

RECOMENDACIÓN UIT-R S.1525-1

Repercusiones de la interferencia producida por el Sol en un enlace del servicio fijo por satélite geoestacionario

(Cuestión UIT-R 236/4)

(2001-2002)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que los tránsitos solares son un fenómeno natural en las redes del servicio fijo por satélite (SFS) geoestacionario (OSG), que se produce durante un periodo de 3 a 9 días dos veces al año, dependiendo del diámetro de antena;
- b) que los operadores y clientes de estaciones terrenas del SFS OSG planifican los tránsitos solares e implementan los medios adecuados para minimizar sus repercusiones;
- c) que los operadores de estaciones terrenas del SFS OSG deberán disponer de una metodología para analizar la magnitud de la interferencia producida por el Sol y los periodos en los que se producen los eventos de interferencia,

recomienda

- 1 que al diseñar enlaces del SFS OSG, se utilice la metodología que se muestra en el Anexo 1 para estimar el nivel de la degradación de la relación portadora/ruido (C/N) producida por el tránsito solar en un enlace OSG;
- 2 que los operadores de estaciones terrenas SFS OSG utilicen el método del Anexo 2 para predecir la fecha y la hora de un tránsito solar en una estación terrena.

ANEXO 1

Cálculo del nivel de interferencia producida por el Sol en un enlace del SFS OSG

Los tránsitos solares se producen dos veces al año alrededor de los equinoccios de primavera y de otoño, cuando el Sol pasa cerca del haz principal de la estación terrena receptora OSG. Durante estos tránsitos solares, la radiación de microondas proveniente del Sol actúa como una fuente de interferencia, aumentando la temperatura de ruido efectiva del enlace de satélite y asimismo

degradando las características del enlace. Si la magnitud de la degradación supera el margen para cielo despejado del enlace, entonces el enlace sufrirá una interrupción; denominada normalmente una interrupción solar.

Para frecuencias por debajo de 30 GHz, las emisiones provenientes del Sol se pueden considerar constituidas por tres componentes: la emisión térmica del Sol «tranquilo», un componente que varía suavemente relacionado con el número y tamaño de las manchas solares y explosiones intensas ocasionales de las emisiones debidas a las llamadas llamaradas solares. Los tres componentes varían con el tiempo y por lo tanto resulta extraordinariamente difícil utilizar el Sol como una fuente de referencia para la evaluación precisa de las características de las antenas de estaciones terrenas.

En las bandas de comunicaciones por satélite, la emisión térmica del Sol tranquilo decrece cuando aumenta la frecuencia. La emisión no está generalmente polarizada.

Las manchas solares son zonas magnéticas del Sol que aparecen como manchas oscuras en su superficie. Duran normalmente varios días, aunque las muy grandes pueden durar varias semanas. Aunque el número de manchas solares varía en gran medida de día a día, existe un patrón con un periodo de aproximadamente 11 años. Cada 11 años el Sol sufre un periodo de actividad denominado «máximo solar», seguido de un periodo de tranquilidad denominado «mínimo solar». Durante un máximo solar hay muchas manchas solares, llamaradas solares y chorros de masa de la corona y todos ellos pueden afectar a las comunicaciones y al tiempo en la Tierra. Existe una correlación aproximada entre el flujo solar total y el número de manchas solares. Puesto que este incremento de flujo está asociado con diversas pequeñas áreas de la superficie del Sol, no resulta adecuado suponer una distribución de brillo uniforme en toda la superficie del Sol. De hecho, si la estación terrena OSG tiene una anchura de haz de antena inferior al diámetro aparente del Sol, podría experimentar niveles variables durante un único evento de tránsito solar. La emisión debida a las manchas solares está de alguna forma polarizada circularmente, aunque este efecto se encuentra diluido por la polarización aleatoria de las emisiones térmicas provenientes del Sol tranquilo.

Las llamaradas o ráfagas solares pueden duplicar o triplicar el flujo solar, alcanzando ocasionalmente factores de 100 veces el nivel normal. En las bandas de comunicaciones por satélite, la mayoría de los eventos son relativamente cortos, de 5 min a aproximadamente una hora. Su aparición no es predecible, pero como ya se ha indicado los eventos son más frecuentes alrededor del máximo solar. Normalmente podría haber un par de eventos por día.

El diámetro aparente del Sol a frecuencias de microondas es ligeramente mayor que el diámetro óptico. Asimismo, la distancia entre la Tierra y el Sol varía ligeramente durante el año, lo que resulta una variación del diámetro aparente del Sol por tanto de la temperatura de brillo aparente. Sin embargo, estos efectos son pequeños comparados con otras incertidumbres (como el número de manchas solares) y se pueden por lo tanto despreciar. Una estimación razonable del diámetro aparente del Sol en el equinoccio es $0,53^\circ$.

Aunque la información disponible indica que existen variaciones importantes impredecibles en el nivel efectivo del flujo solar en las bandas de comunicaciones, por satélite, se han propuesto algunos modelos sencillos para el nivel medio. Estos modelos resultan adecuados para evaluar los niveles típicos de interferencia que se pueden esperar durante tránsitos solares. Una expresión para la temperatura de brillo del Sol tranquilo a frecuencias de microondas es la siguiente:

$$T_{Sol} = 120\,000 \times \gamma \times f^{-0,75}$$

donde:

T_{Sol} : temperatura de brillo equivalente (K)

f : frecuencia (GHz)

γ : factor para tener en cuenta la polarización de las emisiones provenientes del Sol, que podría tomarse como 0,5 por las razones indicadas anteriormente.

Este modelo da un valor de unos 21 000 K para el Sol tranquilo a una frecuencia de 4 GHz. En comparación, un valor típico en el máximo de manchas solares sería de 90 000 K.

