

Estimación del ancho de banda para comunicaciones satelitales tomando en cuenta la dispersión en la ionosfera

Vladislav V. Kravchenko
Rabindranath Reséndiz-Vázquez

¹ Departamento de Matemáticas,
CINVESTAV del IPN Campus Querétaro,
Apartado postal 1-798, Arteaga núm. 5, Col. Centro,
Santiago de Querétaro, Querétaro, 76001.
MÉXICO.

² Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Culhuacán, Instituto Politécnico Nacional (IPN).
Av. Santa Ana 1000, 04430, México, DF.
MÉXICO.

correo electrónico: vkravchenko@qro.cinvestav.mx
rresendiz@ipn.mx

Recibido el 21 de noviembre de 2007; aceptado el 7 de mayo de 2008.

1. Resumen

En este trabajo hemos hecho una estimación del ancho de banda que puede ser utilizado en un sistema de comunicaciones satelitales tomando en cuenta la dispersión que sufre la señal en la ionosfera.

Cálculos de anchos de banda son hechos dependiendo de la frecuencia portadora y de acuerdo a la variación de los parámetros de la ionósfera, la concentración electrónica y la frecuencia promedio de colisiones a lo largo de la trayectoria de propagación. También investigamos el cambio en el ancho de banda provocado por el ángulo de elevación del satélite. En la parte final del trabajo, presentamos una comparación de los resultados con otros valores obtenidos mediante el uso de una fórmula establecida para el cálculo de ancho de banda en comunicaciones satelitales.

Palabras clave: ionosfera, dispersión, ancho de banda, velocidad de grupo.

2. Abstract (Estimation of the satellite communications bandwidth taking into account the ionospheric dispersion)

In the present work an estimation of the bandwidth that can be utilized in a satellite communications system is presented, taking into account the dispersion of the signal in the ionosphere.

Bandwidth calculations are made depending on the carrier frequency and according to the variation of the parameters of the ionosphere, electronic concentration and average collision frequency, along the propagation path. We have also investigated the change in the bandwidth caused by the elevation angle of the satellite. In the final part of the work, we present the obtained results compared with others obtained by means of an established formula used for the calculation of bandwidth in satellite communications.

Key words: ionosphere, dispersion, bandwidth, group velocity.

3. Introducción

La ionosfera es la capa de la atmósfera que está compuesta por un número de regiones ionizadas y afecta a la propagación de ondas de radio, principalmente debido a la presencia de iones y electrones libres que están acomodados en capas estratificadas [1].

En un sistema de comunicaciones satelital, la señal, en su trayecto hacia el satélite atraviesa la ionosfera y ésta por sus características afecta a la señal de diferentes maneras.

La ionosfera es un medio dispersivo, en tales medios, el índice de refracción es una función de la frecuencia, por lo tanto, una señal que atraviesa la ionosfera sufre una distorsión provocada por el desfaseamiento de sus componentes espectrales. La magnitud de tal efecto está en función de la frecuencia portadora y de la distancia, provocando cambios en el ancho de banda que ocupa la señal. En la transmisión de señales un factor importante que se debe cuidar es el ancho

de banda, dado que el ancho de banda disponible es un recurso finito y está designado para usos específicos, por lo tanto, los cambios en el ancho de banda que ocupa la señal deben ser tomados en cuenta.

La propagación de señales en la ionosfera y otros medios no homogéneos ha sido de gran importancia y motivo de estudio debido a su aplicación en áreas como comunicaciones satelitales, comunicaciones cósmicas, en otras áreas como radioastronomía, astrofísica y el estudio de plasmas bajo condiciones de laboratorio. En [2] tenemos el estudio de la propagación de ondas electromagnéticas de varias frecuencias en plasmas, considerando ambos casos, medios homogéneos y no homogéneos. En [1] podemos consultar la base matemática para la consideración de la ionosfera en la teoría de propagación de ondas de radio en una ionosfera horizontalmente estratificada.

Se han hecho algunas estimaciones de los efectos que sufre una señal cuando se propaga a través de la ionosfera con diferentes métodos, por ejemplo, en [3] se obtienen algunas ecuaciones para evaluar los efectos de la ionosfera sobre un pulso de FM con forma gausseana. Se hace un análisis de la distorsión de la amplitud, duración y modulación causada por la ionosfera en términos de la densidad electrónica integrada a lo largo de la trayectoria de transmisión. Se observa que cuando un pulso de forma gausseana sale de la ionosfera, su envolvente sigue siendo gausseana pero su amplitud decrece y la duración del pulso se incrementa. En el caso de pulsos sin modular que atraviesan la ionosfera, el ensanchamiento del pulso prevalece en contraste con una reducción de la amplitud.

Cuando se tienen dos pulsos del mismo ancho de banda, un pulso modulado de FM y uno no modulado, la degradación de la amplitud y el ensanchamiento del pulso son iguales [4]. En [4] se pueden consultar gráficas del ancho de banda de 3 dB máximo disponible como función de la frecuencia portadora tomando en cuenta las condiciones de la ionosfera y el ángulo de elevación de 10° y 90° .

