

Simulación Física del Centelleo Ionosférico para Constelaciones LEO-PNT

Pere Hernández⁽¹⁾, Carlos Molina^(1,2), Adriano Camps^(1,2,3).

pere.hernandez@estudiantat.upc.edu, carlos.molina@upc.edu, adriano.jose.camps@upc.edu

⁽¹⁾CommSensLab-UPC, Dpt. de Teoria del Senyal i Comunicacions, Universitat Politècnica de Catalunya, UPC Campus Nord, edifici D4, 08034 Barcelona, España

⁽²⁾Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC), C/Estevé Terradas, 1, Edifici RDIT, Campus PMT-UPC, 08860 Castelldefels (Barcelona), Spain.

⁽³⁾ASPIRE Visiting International Professor, UAE University CoE, PO Box 15551, Al Ain, United Arab Emirates

Abstract- Ionospheric scintillation is a major problem in satellite communications, notably in the low part of the radio-frequency spectrum, introducing random intensity and phase fluctuations in the received signal. LEO-PNT (Low Earth Orbit-Position Navigation and Timing) constellations are emerging to improve the performance of GNSS (Global Navigation Satellite Systems) constellations. Since the planned frequency bands span from VHF to C-band, some of these bands may be much affected by ionospheric scintillation. To optimize their operation, it is necessary to characterize the temporal behavior of the scintillation as realistically as possible, considering the geometry of the systems, the characteristics of the ionosphere, and the frequency of operation. In this study, Rino's Physics-based ionospheric scintillation model is applied to obtain intensity and phase time series of perturbed signals transmitted from an arbitrary satellite (VLEO, LEO, MEO or GEO) to an arbitrary object under the ionosphere electron density peak (static ground receivers, planes...) at different frequencies.

I. INTRODUCCIÓN

Una de las principales limitaciones de los sistemas GNSS y de las futuras constelaciones LEO-PNT [1] es el centelleo ionosférico, que provoca variaciones aleatorias en la intensidad y la fase de la señal recibida. Todos los sistemas GNSS usan la banda L, excepto el NAVIC (anteriormente llamado Indian Regional Navigational Satellite System o IRNSS), que también usa la banda S. Sin embargo, los futuros sistemas LEO-PNT planean utilizar frecuencias desde VHF hasta la banda C, y algunas de estas bandas pueden verse seriamente afectadas por dicho centelleo.

Para simular el centelleo ionosférico típicamente se han venido utilizando simuladores basados en el modelo de Humphrey [2], que permiten generar secuencias temporales aleatorias de intensidad y fase a partir de dos parámetros (S_4 que cuantifica el centelleo de la intensidad de la señal, y τ_0 que determina la rapidez de las variaciones temporales). Estos simuladores son útiles para ver el posible comportamiento del centelleo y diseñar técnicas de compensación en los receptores. Sin embargo, el modelo de Humphrey no permite simular varias frecuencias simultáneamente, ni la correlación del centelleo entre ellas, y en principio sólo aplica para centelleo de intensidad y de fase en la zona ecuatorial. Además, la correlación del centelleo entre diferentes bandas de frecuencia está poco estudiada, y está limitada a las bandas de los actuales sistemas GNSS [3,4].

En este trabajo se estudia el comportamiento temporal del centelleo de la ionosfera a partir del modelo del “Multiple

Phase Screen” (MPS) de Rino [5], usando como parámetros de entrada las salidas de WBMOD [6]. En primer lugar, se calculará la “pantalla de fase” o “phase screen” asociada a las fluctuaciones de la concentración de electrones, con la misma semilla del generador de números aleatorios, y después se calcularán las secuencias de intensidad y fase para cada frecuencia en función de las posiciones y trayectorias del transmisor (GEO, MEO, LEO o VLEO) y receptor (aerotransportado, terrestre). Finalmente, se calculan los parámetros S_4 y σ_ϕ equivalentes.