1 Planteamiento general

El tránsito solar de un receptor OSG es un fenómeno que se puede estimar fácilmente puesto que se conoce bien su geometría. El método descrito con detalle en la Recomendación UIT-R BO.1506 que evalúa la repercusión de la interferencia solar en los enlaces del servicio de radiodifusión por satélite (SRS) puede utilizarse también en el caso de enlaces del SFS. Esa Recomendación describe totalmente el efecto del tránsito solar en los balances del enlace del SFS OSG. La repercusión del tránsito solar no es un desvanecimiento sino un incremento de la temperatura de ruido del sistema que puede ser importante para algunos enlaces OSG con márgenes pequeños y bajo ruido.

2 Aplicación de la metodología a diferentes tamaños de antena

El planteamiento detallado descrito en la Recomendación UIT-R BO.1506 ha sido aplicado a diferentes tamaños de antena.

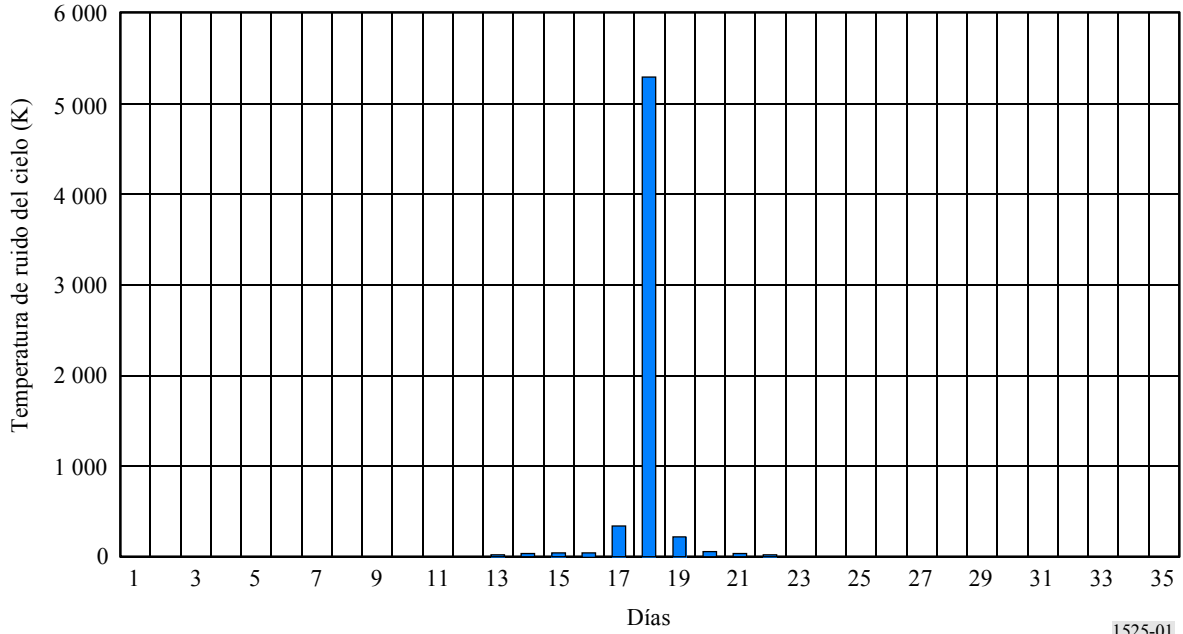
Se podrían utilizar dos posibles planteamientos para generar las temperaturas de ruido solar para el ángulo fuera del eje θ y el ángulo de acimut ϕ , como puede verse en el punto focal de una antena de estación terrena del SFS:

- Una simulación completa del movimiento del Sol, utilizando por ejemplo el algoritmo desarrollado en el Anexo 2.
- Un planteamiento simplificado basado en el hecho de que el ángulo de declinación del Sol cambia aproximadamente $0,4^\circ$ por día en los equinoccios y su ángulo horario cambia aproximadamente $0,25^\circ$ por minuto.

Los resultados en las Figs. 1 a 6 son típicas de los obtenidos utilizando estos métodos. En todos los casos la temperatura de ruido inicial utilizada es 150 K y los diagramas de antena utilizados son conformes a la Recomendación UIT-R S.465 a 11 GHz.

FIGURA 1

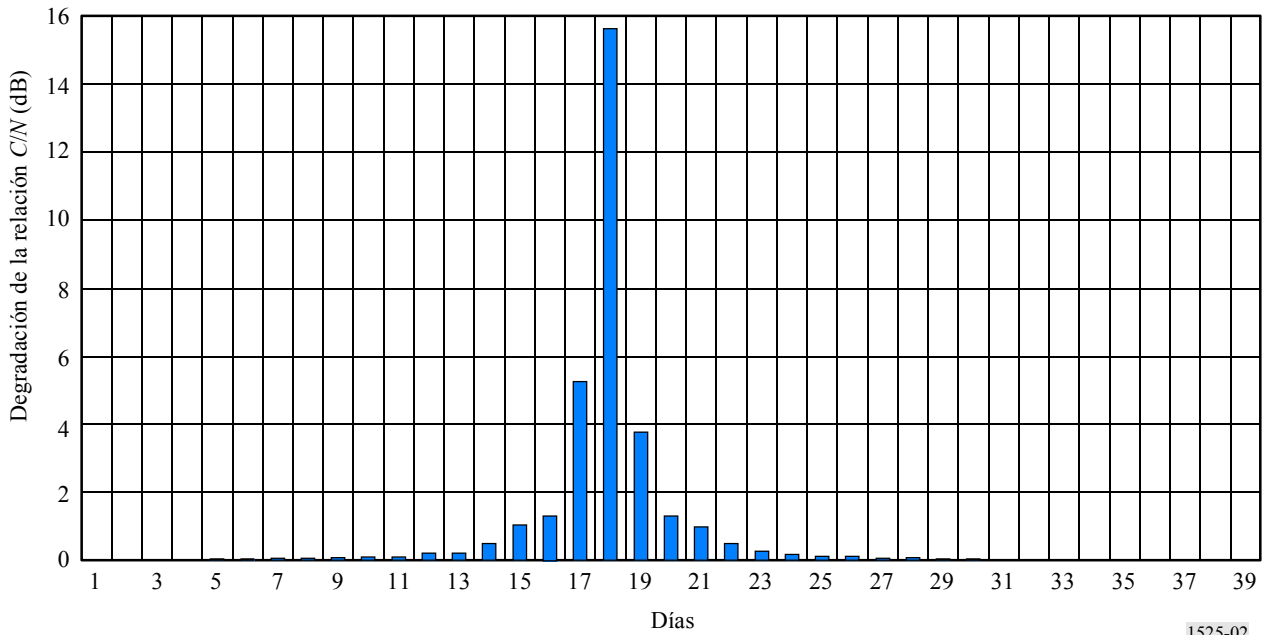
Incremento máximo diario de la temperatura de ruido del cielo para una antena de 10 m