En [5] se hace una consideración del tiempo de retardo que sufre una señal al atravesar la ionosfera, se considera el cambio en la velocidad de la señal que es proporcional al número total de electrones libres (TEC). Presenta una expresión para calcular el tiempo de retardo de grupo promedio de una señal que se propaga en la ionosfera, que es la diferencia entre una portadora y su banda lateral, ésta se usa para hacer una aproximación del número total de electrones libres en la ionosfera.

En [6] se menciona que la ionosfera se comporta como una red dispersiva que tiene un retardo de grupo que es directamente proporcional al número de electrones a lo largo de la trayectoria de propagación e inversamente proporcional al cuadrado de

la frecuencia de la señal. Se menciona que cuando un pulso con envolvente gausseana pasa a través de la ionosfera, su envolvente permanece gausseana pero su ancho de banda de 3 dB será más ancho y su amplitud disminuye, se presenta una ecuación del retardo de grupo en función del ancho de banda de 3 dB.

En este trabajo, hemos hecho una estimación del ancho de banda máximo que puede ocupar una señal que atraviesa la ionosfera y es afectada por la dispersión. Mediante considerar la velocidad de grupo promedio de la señal en la ionosfera, calculamos la diferencia en tiempos de retardo de las componentes extremas del espectro de la señal y tomando en cuenta la variación de los parámetros de la ionosfera hacemos el cálculo del ancho de banda máximo que permite el desfasamiento.

Al inicio presentamos una fórmula que está establecida en [7] para calcular el ancho de banda en comunicaciones satelitales, para la obtención de ésta, se ha tomado en cuenta la velocidad de fase y al usar esta fórmula no se toman en cuenta posibles cambios en los parámetros de la ionosfera. Posteriormente describimos nuestro método para calcular el ancho de banda utilizando la teoría de propagación en medios con dispersión y considerando la variación de los parámetros de la ionosfera. También hemos obtenido un cálculo de la concentración electrónica integrada con el cual hemos hecho otra estimación del ancho de banda. En la parte final del trabajo presentamos una comparación de los resultados obtenidos.

4. Desarrollo

4.1 Fórmula para el cálculo de ancho de banda en comunicaciones satelitales

En [7] se encuentra una fórmula que puede ser empleada para el cálculo del ancho de banda para comunicaciones satelitales, en la obtención de esta fórmula se ha considerado el desfasamiento que sufren las componentes espectrales de la señal, tomando en cuenta la velocidad de fase para calcular la diferencia en tiempos de propagación, en la obtención de esta fórmula se ha sustituido un valor de la concentración electrónica integrada a lo largo de la trayectoria de propagación.

La estimación cuantitativa de la dispersión se reduce a la determinación de la diferencia en tiempos de propagación de las componentes extremas del espectro de la señal [7], la energía de la cual está concentrada en el intervalo de frecuencias entre:

$$f_0 + \frac{\Delta f_{máx}}{2} \quad \text{y} \quad f_0 - \frac{\Delta f_{máx}}{2} \quad (1)$$

donde f_0 es la frecuencia portadora de la señal y $\Delta f_{m\acute{a}x}$ es el ancho de banda máximo buscado.

Para determinar la diferencia en tiempos de propagación, se toma en cuenta la velocidad de fase de cada una de las componentes extremas de la señal y se obtiene que:

$$\Delta\varphi_{m\acute{a}x} = 2\pi\Delta f_{m\acute{a}x} \cdot \Delta t_{m\acute{a}x} \quad (2)$$

donde $\Delta\varphi_{m\acute{a}x}$ es la diferencia de fase máxima y $\Delta t_{m\acute{a}x}$ es la diferencia en tiempos de propagación de las componentes extremas.

Se supone que $\Delta\varphi_{m\acute{a}x} \ll 2\pi$ y se toma que:

$$\Delta f_{m\acute{a}x} \times \Delta t_{m\acute{a}x} < 0.1 \quad (3)$$

La concentración electrónica integrada en condiciones promedio es igual a $3 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$ [7] y entonces el ancho de banda se obtiene como [7] :

$$\Delta f_{m\acute{a}x} < 1.1 \times 10^{-6} \sqrt{f_0^3 \text{sen } \theta} \quad (4)$$

donde θ es el ángulo de elevación del satélite, $\Delta f_{m\acute{a}x}$ y f_0 están dados en Hz.

Por medio de sustituir en (4) el ángulo de elevación y la frecuencia portadora, se obtiene el ancho de banda máximo que permite un desfase mucho menor que 2π . Al cálculo mediante esta fórmula lo llamaremos método 1.

4.2 Propagación de ondas en medios con dispersión

En el vacío la exponencial $e^{j\omega t}$ que tiene una sola frecuencia es transmitida como $e^{j(\omega t - kz)}$ y el número de onda k es proporcional a la frecuencia ω : $k = k(\omega) = \omega/c$, entonces la velocidad de fase $\omega/k = c$ es la misma para todas las componentes de frecuencia. Todas las frecuencias del espectro son transmitidas a la misma velocidad y la señal completa llega sin distorsiones.

