

RECOMENDACIÓN UIT-R SF.765*

INTERSECCIÓN DE HACES DE ANTENAS DE SISTEMAS DE RELEVADORES RADIOELÉCTRICOS CON LAS ÓRBITAS DE LAS ESTACIONES ESPACIALES DEL SERVICIO FIJO POR SATÉLITE

(1992)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que la Recomendación UIT-R SF.406 especifica la p.i.r.e. máxima de los transmisores de los sistemas de relevadores radioelétricos con visibilidad directa que funcionan en las bandas de frecuencias compartidas con el servicio fijo por satélite (Tierra-espacio);
- b) que para examinar la conformidad de las estaciones de relevadores radioelétricos que funcionan por debajo de 15 GHz con la Recomendación UIT-R SF.406 hay que calcular el ángulo entre la dirección del haz de la antena del relevador radioelétrico y la dirección hacia la órbita de los satélites geoestacionarios;
- c) que en dicho cálculo debe tenerse en cuenta el efecto de la refracción atmosférica,

recomienda

1. que se tome en consideración el material contenido en el anexo 1 al planificar sistemas de relevadores radioelétricos;
2. que se utilice el método descrito en el anexo 2 para calcular el ángulo entre la dirección del haz de la antena del relevador radioelétrico y la dirección hacia la órbita de los satélites geoestacionarios.

Nota 1 – Conviene que los receptores de relevadores radioelétricos de alta sensibilidad que funcionan en bandas comprendidas entre 1 y 15 GHz compartidas con sistemas espaciales (espacio-Tierra) eviten, en su propio interés, dirigir sus antenas hacia la órbita de los satélites geoestacionarios (véase la nota 2 de la Recomendación UIT-R SF.406). Para ello también puede utilizarse el método de la presente Recomendación.

ANEXO 1**

Inserción de haces de antenas de sistemas de relevadores radioelétricos con las órbitas de las estaciones espaciales del servicio fijo por satélite**1. Introducción**

La exposición de los haces de las antenas de los sistemas de relevadores radioelétricos a la radiación de los satélites de telecomunicación se puede predecir por métodos geométricos cuando tales satélites describen órbitas circulares cuyas proyecciones sobre la superficie de la Tierra son recurrentes, pero sólo se puede prever estadísticamente en el caso de órbitas circulares e inclinadas de periodos arbitrarios. Se puede obrar de modo que un sistema de satélites sincronizado, con proyecciones recurrentes, tenga una proyección única sobre la Tierra. Estos sistemas presentan cada vez mayor interés para las radiocomunicaciones. Los satélites geoestacionarios constituyen un caso particular, pues el ecuador representa la proyección de todas las órbitas ecuatoriales.

* Les Comisiones de Estudio 4 y 9 de Radiocomunicaciones efectuaron modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2000 de conformidad con la Resolución UIT-R 44.

** *Nota del Director del CCIR* – A título de información, la deducción de las fórmulas, así como otros antecedentes históricos, del presente anexo pueden encontrarse en las Referencias Bibliográficas que figuran en el Informe 393 del CCIR (Düsseldorf, 1990).

En cualquier punto de la Tierra desde el que se vean los satélites de un sistema con proyección única, los satélites de aparición sucesiva (no geoestacionarios) siguen un arco fijo que atraviesa la bóveda celeste de un horizonte al otro. Además, salvo en el caso de órbitas inclinadas, este arco no depende de la longitud y es simétrico con respecto a la dirección norte-sur.

En los puntos siguientes del presente anexo se examinan las condiciones de exposición con respecto a una órbita ecuatorial circular, incluyéndose el caso particular de la órbita de los satélites geoestacionarios, así como la probabilidad de exposición a satélites no sincronizados (proyección no recurrente sobre la superficie de la Tierra).

Varias administraciones han proporcionado información sobre la medida en que las antenas de los sistemas de relevadores radioeléctricos existentes están orientadas hacia la órbita de los satélites geoestacionarios. Esta información indica que, si el porcentaje de los haces de antena que cortan esa órbita es de aproximadamente un 2%, este porcentaje será mucho más elevado si se tienen en cuenta, por una parte, los haces que se extienden a $\pm 2^\circ$ de su eje y, por otra, el efecto de la refracción. Examinando las estaciones de relevadores radioeléctricos existentes, en relación con lo dispuesto en la Recomendación UIT-R SF.406, se observa que el porcentaje de estaciones cuyo haz de antena está orientado dentro de $\pm 2^\circ$ de la órbita geoestacionaria, es, en determinados países, del orden de un 10%. Además, no cabe suponer que escapen a la radiación de las antenas de los relevadores radioeléctricos segmentos importantes de la órbita de los satélites geoestacionarios (cualquiera que sea su longitud).