1525-01

FIGURA 2

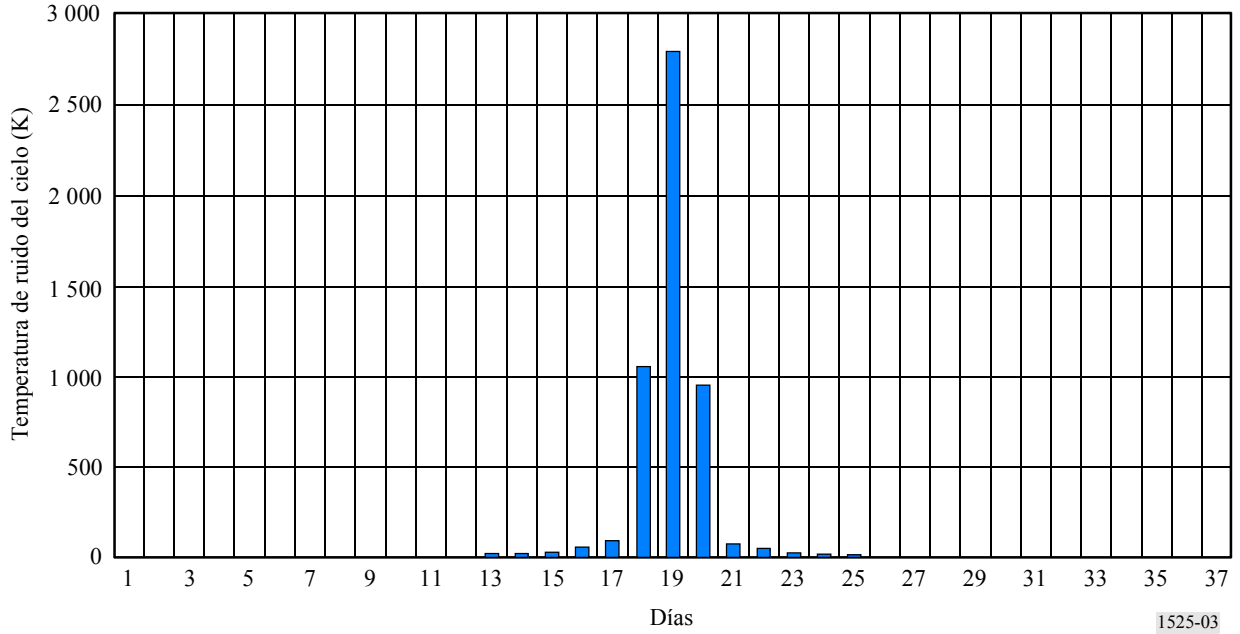
Degradación máxima diaria de la relación C/N recibida en una antena de 10 m



1525-02

FIGURA 3

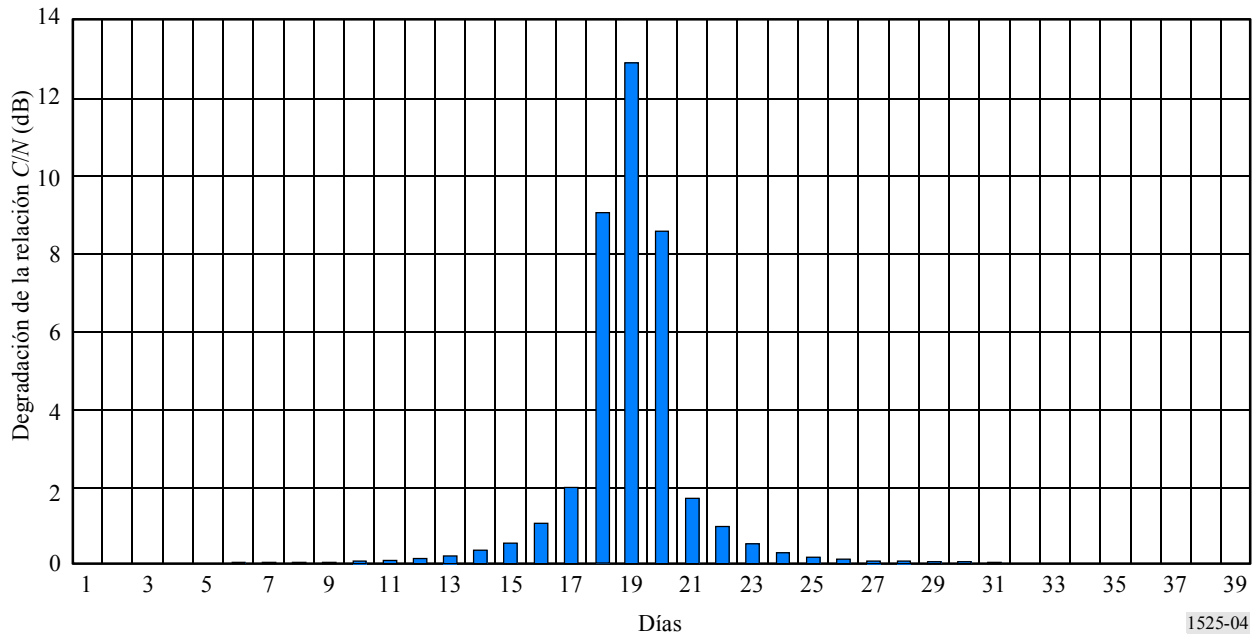
Incremento diario máximo de la temperatura de ruido del cielo para una antena de 3 m