Sin embargo, una señal de información está compuesta de un espectro de frecuencias y cuando la señal se propaga en un medio en el cual los parámetros constitutivos μ y ϵ son dependientes de la frecuencia, el número de onda es una función más complicada de la frecuencia, entonces la velocidad de fase ya no es la misma para todas las frecuencias. Diferentes frecuencias en el espectro de la señal son transmitidas a diferentes velocidades y llegan a su destino en diferentes tiempos. La señal reconstruida en el receptor aparece entonces distorsionada. Cuando la velocidad depende de la frecuencia, decimos que el medio es un medio dispersivo.

Por lo tanto, para calcular el tiempo que tarda una señal en atravesar la ionósfera debemos considerar su velocidad de grupo.

Tomando en cuenta la llamada dispersión de primer orden [8], tenemos que la velocidad de grupo se obtiene como:

$$v_g = \left. \frac{\partial \omega}{\partial k} \right|_{k=k_0} = \frac{1}{k'_0} \quad (5)$$

donde:

$$k_0 = k(\omega_0), \quad k'_0 = \left. \frac{\partial k}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_0}$$

Entonces, de esta manera, podemos calcular las velocidades de grupo de las componentes extremas de la señal en la ionósfera.

De acuerdo con la teoría de propagación en medios con absorción y el comportamiento de una partícula en un plasma, podemos utilizar la siguiente expresión para el número de onda [9]:

$$k_r = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}\right) \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\nu^2 \omega_p^4}{\omega^2 (\omega^2 + \nu^2 - \omega_p^2)^2}}\right)} \quad (6)$$

En (6), k_r representa la parte real del número de onda complejo k , ω es la frecuencia angular de la onda, ν es la frecuencia promedio de colisiones y ω_p es la llamada frecuencia de plasma.

La derivada de k con respecto a ω en $\omega = \omega_0$ es entonces:

$$k'_r = \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\nu^2 + \omega_0^2}\right) \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\omega_p^4 \nu^2}{\omega_0^2 (\omega_0^2 + \nu^2 + \omega_0^2)^2}}\right)}}{\sqrt{2}c} + \frac{\left[\frac{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\nu^2 + \omega_0^2}\right) \left(-\frac{4\omega_p^4 \nu^2}{\omega_0 (-\omega_0^2 + \nu^2 + \omega_0^2)^3} - \frac{2\omega_p^4 \nu^2}{\omega_0^3 (-\omega_p^2 + \nu^2 + \omega_0^2)^3}\right)}{2 \sqrt{1 + \frac{\omega_p^4 \nu^2}{\omega_0^2 (\omega_0^2 + \nu^2 + \omega_0^2)^2}}} + \frac{2\omega_p^2 \omega_0 \left(1 + \frac{4\omega_p^4 \nu^2}{\omega_0^2 (-\omega_0^2 + \nu^2 + \omega_0^2)^2}\right)}{(\nu^2 + \omega_0^2)^2} \right]}{2 \sqrt{2}c \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\nu^2 + \omega_0^2}\right) \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\omega_p^4 \nu^2}{\omega_0^2 (\omega_0^2 + \nu^2 + \omega_0^2)^2}}\right)}} \quad (7)$$

La frecuencia de plasma al cuadrado es:

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m} \quad (8)$$

Donde N es la concentración electrónica en la ionósfera, ϵ_0 es la permitividad del vacío, e la carga del electrón y m su masa:

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2 \\ e &= 1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \\ m &= 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} \end{aligned}$$

4.3 Parámetros de la ionosfera

El conocimiento que se tiene sobre la ionosfera es producto principalmente de mediciones que se hacen con ondas de radio, a partir de estas mediciones se obtienen datos como la cantidad de electrones libres. Existen varios métodos para estudiar la ionosfera, pero el más utilizado ha sido el empleo de la ionosonda que es un radar de barrido de frecuencias que envía pulsos verticalmente hacia la ionosfera y mide el tiempo que tarda la señal en regresar [10]. A partir de las mediciones de la ionosonda se pueden obtener perfiles de la densidad de electrones y algunos otros datos sobre la ionosfera [10].

El grado de ionización se caracteriza por el número N de electrones libres que hay por unidad de volumen y alcanza su máximo dependiendo de una serie de condiciones aproximadamente de 250 a 400 km de altura. Las causas principales de la ionización de la atmósfera son la radiación ultravioleta y los rayos X provenientes del Sol [9,10].

A partir de mediciones se pueden obtener valores aproximados de la concentración electrónica dependiendo de la altura. En la figura 1 se muestra un perfil de la variación de la concentración electrónica N [9].

El movimiento de un electrón en la ionosfera también es afectado por las colisiones que el electrón tiene con otras partículas. El número promedio de colisiones ν que un electrón tiene por unidad de tiempo también depende de la altura. El cambio en los valores de ν afecta mucho menos a la propagación de ondas que N , por lo tanto es permisible considerar a ν constante en un pequeño intervalo de altura [1]. En la figura 2 se muestra un perfil de la variación de ν dependiendo de la altura [9].

