante el método TLM de la atmósfera de Titán y se debe al perfil de la conductividad que hace de la atmósfera de Titán una cavidad no tan bien definida como la de la Tierra y con elevadas pérdidas óhmicas asociadas al lento incremento de la conductividad con la altitud. No obstante, si los datos obtenidos por la sonda Huygens son llevados al dominio del tiempo y posteriormente es obtenido el espectro del *late-time*, los nuevos espectros presentan sucesivos picos asociados a múltiples resonancias, cuya distribución de distancia en frecuencias está en torno al valor central de 0.67 kHz, que es aproximadamente el valor aportado para esta magnitud por la simulación numérica de la atmósfera de Titán mediante el método TLM, cuando es usado el perfil con aerosoles mostrado en la Fig. 1. La correlación entre los datos experimentales y la simulación numérica, además de comprobar que los perfiles dados en [2] para la conductividad de Titán son adecuados, muestra que la distancia eficaz entre la superficie de Titán y su ionosfera es de aproximadamente 220 km, considerablemente mayor que en la atmósfera terrestre donde este valor se sitúa en torno a los 75 km.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado parcialmente por el Ministerio de Educación y Ciencia, bajo el proyecto FIS2010-15170, y por la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía, bajo el proyecto PO7-FQM-03280, cofinanciados ambos con fondos FEDER de la Unión Europea.

REFERENCIAS

- [1] J.A. Morente, J. A. Portí, C. Blanchard, E. A. Navarro, and A. Salinas, "An analysis of VLF electric field spectra measured in Titan's atmosphere by the Huygens probe", *J. Geophys. Res.*, vol. 114, E06002, 2009.
- [2] J.A. Morente, J. A. Portí, B. P. Besser, A. Salinas, H. I. M. Lichtenegger, E. A. Navarro, and G. J. Molina-Cuberos, "A numerical study of atmospheric signals in the Earth-ionosphere electromagnetic cavity with the Transmission Line Matrix method", *J. Geophys. Res.*, vol. 111, A10305, 2006.
- [3] W.J. Borucki, R.C. Whitten, E.L.O. Bakes, E. Barth, S. Tripathi, "Predictions of the electrical conductivity and charging of the aerosols in Titan's atmosphere", *Icarus*, vol. 181, pp. 527-544, 2006.
- [4] J.A. Morente, G.J. Molina-Cuberos, J.A. Portí, B.P. Besser, and K. Schwingenschuh, "A study of the propagation of electromagnetic waves in Titan's atmosphere with the TLM numerical method", *Icarus*, vol. 162, pp. 374-384, 2003.
- [5] J.A. Morente, G. Giménez, J.A. Portí, and M. Khalladi, "Dispersion analysis for a TLM mesh of symmetrical condensed nodes with stubs", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, pp. 452-456, 1995.
- [6] A.I. Sukhorukov, "Lightning transient fields in the atmosphere-low ionosphere", *J. Atmos. Terr. Phys.*, vol. 58, pp. 1711-1720, 1996.
- [7] J.A. Morente, J.A. Portí, A. Salinas, E.A. Navarro, "Evidence of electrical activity on Titan drawn from the Schumann resonances sent by Huygens probe", *Icarus*, vol. 195, pp. 802-811, 2008.