1525-03

FIGURA 4

Degradación máxima diaria de la relación C/N recibida en una antena de 3 m



1525-04

FIGURA 5

Incremento diario máximo de la temperatura de ruido del cielo para una antena de 0,6 m

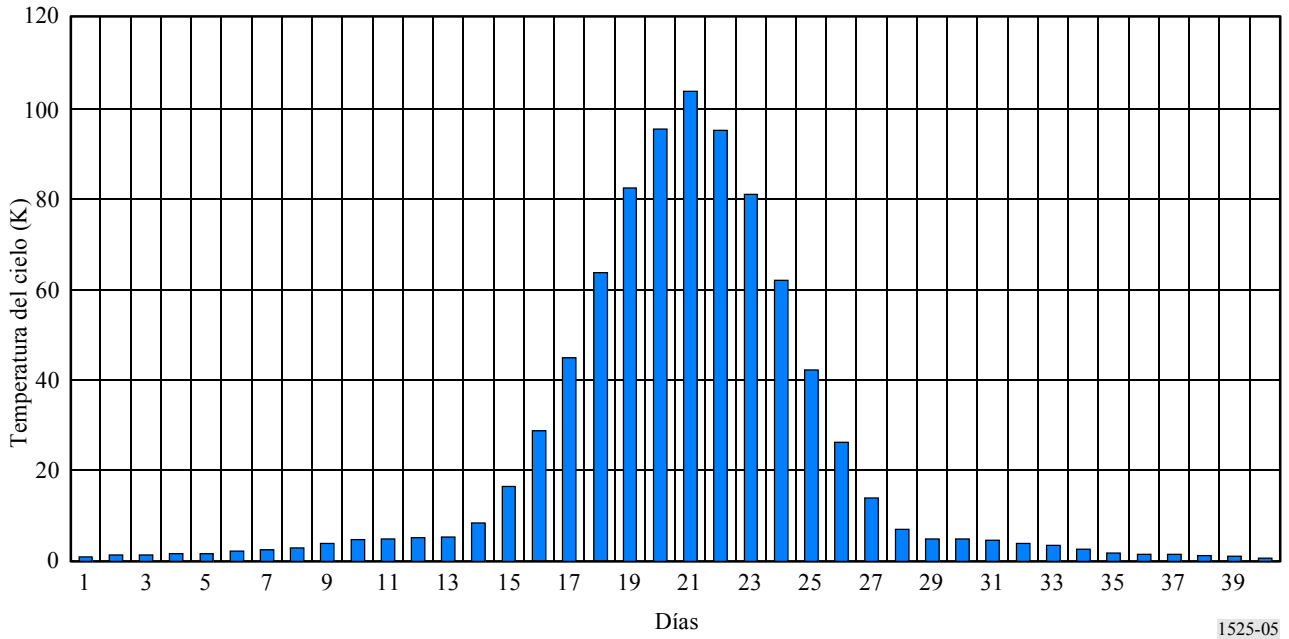
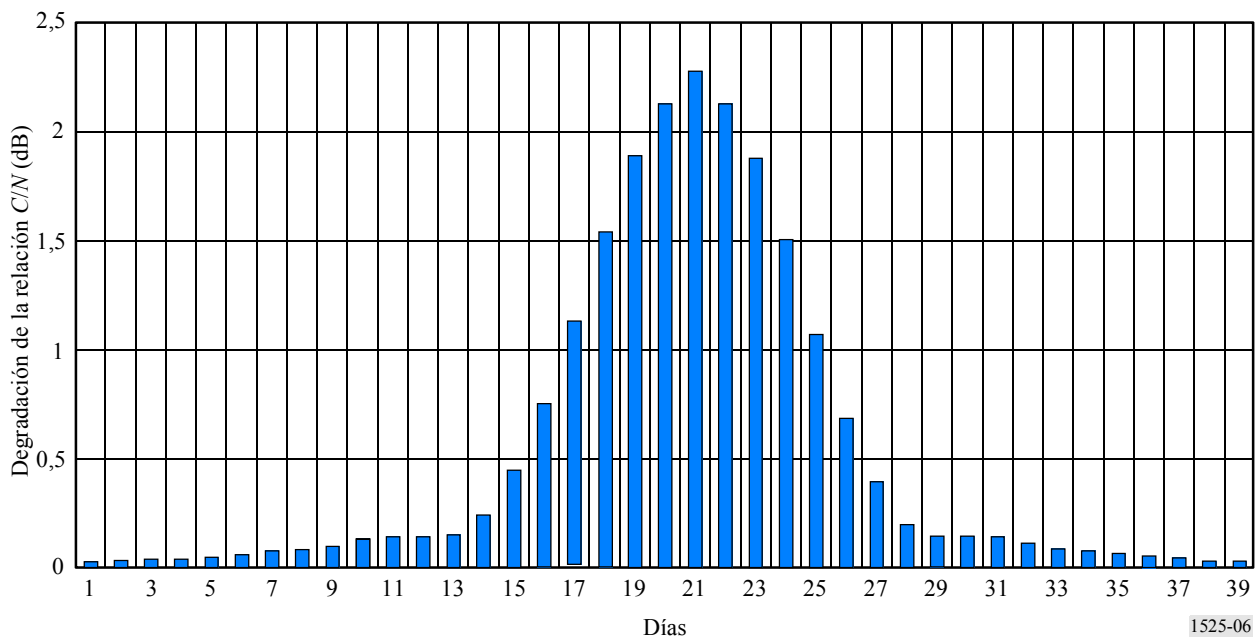


FIGURA 6

Degradación máxima diaria de la relación C/N recibida en una antena de 0,6 m

Las repercusiones en las características del enlace dependen del tamaño de la antena y de la temperatura de ruido inicial del enlace. Para antenas grandes con alta ganancia, la degradación de la relación C/N puede ser de hasta 15 dB (como se muestra en la Fig. 2) pero se produce menos veces que para antenas pequeñas con haces más anchos (Fig. 6).

Como se esperaba los resultados muestran que la profundidad de la degradación de la relación C/N es una función del tamaño de la antena y la duración del tránsito solar aumenta al disminuir el diámetro de la antena.