En la Sección II se describe la metodología, el modelo de Rino del centelleo, y los parámetros más importantes de la simulación. En la Sección III se presentan algunos resultados de las simulaciones. En la Sección IV se discuten los resultados y en la Sección V se resumen las conclusiones.

II. METODOLOGÍA

El centelleo ionosférico es un fenómeno observado cuando las ondas electromagnéticas atraviesan la ionosfera, y que se ve reflejado en abruptas perturbaciones aleatorias en la intensidad y la fase de la onda. Éstas son debidas a la interferencia entre los diferentes trayectos recorridos por las ondas electromagnéticas entre un emisor, a un lado de la ionosfera, y un receptor, al otro.

La ionosfera es una capa de la atmósfera fuertemente ionizada que contiene electrones libres e iones, además de partículas de gas neutras. A pequeña escala, la distribución de la densidad de electrones no es homogénea y presenta fluctuaciones espaciales en escalas que pueden ser del orden de decenas de metros a kilómetros. Estas fluctuaciones de la densidad de electrones se traducen en variaciones espaciales del índice de refracción. Este patrón de fluctuaciones espaciales puede desplazarse siguiendo el desplazamiento del plasma ionosférico, y además, este patrón puede evolucionar lentamente con el tiempo, aunque habitualmente es despreciable frente a otros movimientos como el desplazamiento de la propia ionosfera, o el movimiento del emisor y/o receptor.

Una de las teorías de centelleo más ampliamente aceptadas fue propuesta por C. Rino en 1979 [5]. Se basa en un modelo de múltiples capas generadas estocásticamente (MPS) que describen las fluctuaciones de densidad electrónica usando varios parámetros de entrada relacionados con el tamaño, la forma y la distribución espectral de dichas perturbaciones.

El parámetro más importante de este modelo es el “parámetro de intensidad integrado en altura” o CkL , que controla la amplitud de las fluctuaciones de densidad electrónica en una capa de espesor L , habitualmente de 1 km de grosor situada en el pico de densidad de la ionosfera, a unos 350 km (aunque varía temporal, espacialmente, y con la actividad solar). Otros parámetros importantes son a y b , que representan la relación de aspecto de las irregularidades. Valores elevados, de hasta 1:20 se traducen en perturbaciones altamente elongadas en la dirección de las líneas de campo magnético. Otro parámetro del modelo de Rino es q , la pendiente de la cola de la distribución espectral de las fluctuaciones.

Todos estos parámetros se han estudiado de forma observacional, y han dado lugar a varios modelos de centelleo ionosférico. El más usado habitualmente es el WideBand ionospheric scintillation MODel (WBMOD) [6]. Dicho modelo provee los valores de q , a , b , las velocidades de deriva ionosférica y la distribución estadística de CkL en función de parámetros de entrada como la ubicación geográfica, la hora local, día del año, y variables de la meteorología espacial como el índice planetario K_p y el número de manchas solares $R12$.

El modelo de Rino permite calcular las interferencias producidas por los rayos que atraviesan una región perturbada de la ionosfera y obtener la intensidad y la fase resultante de la superposición de todos los elementos del frente de onda.

Las fluctuaciones en intensidad y fase observadas en la onda recibida pueden cuantificarse con dos parámetros [6] característicos del centelleo ionosférico: S_4 y σ_ϕ . El S_4 da cuenta de las fluctuaciones de intensidad y se calcula según la Ec. (1):

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}} \quad (1)$$

Por otra parte, considerando las fluctuaciones en fase, el parámetro usado es σ_ϕ :

$$\sigma_\phi = \sqrt{\langle \phi^2 \rangle - \langle \phi \rangle^2} \quad (2)$$

En este trabajo se utiliza el modelo Rino [5] con los parámetros de salida del WBMOD [6] para generar series temporales de valores de intensidad y *fase* de la onda recibida, a partir de las cuáles se calcularán S_4 y σ_ϕ usando las ecuaciones anteriores.