Dado que N y ν dependen de la cantidad de ionización, es decir, de la temperatura, también cambian dependiendo de la latitud, hora del día o estación del año, también tienen variación con respecto al ciclo solar de once años [1,2,9,10].

De las ecuaciones (7) y (8) podemos observar que para calcular la velocidad de grupo de alguna frecuencia, intervienen la concentración electrónica y la frecuencia promedio de colisiones. Los cambios en estos parámetros deben ser tomados en cuenta para obtener una estimación más precisa del ancho de banda en diferentes condiciones.

Hemos utilizado los perfiles de la variación de estos parámetros que están disponibles en [9], de los cuales hemos tomado los valores de N y ν para hacer los cálculos que se muestran en la parte final del trabajo. Sustituyendo estos valores en (7) y haciendo la correspondiente sustitución en (5), podemos calcular la velocidad de grupo para una determinada frecuencia en cada altura.

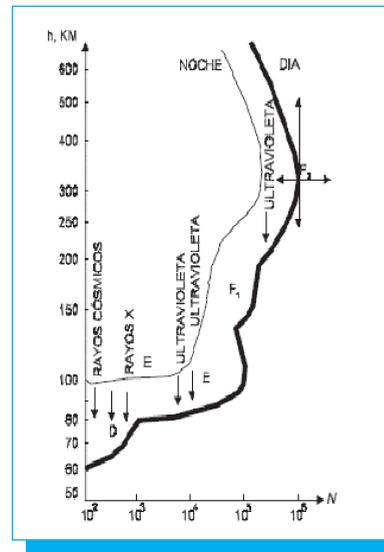


Fig. 1. Variación de N con la altura para el día y la noche.

Los valores de la figura 1 fueron obtenidos en latitudes altas, pero puede hacerse una sustitución de valores de acuerdo a las mediciones que se tengan para cualquier otra latitud, hora o estación del año.

4.4 Cálculo del ancho de banda

Como ya se ha mencionado, los parámetros de la ionosfera cambian dependiendo de la altura, pero si las variaciones no son grandes es posible utilizar un modelo de capas planas [1], [10], es decir, consideramos parámetros constantes en un intervalo relativamente pequeño (véase figura 3).

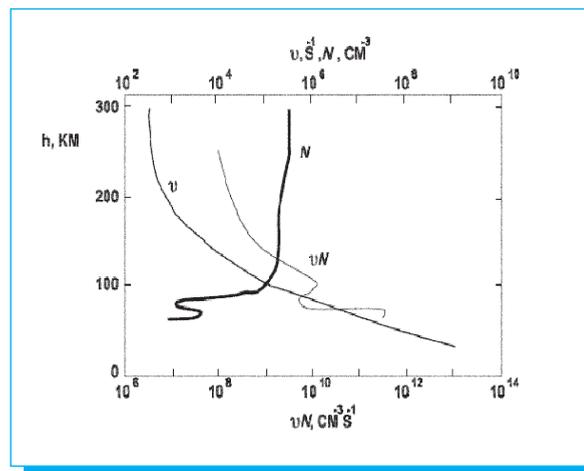


Fig. 2. Variación de la frecuencia promedio de colisiones ν , dependiendo de la altura.

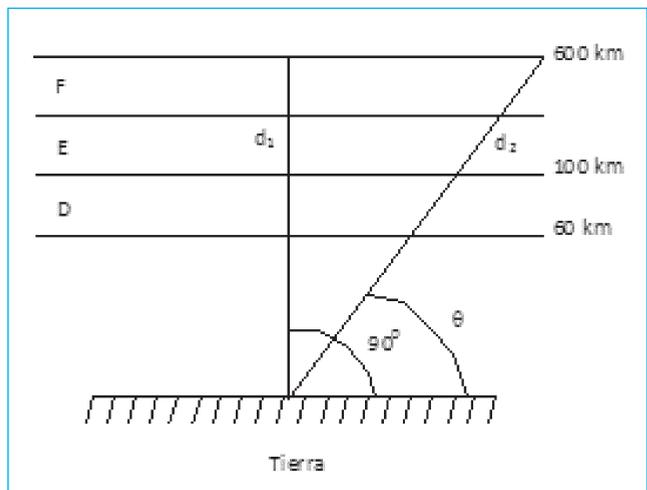


Fig. 3. Distancia recorrida por la señal en la ionosfera de acuerdo al ángulo de elevación del satélite.

Tomamos una frecuencia portadora f_0 , tomando en cuenta la dispersión que sufre la señal en la ionosfera, vamos a investigar qué tan alejado puede estar el ancho de banda Δf de esa frecuencia f_0 de manera que la señal todavía sea reconocible.

Sustituyendo los parámetros correspondientes en la ecuación (7) y utilizando la ecuación (5), calculamos la velocidad de grupo de las componentes extremas de la señal obtenidas con (1), a cada 10 km, desde 60 hasta 600 km que es el intervalo que estamos considerando de la ionosfera en el día y de 100 a 600 km para la noche. Obtenemos la velocidad de grupo promedio a la que la señal atraviesa la ionosfera.