3 Variación durante un día

Se han realizado cálculos para mostrar un perfil de tiempos de la degradación de la relación C/N en función de la hora del día cerca del periodo de equinoccios. Se ha fijado el paso temporal a un segundo.

FIGURA 7

Degradación de la relación C/N recibida en una antena de 10 m durante un día

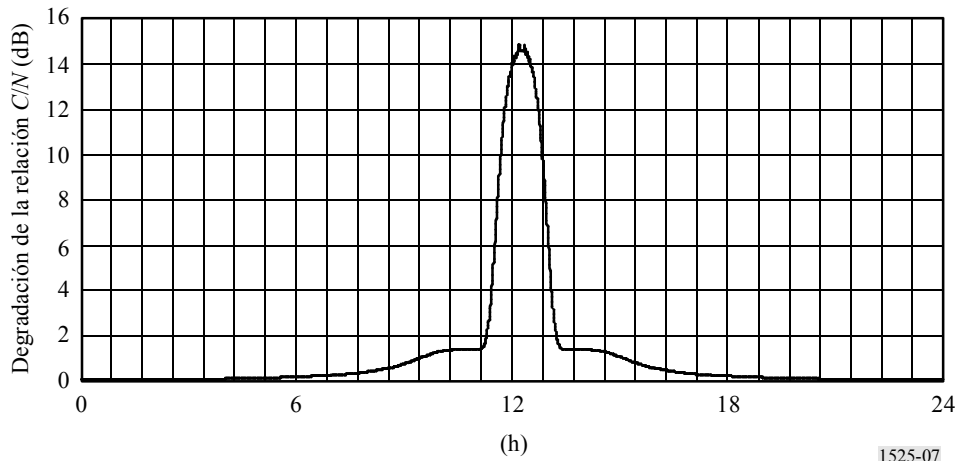
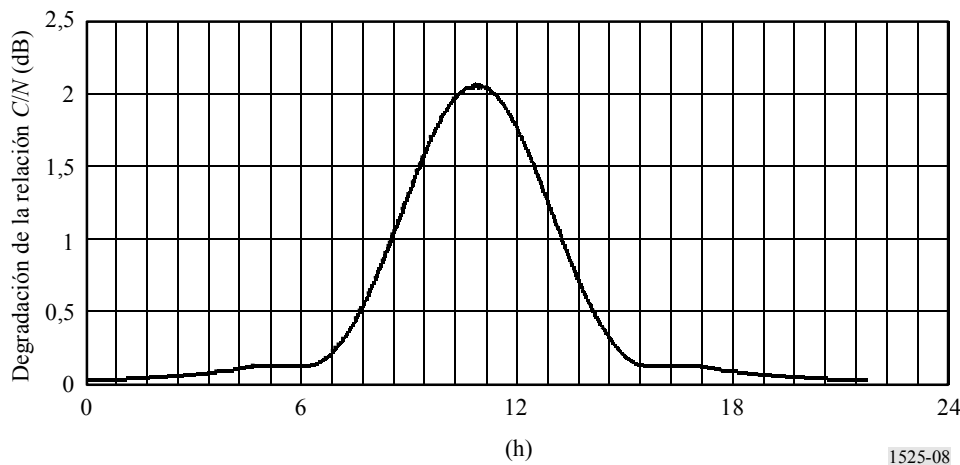


FIGURA 8

Degradación de la relación C/N recibida en una antena de 0,6 m durante un día



ANEXO 2

Método simplificado para calcular el periodo de tránsitos solares para una estación terrena OSG

1 Introducción

Los operadores de estaciones terrenas del SFS OSG han aceptado que la interferencia solar es un fenómeno natural que se produce durante un periodo corto entre 0 y 21 días antes y después de los equinoccios, dependiendo de si la estación está ubicada en el Hemisferio Norte o en el Sur.

La mayoría de los operadores utilizan algoritmos simplificados como el que se indica a continuación, que no precisan un balance de enlace de portadora específico, para estimar el día y la hora en el que se produce un tránsito solar. Con esta información, pueden actuar para reducir los efectos de la interferencia solar.

2 Datos de las efemérides del satélite

Los operadores de satélites utilizan varios modelos matemáticos diferentes para representar el movimiento de un satélite. Un operador de satélite OSG desarrolló un planteamiento simplificado en el que, en lugar de calcular todos los efectos físicos que actúan en un satélite, se definen dichos efectos mediante tres ecuaciones. Esta aproximación contiene once parámetros obtenidos mediante una aproximación de curva de mínimos cuadrados. Se ha demostrado que este modelo simplificado se aproxima a los resultados de predicción completos con una precisión superior a $0,01^\circ$ durante un periodo de hasta siete días.

Con este planteamiento, las tres ecuaciones que predicen la posición del satélite en cualquier instante relativo, t , a partir del inicio de la estación son:

Longitud este del satélite:

$$L = L_0 + L_1 t + L_2 t^2 + (L_c + L_{c1} t) \cos(Wt) + (L_s + L_{s1} t) \sin(Wt) + (K/2) (l_{c2} - l_{s2}) \sin(2Wt) - K l_c l_s \cos(2Wt) \quad (1)$$

Latitud geocéntrica del satélite:

$$l = (l_c + l_{c1} t) \cos(Wt) + (l_s + l_{s1} t) \sin(Wt) \quad (2)$$

Radio del satélite:

$$r_{sat} = r_g (1 - 2L_1/3(W - L_1)) (1 + KL_c \sin(Wt) - KL_s \cos(Wt)) \quad (3)$$

donde:

$$W = L_1 + 360/t_r \text{ grados/día}$$

t_r : periodo de rotación de la Tierra (días)

r_g : radio nominal de la órbita del satélite OSG (km)

$$K = \pi/360$$

t : tiempo en días

y los once parámetros son:

L_0 : Longitud media (este de Greenwich) (grados)

L_1 : Velocidad de desplazamiento (grados/día)

L_2 : Aceleración de desplazamiento (grados/día/día)

L_c : Amplitud de la oscilación de longitud para el término coseno (grados)

L_{c1} : Velocidad de cambio de longitud para el término coseno (grados/día)

L_s : amplitud de la oscilación de longitud para el término seno (grados)

L_{s1} : Velocidad de cambio de longitud para el término seno (grados/día)

l_c : Amplitud de la oscilación de latitud para el término coseno (grados)

l_{c1} : Velocidad de cambio de latitud para el término coseno (grados/día)

l_s : Amplitud de la oscilación de latitud para el término seno (grados)

l_{s1} : Velocidad de cambio de latitud para el término seno (grados/día).