III. RESULTADOS

A. Cambio de satélite o receptor

A continuación, se presentan un par de ejemplos de las respuestas temporales del centelleo ionosférico para distintos satélites o receptores. Cada ejemplo contiene dos figuras:

- Las dos primeras (a y b) muestran una representación bidimensional de las variaciones de intensidad y fase a la altura del receptor sobre la Tierra, marcando en rojo el transecto cada dt^1 segundos del “pierce point” en la ionosfera (punto de corte de la “phase screen” de la ionosfera con la recta entre el emisor y el receptor) incluyendo la velocidad del transmisor, receptor, y la

deriva horizontal de la ionosfera (moviéndose a una velocidad no constante de ~ 100 m/s).

- Las dos segundas figuras (c y d) muestran las fluctuaciones de intensidad y fase, a lo largo de la trayectoria simulada. La fase calculada es únicamente la variación inducida por el centelleo. Nota: esta fase **no** es la calculada habitualmente en la monitorización del centelleo en GNSS, que se calcula a partir de las fluctuaciones de fase después de restar la tendencia de la fase (i.e. “detrended” después de usar un filtro paso-alto de Butterworth de 0.1 Hz de ancho de banda).

El primer ejemplo corresponde a una comunicación entre un satélite LEO y un receptor en un avión (Fig. 1) con una frecuencia de 435 MHz. El satélite LEO está configurado a una altura de 700 km con una velocidad de 7500 m/s, y el avión a una altura de 11 km y una velocidad de 250 m/s.

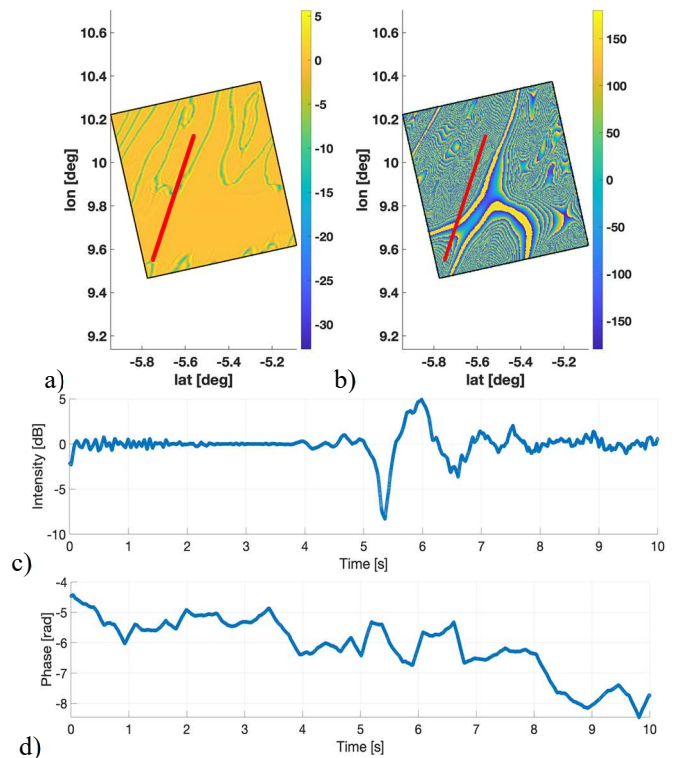


Fig. 1. a) Mapa de intensidad del centelleo, b) Mapa de la fase del centelleo, c) Evolución temporal de la intensidad y d) fase a lo largo del trayecto para un escenario LEO-avión. Los parámetros S_4 y σ_ϕ están en la Tabla I.

El segundo ejemplo corresponde a una comunicación entre un satélite MEO y un receptor en un avión (Fig. 2) también con una frecuencia de 435 MHz. El satélite MEO está configurado a una altura de 23380 km y con una velocidad de 3660 m/s, y el avión a una altura de 11 km y una velocidad de 250 m/s.