La velocidad de grupo promedio la utilizamos para calcular el tiempo de retardo de cada frecuencia desde la frontera inferior de la ionosfera hasta la frontera superior.

Dado que a menor ángulo de elevación del satélite la señal recorre mayor distancia en la ionosfera, ésta sufre mayor desfaseamiento, véase figura 3.

Además, en la noche la distancia d recorrida en la ionósfera es menor, dada la disminución de la ionización.

La menor distancia recorrida dentro de la ionósfera se tiene cuando el ángulo θ es de 90° , por lo tanto, se podría utilizar un ancho de banda mayor, dado que la señal sufre menos deformación. Cuando $\theta = 10^\circ$, la distancia que recorre la señal en la ionosfera es más grande, se tiene un mayor retardo de la señal y por lo tanto el ancho de banda permisible se reduce considerablemente. Una comparación de los resultados con diferentes ángulos de elevación también se muestra posteriormente.

Una vez que se tiene la distancia recorrida correspondiente al ángulo de elevación y la velocidad de grupo promedio, calculamos el tiempo que tarda cada frecuencia en atravesar la ionosfera:

$$t = \frac{d}{vel\ prom} \quad (9)$$

y el retardo máximo, $\Delta\tau_{máx}$, es la diferencia de los tiempos de retardo de las componentes extremas de la señal:

$$\Delta\tau_{máx} = t_1 - t_2 \quad (10)$$

donde t_2 es el tiempo de retardo de la frecuencia $f_0 + \frac{\Delta f_{máx}}{2}$

y t_1 es el tiempo de retardo de la frecuencia $f_0 - \frac{\Delta f_{máx}}{2}$

calculados con (9).

El retardo máximo para un desfaseamiento máximo de 36° de acuerdo con (3), debe satisfacer la condición:

$$\Delta f_{máx} \cdot \Delta\tau_{máx} < 0.1 \quad (11)$$

de donde podemos obtener $\Delta f_{máx}$ que es el ancho de banda máximo permisible para esa determinada frecuencia f_0 .

En caso de requerir desfaseamientos máximos diferentes de 36° , debemos sustituir valores diferentes de 0.1 en (11).

A nuestra estimación del ancho de banda por medio de este procedimiento la llamaremos método 3.

4.5 Consideración de la integral de la concentración electrónica

Para hacer una comparación, podemos hacer también otra consideración, la fórmula (4) se obtuvo a partir de la sustitución en la siguiente ecuación [7]:

$$\Delta f_{máx} < \sqrt{\frac{0.1 \cdot c \cdot f_0^3 \cdot \sen \theta}{80.8 \int_0^h N(h') dh'}} \quad (12)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío, f_0 es la frecuencia portadora, θ es el ángulo de elevación del satélite, h es la altura y h' es la variable de integración.

Recordemos que para la obtención de la ecuación (4) se sustituyó el valor de la integral de la concentración electrónica como $3 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$. A partir de los valores medidos que tenemos disponibles, podemos también calcular un valor de la integral de N , que podemos sustituir en (12), de esta manera se puede

hacer otra estimación del ancho de banda donde se consideran los cambios en los parámetros de la ionosfera.

En [11], mediante la sustitución de parámetros, hemos obtenido unos valores de la integral de la concentración electrónica, para el día:

$$3.0451899 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$$

y para la noche, el valor calculado de la integral de la concentración electrónica es:

$$0.72909997491 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$$

Sustituyendo estos valores en (12), tenemos una forma diferente de la ecuación (4). Para comparar, también hemos hecho cálculos del ancho de banda de esta manera, que llamaremos método 2.

Los resultados obtenidos con los diferentes métodos se muestran en la siguiente sección.

4.6 Presentación y comparación de resultados

Para mostrar los resultados obtenidos de cálculos de anchos de banda, tomamos diferentes frecuencias portadoras utilizadas en comunicaciones satelitales [12].

Tenemos en las tablas 1 y 2, la frecuencia central f_0 , el ángulo de elevación del satélite θ y los anchos de banda calculados con los diferentes métodos, el método 1 es el ancho de banda calculado con (4), es decir, tomando en cuenta la velocidad de fase, el método 2 es el ancho de banda calculado con (12) y finalmente el método 3 que es la estimación hecha en este trabajo considerando la velocidad de grupo y la variación en los parámetros.

En las tablas 1 y 2 se muestra la variación del ancho de banda dependiendo del ángulo de elevación, para el día y la noche respectivamente. En las tablas 3 y 4 mostramos la comparación entre métodos para varias frecuencias con un ángulo de elevación fijo.

En comunicaciones digitales se requiere de un menor desfaseamiento para evitar la interferencia entre símbolos, también pueden variar los requerimientos de desfaseamiento dependiendo del tipo de modulación que se utilice. En las tablas 5, 6, 7 y 8 tenemos los anchos de banda para diferentes frecuencias con un ángulo de elevación fijo de 45° para mostrar resultados con desfaseamientos menores.