Con la posición del satélite definida como una función del tiempo en términos de un sistema geocéntrico alineado con el Meridiano de Greenwich, la posición del satélite en relación con la estación terrena y los ángulos de apuntamiento adecuados se calculan como sigue:

$$\Delta r = r_{sat} - r_{sta} \quad (4)$$

$$\Delta r_x = r_{sat} \cos(\varphi_{sat}) \cos(\theta_{sat} - \theta_{sta}) - R_a \quad (5)$$

$$\Delta r_y = r_{sat} \cos(\varphi_{sat}) \sen(\theta_{sat} - \theta_{sta}) \quad (6)$$

$$\Delta r_z = r_{sat} \sen(\varphi_{sat}) - R_z \quad (7)$$

donde:

φ_{sat} : latitud del satélite (geocéntrica)

θ_{sat} : longitud del satélite

θ_{sta} : longitud de la estación al este de Greenwich

R_a : distancia radial de la estación desde el eje de rotación de la Tierra

R_z : distancia axial de la estación por encima del plano ecuatorial de la Tierra.

El cálculo de las coordenadas de la estación terrena se realiza generalmente en términos de su latitud, longitud y altura por encima de un elipsoide de referencia (altitud) geodésicas. Este elipsoide de referencia se basa en un radio ecuatorial y una constante de achatamiento.

La posición de la estación terrena se calcula en términos de la distancia radial desde el eje rotacional de la Tierra, R_a , y la distancia axial al norte del plano ecuatorial de la Tierra, R_z , que se calculan como sigue:

$$R_a = (R + h) \cos(\Phi_{sta}) \quad (8)$$

$$R_z = [R(1 - f)^2 + h] \sen(\Phi_{sta}) \quad (9)$$

$$R = \frac{R_{equ}}{\left[1 - f(2 - f) (\sen(\Phi_{sta}))^2\right]^{1/2}} \quad (10)$$

siendo:

h : altura geodésica de la estación terrena por encima del elipsoide (km)

Φ_{sta} : latitud geodésica de la estación terrena

f : achatamiento del elipsoide de Tierra

R_{equ} : radio ecuatorial del elipsoide de Tierra.

Partiendo de lo anterior, el apuntamiento en acimut y elevación se determina de la forma siguiente:

Ángulo de acimut de la estación terrena:

$$AZ = \arctg(\Delta r_y / \Delta r_{norte}) \quad (11)$$

Ángulo de elevación de la estación terrena:

$$EL_{geométrico} = \arctg(\Delta r_{zenit} / (\Delta r_{norte}^2 + \Delta r_y^2)^{1/2}) \quad (12)$$

donde:

$$\Delta r_{norte} = \Delta r_x \sen(\varphi_{sta}) + \Delta r_z \cos(\varphi_{sta}) \quad (13)$$

$$\Delta r_{zenit} = \Delta r_x \cos(\varphi_{sta}) + \Delta r_z \sen(\varphi_{sta}) \quad (14)$$

3 Periodos de tránsitos solares predichos

Para calcular los horarios de las interferencias provenientes del Sol, se precisan los ángulos de apuntamiento de la estación terrena en el sistema de coordenadas ecuatorial (ECS, *equatorial coordinate system*), que se describe más detalladamente en los puntos siguientes.

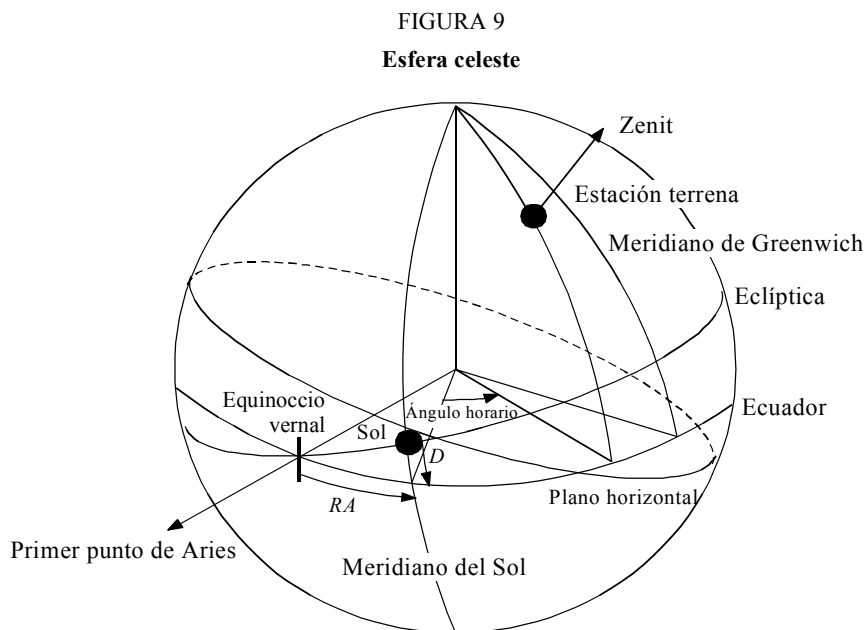
Éste es el mismo sistema de coordenadas utilizado para montajes de antenas polares. El ángulo horario y la declinación en el ECS se calculan a partir del acimut, AZ, y de la elevación, EL, anterior como:

$$\text{Ángulo horario} = \arctg \left(\frac{-\cos(EL) \cdot \text{sen}(AZ)}{\text{sen}(EL) \cdot \cos(\varphi_{sta}) - \cos(EL) \cdot \text{sen}(\varphi_{sta}) \cdot \cos(AZ)} \right)$$

$$\text{Declinación} = \arcsen(\text{sen}(EL) \cdot \text{sen}(\varphi_{sta}) + \cos(EL) \cdot \cos(\varphi_{sta}) \cdot \cos(AZ))$$