En la Tabla I se muestran los valores de los parámetros estimados S_4 y σ_ϕ para estos ejemplos. Nótese que, aunque S_4 es muy similar, al ser la velocidad relativa del LEO mucho mayor que la del MEO, también las variaciones de fase son de mayor amplitud y más rápidas.

¹ dt es el tiempo de muestreo en segundos

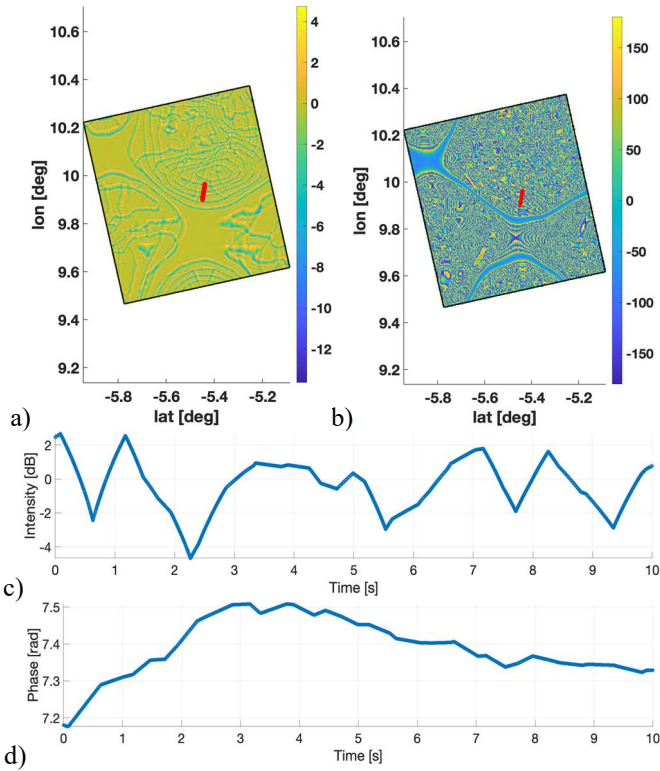


Fig. 2. a) Mapa de intensidad del centelleo, b) Mapa de la fase del centelleo, c) Evolución temporal de la intensidad y d) fase a lo largo del trayecto para un escenario MEO-avión. Los parámetros S_4 y σ_ϕ están en la Tabla I.

TABLA I
PARÁMETROS DE LOS EJEMPLOS 1 Y 2

Satélite - Receptor	S_4	σ_ϕ
LEO - Avión	0.1591	14.47°
MEO - Avión	0.1632	0.53°

B. Impacto de la frecuencia en distintas bandas de frecuencia

En este caso se puede ver el efecto de cambiar la banda de frecuencia a la que se trabaja para una misma geometría, en el caso un sistema LEO-avión.

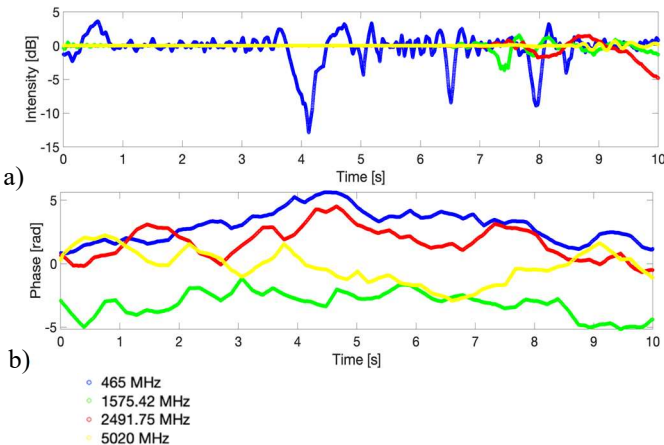


Fig. 3. a) Evolución temporal de la intensidad y b) fase a lo largo del trayecto para un escenario LEO-avión a 465 MHz (azul), 1575.42 MHz (verde), 2491.75 MHz (rojo) y 5020 MHz (amarillo).