Tabla 1. Anchos de banda en el día con desfaseamiento de 36° para diferentes ángulos de elevación del satélite.

| f_0 GHz | θ | Método 1 Ancho de banda en Hz | Método 2 Ancho de banda en Hz | Método 3 Ancho de banda en Hz |
|--------------|------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 27.5 | 90° | 5.016394×10^9 | 5.035548×10^9 | 5.045980×10^9 |
| | 60° | 4.668281×10^9 | 4.686105×10^9 | 4.701090×10^9 |
| | 50° | 4.390547×10^9 | 4.407311×10^9 | 4.425110×10^9 |
| 30.5 | 90° | 5.859255×10^9 | 5.881627×10^9 | 5.888470×10^9 |
| | 40° | 4.697601×10^9 | 4.715537×10^9 | 4.736700×10^9 |
| | 20° | 3.426638×10^9 | 3.439722×10^9 | 3.464910×10^9 |
| 92.1 | 90° | 3.074554×10^{10} | 3.086293×10^{10} | 3.034305×10^{10} |
| | 45° | 2.585381×10^{10} | 2.595253×10^{10} | 2.571587×10^{10} |
| | 20° | 1.798075×10^{10} | 1.804941×10^{10} | 1.806491×10^{10} |
| 209.5 | 90° | 1.054796×10^{11} | 1.058824×10^{11} | 1.008086×10^{11} |
| | 45° | 8.869746×10^{10} | 8.903612×10^{10} | 8.617220×10^{10} |
| | 20° | 6.168712×10^{10} | 6.192266×10^{10} | 6.124093×10^{10} |

Tabla 2. Anchos de banda en la noche con desfaseamiento de 36° para diferentes ángulos de elevación del satélite.

| f_0 GHz | θ | Método 1 Ancho de banda en Hz | Método 2 Ancho de banda en Hz | Método 3 Ancho de banda en Hz |
|--------------|------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 27.5 | 90° | 5.016394×10^9 | 1.015275×10^{10} | 9.840990×10^9 |
| | 60° | 4.668281×10^9 | 9.448207×10^9 | 9.196450×10^9 |
| | 50° | 4.390547×10^9 | 8.886096×10^9 | 8.676640×10^9 |
| 30.5 | 90° | 5.859255×10^9 | 1.185863×10^{10} | 1.145583×10^{10} |
| | 40° | 4.697601×10^9 | 9.507549×10^9 | 9.299130×10^9 |
| | 20° | 3.426638×10^9 | 6.935226×10^9 | 6.856840×10^9 |
| 92.1 | 90° | 3.074554×10^{10} | 6.222637×10^{10} | 5.645682×10^{10} |
| | 45° | 2.585381×10^{10} | 5.232593×10^{10} | 4.872953×10^{10} |
| | 20° | 1.798075×10^{10} | 3.639153×10^{10} | 3.511619×10^{10} |
| 209.5 | 90° | 1.054796×10^{11} | 2.134819×10^{11} | 1.760363×10^{11} |
| | 45° | 8.869746×10^{10} | 1.795161×10^{11} | 1.551207×10^{11} |
| | 20° | 6.168712×10^{10} | 1.248495×10^{11} | 1.155152×10^{11} |

Tabla 3. Anchos de banda para el día con desfaseamiento máximo de 36° .

| f_0 GHz | θ | Método 1 Ancho de banda en Hz | Método 2 Ancho de banda en Hz | Método 3 Ancho de banda en Hz |
|--------------|------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1.534 | 45° | 5.5574×10^7 | 5.5786×10^7 | 5.6358×10^7 |
| 1.633 | 45° | 6.1039×10^7 | 6.1273×10^7 | 6.1900×10^7 |
| 3.450 | 45° | 1.8744×10^8 | 1.8815×10^8 | 1.9000×10^8 |
| 4.650 | 45° | 2.9330×10^8 | 2.9442×10^8 | 2.9723×10^8 |
| 5.787 | 45° | 4.0720×10^8 | 4.0876×10^8 | 4.1256×10^8 |
| 6.475 | 45° | 4.8194×10^8 | 4.8378×10^8 | 4.8820×10^8 |
| 7.650 | 45° | 6.1890×10^8 | 6.2127×10^8 | 6.2679×10^8 |
| 11950 | 45° | 1.2083×10^9 | 1.2129×10^9 | 1.2225×10^9 |
| 12625 | 45° | 1.3121×10^9 | 1.3171×10^9 | 1.3274×10^9 |
| 14250 | 45° | 1.5734×10^9 | 1.5794×10^9 | 1.5912×10^9 |

Tabla 4. Anchos de banda para la noche con desfase máximo de 36°.