3.1 Sistema de coordenadas para calcular el tránsito solar

Los cálculos para la interferencia solar se basan en el sistema de coordenadas ecuatorial, en el que el ecuador de la Tierra es el plano de referencia y el equinoccio vernal es la dirección de referencia. El equinoccio vernal o el primer punto de Aries, es la intersección de la eclíptica (plano medio de la órbita terrestre) con el ecuador celeste, en el que el Sol cruza el Ecuador de Sur a Norte. El centro de la Tierra es el origen de este sistema, como se muestra en la Fig. 9



D: declinación a partir del Ecuador
RA: ascensión recta del Sol

1525-09

La declinación y la ascensión recta dan las coordenadas del Sol. La declinación es el ángulo entre el plano ecuatorial y el Sol. La ascensión recta es el ángulo, medido en el sentido contrario de las agujas del reloj, entre el norte celeste y el plano ecuatorial a partir del equinoccio vernal hasta la posición del Sol. El ángulo horario es la diferencia angular entre la longitud del observador y la longitud del Sol.

3.2 Cálculo de las coordenadas del Sol

El tiempo se mide en relación al periodo de la rotación de la Tierra como el día solar, que es el periodo entre pases sucesivos del Sol a través del meridiano del observador. Puesto que la Tierra también circunda al Sol en un periodo de un año, el día solar no es un periodo verdadero de la rotación de la Tierra. La Tierra viaja 1/365 de su trayecto en su órbita en un día, pero la Tierra tiene que girar ligeramente más que una vuelta completa en relación con una estrella fija durante este intervalo.

El tiempo sideral está basado en la rotación de la Tierra en relación con una estrella fija. Las variaciones en la rotación de la Tierra debidas a la precesión y la nutación, afectan la duración del día sideral. La precesión es el movimiento circular del Polo Norte de la Tierra alrededor del polo eclíptico. El radio de este círculo, que normalmente califica la oblicuidad de la elíptica, es aproximadamente de $23,5^\circ$ y se precisa un periodo de 26000 años para completar una revolución. La nutación es una oscilación compleja del Polo Norte de la Tierra alrededor del Polo Norte medio. La diferencia entre el tiempo sideral medio y el tiempo aparente se denomina la ecuación del equinoccio.

La ascensión recta y la declinación del Sol, así como la rotación de la Tierra relativa al equinoccio vernal están relacionadas con el Tiempo Universal (UT). El tiempo universal, que es la base para el tiempo civil, está estrechamente relacionado con el movimiento diurno medio del Sol y directamente relacionado con el tiempo sideral. El tiempo sideral aparente local (LAST, *local apparent sidereal time*) es el ángulo horario del equinoccio verdadero, intersección del Ecuador verdadero y de la eclíptica de la fecha, que está afectado por la nutación del eje terrestre. El tiempo sideral medio local (LMST, *local mean sidereal time*) es el ángulo horario del equinoccio medio o la intersección del Ecuador medio con la eclíptica de la fecha, que está afectada por la precesión del eje terrestre.

La ascensión recta y la declinación del Sol se pueden obtener a partir de la oblicuidad de la eclíptica, Ω , y la longitud eclíptica, L_{Sol} que se muestra en la Fig. 10 como:

$$L_{Sol} = L_{media} + 1,915^\circ \text{sen}(M_e) + 0,020^\circ \text{sen}(2 \times M_e)$$

en la que la longitud media del Sol es:

$$L_{media} = 280,460^\circ + 0,9856474^\circ \times d$$

y la anomalía media de la órbita terrestre es:

$$M_e = 357,528^\circ + 0,9856003^\circ \times d$$

El tiempo, d , se expresa en términos de días julianos (JD) referenciados a los 1200 UT del 1 de enero de 2000, que es el día juliano 2451 545 y es $d = JD - 2451\ 545$.

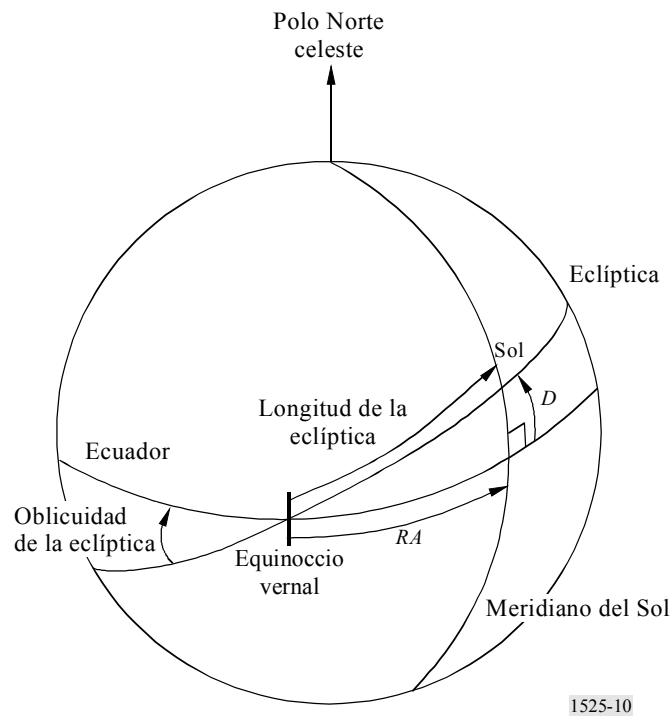
A partir de la ley del seno en trigonometría esférica, la declinación, D , es:

$$D = \arcsen(\text{sen}(\Omega) \cdot \text{sen}(L_{Sol}))$$

y la ascensión recta, RA , es:

$$RA = \arctg(\cos(\Omega) \cdot \text{tg}(L_{Sol}))$$

FIGURA 10
Sistema de coordenadas ecuatorial



Con este objetivo, se puede aproximar la declinación del Sol mediante:

$$D_{Sol} = 23,5^\circ \text{ sen}(360(p - x)/365)$$

donde $23,5^\circ$ es la oblicuidad aproximada de la eclíptica, p es el día del año y el valor x es 80 para el equinoccio vernal y 83,5 para días cercanos al equinoccio de otoño. Puesto que el número de días entre el equinoccio vernal y el de otoño no es igual, el valor x toma estos dos valores diferentes.