Como se puede observar, al aumentar la frecuencia, tanto la amplitud del centelleo de intensidad como de fase decrecen.

En la Tabla II se muestran los valores de los parámetros S_4 y σ_ϕ para todas las frecuencias.

TABLA II
PARÁMETROS PARA LAS DISTINTAS FRECUENCIAS

Frecuencia	S_4	σ_ϕ
465 MHz	0.21	14.62°
1575.42 MHz	0.06	22.01°
2491.75 MHz	0.08	19.88°
5020 MHz	0.01	19.33°

C. Impacto de la frecuencia dentro del ancho de banda

Las variaciones de intensidad y fase debidas al centelleo también son apreciables dentro de una misma banda de frecuencia. La distorsión de una señal con un cierto ancho de banda también se ve afectada en mayor o menor medida por estas fluctuaciones. En la Fig. 4 se pueden observar la respuesta en frecuencia de la intensidad (4a y 4c) y la fase (4b y 4d) para dos instantes concretos (a-b y c-d).

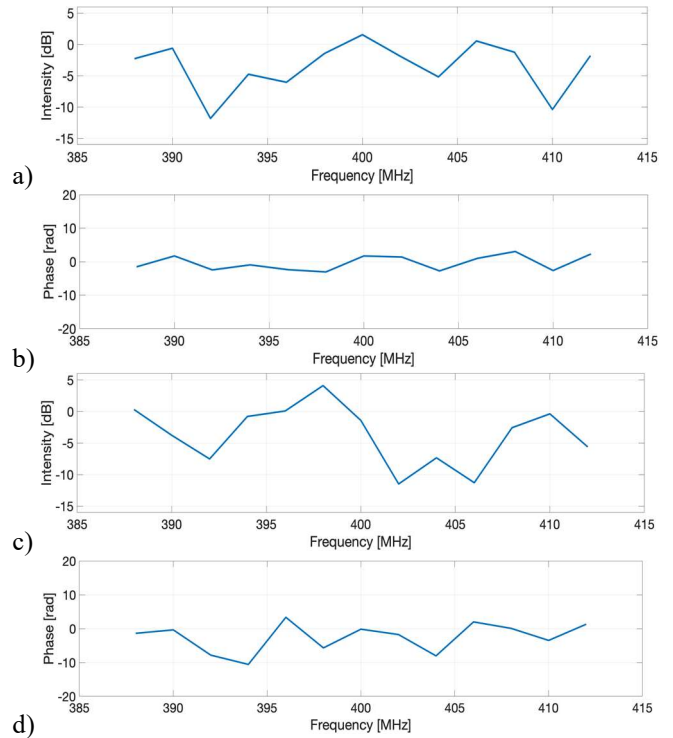


Fig. 4. Respuestas en frecuencia de a-c) intensidad y b-d) fase del centelleo ionosférico en dos instantes de tiempo, a-b) t_1 y c-d) t_2 , en un canal con una frecuencia central de 400 MHz y con un ancho de banda de 24 MHz

Esta respuesta frecuencial del canal, que además es variante en el tiempo, degrada aún más la interferencia intersimbólica o ISI y limita la velocidad de transmisión. Estos resultados serán presentados en la conferencia.

IV. DISCUSIÓN

Observando los mapas de centelleo de intensidad y de fase de los diferentes ejemplos se puede observar que la distancia recorrida por el "ionospheric pierce point" es función de la velocidad de movimiento del satélite, del receptor y de la ionosfera. Además, dependiendo de la posición inicial del receptor y de las direcciones de las distintas velocidades relativas, el recorrido va a ser diferente y por la tanto, las variaciones temporales de intensidad y fase, también.

Igualmente, cuanto menor sea la velocidad neta, más lenta será la evolución temporal de la intensidad y la fase a lo largo del tiempo. Esto no afecta significativamente al parámetro S_4 , pero sí que afecta al parámetro σ_ϕ , ya que cuanto menor sea la variación temporal de la fase, menor será el parámetro σ_ϕ .