| f_0 GHz | θ | Método 1 Ancho de banda en Hz | Método 2 Ancho de banda en Hz | Método 3 Ancho de banda en Hz |
|--------------|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1.534 | 45° | 5.5574×10^7 | 1.12477×10^8 | 1.12479×10^8 |
| 1.633 | 45° | 6.1039×10^7 | 1.235397×10^8 | 1.23530×10^8 |
| 3.450 | 45° | 1.8744×10^8 | 3.7936×10^8 | 3.7873×10^8 |
| 4.650 | 45° | 2.9330×10^8 | 5.9361×10^8 | 5.9201×10^8 |
| 5.787 | 45° | 4.0720×10^8 | 8.2415×10^8 | 8.2111×10^8 |
| 6.475 | 45° | 4.8194×10^8 | 9.7540×10^8 | 9.7123×10^8 |
| 7.650 | 45° | 6.1890×10^8 | 1.2526×10^9 | 1.2459×10^9 |
| 11.950 | 45° | 1.2083×10^9 | 2.4455×10^9 | 2.4236×10^9 |
| 12.625 | 45° | 1.3121×10^9 | 2.6556×10^9 | 2.6304×10^9 |
| 14.250 | 45° | 1.5734×10^9 | 3.1845×10^9 | 3.1499×10^9 |

Tabla 5. Anchos de banda para el día con desfase máximo de 22.5°.

| f_0 GHz | θ | Método 1 Ancho de banda en Hz | Método 2 Ancho de banda en Hz | Método 3 Ancho de banda en Hz |
|--------------|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1.534 | 45° | 5.5574×10^7 | 5.5786×10^7 | 4.4561×10^7 |
| 1.633 | 45° | 6.1039×10^7 | 6.1273×10^7 | 4.8943×10^7 |
| 3.450 | 45° | 1.8744×10^8 | 1.8815×10^8 | 1.5025×10^8 |
| 4.650 | 45° | 2.9330×10^8 | 2.9442×10^8 | 2.3507×10^8 |
| 5.787 | 45° | 4.0720×10^8 | 4.0876×10^8 | 3.2631×10^8 |
| 6.475 | 45° | 4.8194×10^8 | 4.8378×10^8 | 3.8616×10^8 |
| 7.650 | 45° | 6.1890×10^8 | 6.2127×10^8 | 4.9583×10^8 |
| 11.950 | 45° | 1.2083×10^9 | 1.2129×10^9 | 9.6747×10^8 |
| 12.625 | 45° | 1.3121×10^9 | 1.3171×10^9 | 1.0504×10^9 |
| 14.250 | 45° | 1.5734×10^9 | 1.5794×10^9 | 1.2594×10^9 |

Tabla 6. Anchos de banda para la noche con desfase máximo de 22.5°.

| f_0 GHz | θ | Método 1 Ancho de banda en Hz | Método 2 Ancho de banda en Hz | Método 3 Ancho de banda en Hz |
|--------------|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1.534 | 45° | 5.5574×10^7 | 1.1247×10^8 | 8.8967×10^7 |
| 1.633 | 45° | 6.1039×10^7 | 1.2353×10^8 | 9.7712×10^7 |
| 3.450 | 45° | 1.8744×10^8 | 3.7936×10^8 | 2.9975×10^8 |
| 4.650 | 45° | 2.9330×10^8 | 5.9361×10^8 | 4.6873×10^8 |
| 5.787 | 45° | 4.0720×10^8 | 8.2415×10^8 | 6.5037×10^8 |
| 6.475 | 45° | 4.8194×10^8 | 9.7540×10^8 | 7.6944×10^8 |
| 7.650 | 45° | 6.1890×10^8 | 1.2526×10^9 | 9.8748×10^8 |
| 11.950 | 45° | 1.2083×10^9 | 2.4455×10^9 | 1.9234×10^9 |
| 12.625 | 45° | 1.3121×10^9 | 2.6556×10^9 | 2.0879×10^9 |
| 14.250 | 45° | 1.5734×10^9 | 3.1845×10^9 | 2.5016×10^9 |

Tabla 7. Anchos de banda para el día con desfase máximo de 11.25°.

| f_0 GHz | θ | Método 1 Ancho de banda en Hz | Método 2 Ancho de banda en Hz | Método 3 Ancho de banda en Hz |
|--------------|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1.534 | 45° | 5.5574×10^7 | 5.5786×10^7 | 3.1513×10^7 |
| 1.633 | 45° | 6.1039×10^7 | 6.1273×10^7 | 3.4612×10^7 |
| 3.450 | 45° | 1.8744×10^8 | 1.8815×10^8 | 1.0627×10^8 |
| 4.650 | 45° | 2.9330×10^8 | 2.9442×10^8 | 1.6627×10^8 |
| 5.787 | 45° | 4.0720×10^8 | 4.0876×10^8 | 2.3083×10^8 |
| 6.475 | 45° | 4.8194×10^8 | 4.8378×10^8 | 2.7318×10^8 |
| 7.650 | 45° | 6.1890×10^8 | 6.2127×10^8 | 3.5079×10^8 |
| 11.950 | 45° | 1.2083×10^9 | 1.2129×10^9 | 6.8466×10^8 |
| 12.625 | 45° | 1.3121×10^9 | 1.3171×10^9 | 7.4345×10^8 |
| 14.250 | 45° | 1.5734×10^9 | 1.5794×10^9 | 8.9142×10^8 |

5. Conclusiones

En este trabajo hemos hecho una estimación del ancho de banda que puede ser utilizado en comunicaciones satelitales tomando en cuenta la teoría de propagación en medios con dispersión, esta estimación es más precisa que el cálculo hecho con (4), dado que se está tomando en cuenta la velocidad de grupo de la señal y se puede adaptar a los cambios en los parámetros debidos a las diferentes condiciones de la ionosfera. Es una mejor estimación y por lo tanto puede emplearse para el cálculo del ancho de banda en comunicaciones satelitales.