2. Algunas características de los haces de las antenas de los sistemas de relevadores radioeléctricos terrenales

Los sistemas de relevadores radioeléctricos con visibilidad directa utilizan antenas cuya ganancia es de unos 40 dB y haces cuya anchura angular de potencia mitad es de unos 2° . Los sistemas transhorizonte emplean generalmente antenas de mayor ganancia y haces de anchura angular más reducida (por ejemplo, 50 dB y $0,5^\circ$). En ambos casos, el trayecto tiene, por término medio, una inclinación inferior a $0,5^\circ$, y raramente excede de 5° . Cuando la totalidad de un haz de inclinación negativa llega a la Tierra, no está expuesto a ninguna órbita. En cuanto a los haces cuyo eje esté orientado hacia el horizonte, sólo su mitad superior puede estar expuesta a una órbita.

Cuando se utilizan reflectores pasivos conviene tener en cuenta también la difracción.

Como los haces pasan cerca de la superficie de la Tierra y atraviesan una capa atmosférica bastante espesa, si se quiere calcular exactamente la exposición, habrá que tener en cuenta la difracción y la refracción.

3. Direcciones con relación a las órbitas ecuatoriales circulares

Por consideraciones geométricas, se sabe que el ángulo acimutal A (medido en el sentido de las agujas del reloj a partir del Norte) y el ángulo de elevación e de un satélite colocado en una órbita ecuatorial circular, pueden expresarse por:

$$A = \text{arc tg} (\pm \text{tg } \lambda / \text{sen } \varphi) \quad (1)$$

$$e = \text{arc sen} \left[(K \cos \varphi \cos \lambda - 1) / \sqrt{K^2 + 1 - 2K \cos \varphi \cos \lambda} \right] \quad (2)$$

donde:

K : relación radio de la órbita/radio terrestre

φ : latitud de la estación terrenal

λ : diferencia de longitud entre la estación terrenal y el satélite.

Eliminando λ entre estas dos ecuaciones se obtiene:

$$A = \text{arc cos} \left\{ \left[\frac{\text{tg } e + K^{-1} \sqrt{\text{tg}^2 e + (1 - K^{-2})}}{1 - K^{-2}} \right] \text{tg } \varphi \right\} \quad (3)$$

En caso necesario, generalizando este análisis, se pueden obtener los acimutes y los ángulos de elevación para cualquier sistema de órbita inclinada y una sola proyección sobre la Tierra, cuyos satélites evolucionan a una altura dada; también puede determinarse la inclinación y los puntos de intersección con el ecuador. No obstante, las direcciones de la órbita para tales sistemas dependerán a la vez de la latitud y de la longitud de la estación terrenal.

Una antena orientada hacia una órbita ecuatorial circular de satélite no geoestacionario (o hacia otra órbita de una sola proyección sobre la Tierra) sufrirá ciertamente una exposición intermitente. En el caso de una órbita ecuatorial circular (distinta de la órbita de los satélites geoestacionarios), con m satélites, las antenas que tengan una anchura de haz de interferencia de θ radianes, sufrirán interferencia durante una fracción de tiempo, cuya expresión aproximada es:

$$P = m \theta / (2\pi) \quad (4)$$

En el caso particular de la órbita de los satélites geoestacionarios, P será igual a cero o a uno.

4. Sistemas de satélites no sincronizados

En este caso no se puede establecer más que una probabilidad media de exposición a la radiación de un satélite. Por consiguiente, para un sistema de n órbitas, de igual altura y ángulo de inclinación i , la probabilidad media de exposición puede expresarse por:

$$P = [m n \theta / (8\pi \cos \psi)] \{ \arccos [(\sin(\psi - \theta/2)) / \sin i] - \arccos [(\sin(\psi + \theta/2)) / \sin i] \} \quad (5)$$

cuando $\psi \leq (i - \theta/2)$,

siendo:

m : número de satélites en cada órbita

ψ : latitud del punto de intersección del haz de la antena y la esfera orbital.