Sí se observa el impacto en frecuencia para una misma realización de la "phase screen". Manteniendo todos los parámetros constantes, se puede observar que, al aumentar la frecuencia, las fluctuaciones temporales de intensidad se hacen cada vez más suaves, más lentas en el tiempo y de menor amplitud, hasta que se alcanza la banda C, donde el efecto del centelleo en la intensidad es casi despreciable. El cambio de frecuencia no parece tener ningún efecto significativo en la fase, aunque este resultado se tendrá que reevaluar después de aplicar el filtro paso-alto con frecuencia de corte 0.1 Hz.

Cuando se analiza el efecto del cambio de frecuencia dentro de un ancho de banda, se puede ver la respuesta en el dominio de la frecuencia y del tiempo de la señal recibida a través del canal afectado por el centelleo ionosférico.

V. CONCLUSIONES

En este estudio se han presentado los resultados de un simulador físico del comportamiento del centelleo ionosférico con el que ya se han podido evaluar las distintas dependencias del centelleo con parámetros de la ionosfera, la frecuencia, o la geometría de la escena (transmisor y receptor).

Se ha observado que las variaciones temporales de la fase dependen en gran parte de la geometría del sistema, del tipo de satélite transmisor y receptor, y del movimiento de la ionosfera. Por la parte de la intensidad se ha observado la fuerte dependencia con la frecuencia del sistema.

También se ha propuesto una forma de optimizar el canal en cuanto a la relación entre la velocidad de transmisión (ancho de banda) y la calidad del canal mediante el análisis del centelleo dentro de un mismo ancho de banda.

Estos resultados preliminares ya permiten observar y predecir mejor el comportamiento de las señales de comunicaciones en los sistemas GNSS y LEO-PNT. En un futuro se realizarán simulaciones más largas, de más escenarios y de varios satélites PNT simultáneamente, y de manera natural aparecerá la correlación parcial del centelleo de intensidad de fase entre ellos. Esto contribuirá a optimizar los sistemas basados en GNSS y LEO-PNT.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto "GENESIS: GNSS Environmental and Societal Missions—Subproject UPC", PID2021-126436OB-C21, del MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y EU FEDER "Otra manera de hacer Europa".

REFERENCIAS

- [1] F. S. Prol, S. Kaasalainen, E. S. Lohan, M. Z. H. Bhuiyan, J. Praks and H. Kuusniemi, "Simulations using LEO-PNT systems: A Brief Survey", 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, USA, 2023, pp. 381-387, doi: 10.1109/PLANS53410.2023.10140118.
- [2] T.E. Humphreys, M. L. Psiaki, J. C. Hinks, B. O'Hanlon and P. M. Kintner, Jr., "Simulating Ionosphere-Induced Scintillation for Testing GPS Receiver Phase Tracking Loops", IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, Vol. 3, No. 4, August 2009, pp- 707-715
- [3] C. Carrano, K. Groves, W.J. McNeil, P.H. Doherty, "Scintillation Characteristics Across the GPS Frequency Band," 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation 2012, Nashville, Tennessee, September 17-21, 2012
- [4] Viet Khoi Nguyen, Adria Rovira-García, Jose Miguel Juan, Jaume Sanz, Guillermo Gonzalez-Casado, The Vinh La, Tung Hai Ta, "Measuring phase scintillation at different frequencies with conventional GNSS receivers operating at 1 Hz" vol 93, 1985, 2019.
- [5] C. Rino, The theory of scintillation with Applications in Remote Sensing, 1979. Ed. Wiley-IEEE Press ISBN: 9780470644775
- [6] J. A. Secan, R. M. Bussey, E. J. Fremouw, Sa. Basu, "An improved model of equatorial scintillation", Radio Science, vol. 30, Issue 3, May-June, 1995, pp. 607-617.