De los cálculos obtenidos podemos observar que al tomar en cuenta que en la noche disminuye la ionización, el ancho de banda máximo permitido aumenta dado que la señal sufre menor deformación. En la obtención del método 1, no se consideran los cambios en los parámetros de la ionosfera, debido a esto el ancho de banda con este método es el mismo sin importar la hora del día.

También podemos observar que, efectivamente, el ancho de banda se reduce considerablemente con la disminución del ángulo de elevación dado que la señal recorre una mayor distancia en la ionosfera. El ancho de banda mayor permisible se tiene con $\theta = 90^\circ$ y el menor con $\theta = 10^\circ$.

Finalmente, también vemos que el ancho de banda máximo permitido es diferente dependiendo de los requerimientos que se tengan del desfase de las componentes de la señal. En los casos donde se requiera poco desfase, el ancho de banda máximo permisible va a ser menor.

6. Referencias

- [1] K. G. Budden, *Radio Waves in the Ionosphere*. Cambridge University Press, 1961.
- [2] V. L. Ginzburg, *Propagation of Electromagnetic Waves in Plasma*, Gordon and Breach, New York, 1961.
- [3] G. H. Millman, C. D. Bell, "Ionospheric dispersion of an FM Electromagnetic Pulse", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 19, pp. 152-155. January 1971.
- [4] E. Brookner, "Ionospheric dispersion of Electromagnetic Pulses", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 21, pp. 402-405, May 1973.

Tabla 8. Anchos de banda para la noche con desfase máximo de 11.25°.

| f_0 GHz | θ | Método 1 Ancho de banda en Hz | Método 2 Ancho de banda en Hz | Método 3 Ancho de banda en Hz |
|--------------|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1.534 | 45° | 5.5574×10^7 | 1.1247×10^8 | 6.2936×10^7 |
| 1.633 | 45° | 6.1039×10^7 | 1.2353×10^8 | 6.9124×10^7 |
| 3.450 | 45° | 1.8744×10^8 | 3.7936×10^8 | 2.1215×10^8 |
| 4.650 | 45° | 2.9330×10^8 | 5.9361×10^8 | 3.3186×10^8 |
| 5.787 | 45° | 4.0720×10^8 | 8.2415×10^8 | 4.6060×10^8 |
| 6.475 | 45° | 4.8194×10^8 | 9.7540×10^8 | 5.4504×10^8 |
| 7.650 | 45° | 6.1890×10^8 | 1.2526×10^9 | 6.9971×10^8 |
| 11.950 | 45° | 1.2083×10^9 | 2.4455×10^9 | 1.3645×10^9 |
| 12.625 | 45° | 1.3121×10^9 | 2.6556×10^9 | 1.4814×10^9 |
| 14.250 | 45° | 1.5734×10^9 | 3.1845×10^9 | 1.7757×10^9 |

- [5] H. Soicher, "Ionospheric and Plasmaspheric Effects in Satellite Navigation Systems", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-25, No. 5, pp. 705-708, September 1977.
- [6] E. Brookner, "Ionospheric pulse time dispersion including effects of Earth's Magnetic Field", *IEEE Transactions on*

- Antennas and Propagation*, vol. AP-26, No. 2, pp. 307-311, March 1978.
- [7] Yerokhin, G. Chernishev, O. Kocherzhevski, V. "Dispositivos antennofeeders y propagación de ondas de radio". *Radio y Sviaz*. Moscú. 1996. pp. 327-329.
- [8] Akhmanov, S. Nikitin, S. 1998. *Óptica Física*. Editorial de la Universidad de Moscú.
- [9] Kravchenko, V. 1998. "Propagación de Ondas Electromagnéticas. Departamento de Telecomunicaciones". Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. ESIME. IPN. México DF.
- [10] K. Davies, *Ionospheric Radio Propagation*. United States Department of Commer, National Bureau of Standards Monograph 80, 1965.
- [11] V. Kravchenko, R. Reséndiz, "Estimación del desfase de las componentes espectrales de una señal que atraviesa la ionosfera", Memorias del 40 Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. ESIME Zacatenco, México D. F. Noviembre de 2005.
- [12] Morgan, W. *Communications Satellite Handbook*. John Wiley & Sons. New York. 1989. pp. 124-163.

Latindex Periódica

Índice de revistas científicas de
América Latina, el Caribe,
España y Portugal

www.latindex.unam.mx

(Departamento de Bibliografía Latinoamericana, DGB, UNAM)