En la mayoría de los casos prácticos en que $i > \theta$, es posible efectuar el cálculo por medio de la ecuación siguiente:

$$P = \frac{m n \theta^2}{8\pi \sqrt{\sin^2 i - \sin^2 \psi}} \quad (6)$$

La utilización de esta ecuación (6) aproximada en vez de la ecuación (5) da lugar a un error relativo que no excede del 0,25%.

En el caso particular de la órbita polar, $i = \pi/2$ y la expresión anterior se reduce a:

$$P = m n \theta^2 / (8\pi \cos \psi) \quad (7)$$

5. Relaciones geométricas entre la orientación de las antenas de relevadores radioeléctricos y la órbita de los satélites geoestacionarios

El caso de la órbita de los satélites geoestacionarios es importante, no sólo en lo que concierne a la exposición de los sistemas de relevadores radioeléctricos a los haces de los satélites, sino también por las limitaciones impuestas por la Recomendación 406, en función de la dirección de las antenas de los sistemas de relevadores radioeléctricos, a fin de proteger la recepción en los satélites geoestacionarios.

La ecuación (3) puede formularse:

$$A = \arccos \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} [\arccos (K^{-1} \cos e) - e]} \quad (8)$$

donde:

A : acimut (o complemento a 360°) contado a partir del Sur en el hemisferio Norte y a partir del Norte en el hemisferio Sur

K : radio de la órbita/radio terrestre, hipotéticamente 6,63

e : ángulo geométrico de elevación de un punto en la órbita de los satélites geoestacionarios

φ : latitud de la estación terrestre.

Para una latitud de estación y un ángulo de elevación dados, los valores del ángulo A para los dos puntos de la órbita se miden desde uno y otro lado del meridiano.

5.1 Efecto de la refracción atmosférica

La refracción atmosférica hace generalmente que el rayo radioeléctrico se curve hacia la Tierra; el haz de una antena de un sistema de relevadores radioeléctricos con un ángulo de elevación ε puede llegar a un satélite con un ángulo de elevación, e , donde:

$$e = \varepsilon - \tau \quad (9)$$

siendo e y ε valores algebraicos y τ el valor absoluto de la corrección debida a la refracción.

La importancia de la curvatura depende del clima de la región en que se encuentre la estación (índice de refracción, gradiente del índice, etc.), de la altitud de la estación y del ángulo inicial de elevación ε ; la variación de τ en función de ε es particularmente rápida para bajos valores negativos de ε .

El valor de τ puede ser superior a algunas décimas de grado, lo que es muy importante en el caso de estaciones de latitud media o elevada en las que una ligera modificación del ángulo de elevación representa un cambio importante del acimut de cada uno de los dos puntos correspondientes en la órbita del satélite geostacionario. Además, esta corrección varía en función del tiempo con las condiciones atmosféricas. En un punto de determinada latitud y para un ángulo de elevación dado, el acimut apuntado directamente hacia la órbita barrerá, al cabo de cierto periodo, una determinada zona angular.

Para poder aplicar la Recomendación UIT-R SF.406 hay que tener en cuenta que un valor medio de refracción proporciona una protección importante y que, para obtener una protección total, conviene considerar los valores máximo y mínimo de la curvatura debida a la refracción, a fin de determinar los acimutes extremos de esa zona angular; esto puede hacerse sobre una base estadística. La ecuación (8) sirve para determinar los acimutes extremos de la zona angular barrida a partir de los ángulos de elevación extremos e_1 y e_2 .

La determinación de la curvatura τ en función del clima, de la altitud de la estación y del ángulo de elevación ε no es fácil, pues no siempre puede admitirse la hipótesis de una atmósfera de referencia de tipo exponencial y dista de ser despreciable la posibilidad de que se formen conductos atmosféricos, sobre todo en ciertas zonas marítimas cálidas.

De poder admitirse la hipótesis de una atmósfera de tipo exponencial y de que estén relacionados el coíndice de refracción en el suelo N y el gradiente ΔN del coíndice de refracción entre 0 y 1 000 m, se pueden calcular curvas que indiquen la corrección τ en función del ángulo de elevación ε . La determinación de las correcciones máxima y mínima τ_1 y τ_2 se reduce entonces a la estimación de los valores máximo y mínimo de N (o de ΔN) que corresponden al caso particular estudiado.