Una condición para el tránsito solar es que la declinación del Sol esté muy próxima a la declinación del satélite obtenida como anteriormente en términos del sistema de coordenadas ecuatorial. La fecha aproximada para el tránsito solar, P_0 , se puede obtener mediante el número entero más próxima a p , sustituyendo el ángulo de declinación por D_{Sol} en la ecuación anterior.

3.3 Cálculo de la ascensión recta del Sol

Utilizando el valor de P_0 como punto inicial de un cálculo interactivo que incrementa el día juliano, el cálculo prosigue hasta:

$$|D_{Sol} - \text{Declinación}| \leq 0,17^\circ$$

donde:

$$D_{Sol} = \arcsen(\text{sen}(\Omega) \cdot \text{sen}(L_{Sol_i}))$$

En el momento en el que la declinación del Sol y el ángulo de declinación de la estación terrena se encuentran muy próximos, el valor de la ascensión recta del Sol se obtiene a partir de:

$$RA_i = \arctg(\cos(\Omega) \cdot \operatorname{tg}(L_{Sol_i}))$$

3.4 Cálculo de la hora del tránsito solar

Otra condición para el tránsito solar es la coincidencia de la ascensión recta del Sol y del satélite. La declinación del ángulo de visión del satélite es un valor fijo, sin embargo, la ascensión recta equivalente del satélite varía con el tiempo de la forma siguiente:

$$RA_{sat} = LAST - \text{Ángulo horario}$$

o,

$$LAST = RA_{sat} + \text{Ángulo horario}$$

donde el ángulo horario se calculó anteriormente. En términos de tiempo sideral aparente de Greenwich (GAST, *Greenwich apparent sidereal time*):

$$GAST = LAST - \theta_{sta}$$

por lo tanto, haciendo $RA_{sat} = RA_{Sol}$ y sustituyendo el valor RA por el valor anterior:

$$GAST = RA + \text{Ángulo horario} - \theta_{sta}$$

Se puede obtener el tiempo en Tiempo Universal Coordinado (UTC) a partir de:

$$GAST = 100,4602346 + 0,985647348 \times (JDO_{sat} - 2451545) + 15,041068 \times UT$$

o

$$UT = \left[\frac{GAST - 100,4602346 - 0,985647348 \times (JDO_{sat} - 2451545)}{15,041068} \right]$$

donde JDO_{sat} es la fecha juliana a medianoche, es decir, tiene que ser la mitad de un número entero.

Se ha encontrado mediante mediciones realizadas en una estación terrena en explotación que el método anterior puede estimar la cresta del tránsito solar en ± 15 s.

3.5 Valores aproximados

Mientras que los cálculos anteriores proporcionan una estimación precisa del tiempo de un tránsito solar para una estación terrena, el número real de días y la duración del tiempo durante los que una estación terrena determinada experimentará niveles importantes de interferencia solar dependerá de las características de la señal, de los objetivos de calidad y de los márgenes de enlace para cada portadora. Los puntos siguientes derivan valores aproximados para el número de días afectados, la duración máxima por día y la duración total de los efectos del tránsito solar en cada equinoccio.

3.5.1 Número de días afectados

Puesto que el ángulo de declinación del Sol cambia aproximadamente $0,4^\circ$ por día en los equinoccios, el número de días afectados en cada equinoccio será aproximadamente:

$$\text{Días afectados} = \frac{\theta_{3\text{dB}} + 0,48^\circ}{0,4^\circ}$$

donde $0,48^\circ$ es el diámetro óptico aproximado del Sol y la anchura de haz de potencia mitad de la antena de la estación terrena, $\theta_{3\text{dB}}$, (grados) se estima como:

$$\theta_{3\text{dB}} = 70 \times \lambda / d_{\text{ant}}$$

donde:

d_{ant} : diámetro de antena

λ : longitud de onda en las mismas unidades.

Para una antena de 11 m a una frecuencia de 11 GHz $\theta_{3\text{dB}} = 0,17^\circ$ y, por lo tanto los tránsitos solares a través de la anchura de haz de 3 dB se producirán normalmente en uno o dos días sucesivos en cada equinoccio.

3.5.2 Duración máxima

Debido a que el ángulo horario del Sol cambia aproximadamente unos $0,25^\circ$ por minuto, la duración máxima del tránsito solar se puede aproximar mediante:

$$\text{Minutos afectados} = \frac{\theta_{3\text{dB}} + 0,48^\circ}{0,25^\circ}$$

Para una antena de 11 m, $\theta_{3\text{dB}} = 0,17^\circ$ de forma que la duración máxima de un tránsito solar a través de una anchura de haz a 3 dB de la antena será aproximadamente de 2,5 min.

3.5.3 Duración total en cada equinoccio

Cuando un gran número de líneas paralelas intersectan un círculo, la longitud media de la intersección es $\pi D/4$, donde D es el diámetro del círculo. La longitud total de las intersecciones es $\pi D^2/4p$, donde p es la separación entre las líneas paralelas.

A partir de esta última expresión y puesto que el ángulo de declinación del Sol cambia aproximadamente $0,4^\circ$ por día en los equinoccios y su ángulo horario cambia aproximadamente $0,25^\circ$ por minuto, la duración total de los tránsitos solares en cada equinoccio se puede aproximar mediante:

$$\text{Duración total} = \pi \times (\theta_{3\text{dB}} + 0,48^\circ)^2 / (4 \times 0,4^\circ \times 0,25^\circ)$$

Para una antena de 11 m de diámetro, $\theta_{3\text{dB}} = 0,17^\circ$ y por lo tanto la duración total de los tránsitos solares a través de la anchura de haz a 3 dB de la antena será aproximadamente de 3,5 min en cada equinoccio.