La influencia de la altitud de la estación es muy difícil de estimar. Con ángulos de elevación positivos, el rayo radioeléctrico sale rápidamente de la atmósfera, la curvatura τ es relativamente pequeña y la influencia de la altitud es probablemente reducida. En cambio, con ángulos de elevación negativos, un rayo que cruza el horizonte atraviesa dos veces las capas más densas de la atmósfera, la curvatura τ es, pues, grande y su variación en función de la altitud, con un ángulo de elevación constante, es probablemente más importante. No obstante, no se poseen datos precisos a este respecto.

Provisionalmente, para proteger la órbita en todos los casos, se adoptarán las reglas siguientes:

5.1.1 En las zonas geográficas en que se disponga de datos de propagación que permitan determinar la curvatura sobre una base estadística, se deducirá de esos datos el valor máximo de curvatura, definido como el valor no excedido durante, por ejemplo, el 99,5% del tiempo, y su valor mínimo.

5.1.2 En los casos en que no se dispone de tales datos, se puede recurrir a la siguiente aproximación. Si se dispone de una atmósfera de referencia exponencial, los límites del coíndice de refracción se pueden calcular mediante el coíndice de refracción radioeléctrica al nivel del mar N_0 y el gradiente ΔN (y mediante los mapas mundiales). Una gama de valores de N_0 comprendidos entre 250 y 400 (ΔN al nivel del mar comprendido entre -30 y -68 , respectivamente) es representativa de los valores mínimo y máximo para una gran parte del globo y para todo el año. Una vez establecidos estos límites, se pueden calcular las curvas τ_1 y τ_2 en función del ángulo de elevación de la antena y de la altitud de la estación.

La corrección de refracción, τ , puede calcularse mediante la integración siguiente:

$$\tau = - \int_{n_1}^{n_2} [\cotg \varepsilon/n(r)] dn \quad (10)$$

La integración se efectúa aplicando la condición de la ley de Snell para coordenadas polares, como sigue:

$$n(r) \cdot r \cdot \cos \varepsilon = n(r_1) \cdot r_1 \cdot \cos \varepsilon_1 \quad (11)$$

donde:

$$n(r) = 1 + a \cdot \exp[-b(r - r_0)]$$

r_0 : radio de la Tierra (6 370 km)

$r_1 = r_0 + h$ (h : altura de la estación)

ε_1 : ángulo de elevación en la estación

n_1 : coíndice de refracción a la altura de la estación

n_2 : coíndice de refracción en la órbita

$$a = N_0 \times 10^{-6}$$

$$b = \ln[N_0/(N_0 + \Delta N)]$$

$N_0 = 400$ y $\Delta N = -68$ para curvatura máxima

$N_0 = 250$ y $\Delta N = -30$ para curvatura mínima.

La integración se ha llevado a cabo y los resultados del cálculo se presentan en la fig. 1.

En la nota 1 del anexo 2, § 4, a esta Recomendación se dan fórmulas numéricas con las que se obtiene una buena aproximación de esta función.

5.2 Utilización de un medio gráfico para determinar los acimutes que hay que evitar

Para determinar los acimutes puede utilizarse un método gráfico que tiene en cuenta la influencia del horizonte local real. Las aproximaciones utilizadas limitan su aplicación a las estaciones situadas por debajo de los 70° de latitud aproximadamente. Su precisión en acimut es de unos 0,1°, obteniéndose mejores resultados para pequeños ángulos de elevación.

Este método (fig. 2) se basa en la consideración de la órbita aparente de un satélite geoestacionario, teniendo en cuenta el efecto de la refracción, la latitud de la estación terrenal, el ángulo de elevación de su antena y la influencia del horizonte óptico (real) local.

Para trazar la órbita aparente (refractada) hay que elevar, en cada punto, la proyección de la órbita geométrica en una magnitud τ que es función del ángulo de elevación de la órbita geométrica y de la altitud de la estación.

Esto puede hacerse representando geoméricamente el punto de elevación ε y acimut $C(\varepsilon - \tau(\varepsilon))$, donde $C(\)$ viene dado por la ecuación (14) del anexo 2, y $\tau(\)$ corresponde a $\tau_{m\acute{a}x}(\)$ ó $\tau_{m\acute{i}n}(\)$ de la nota 1 del anexo 2.

El método puede resumirse como sigue:

5.2.1 En la fig. 2, trácese una recta que pase por el origen y por el punto correspondiente a la latitud de la estación considerada (esto implica que, en primera aproximación, la órbita puede asimilarse a una recta en ese pequeño intervalo). El acimut de referencia (0° en la fig. 2) para un ángulo de elevación cero se calcula por la ecuación (8).

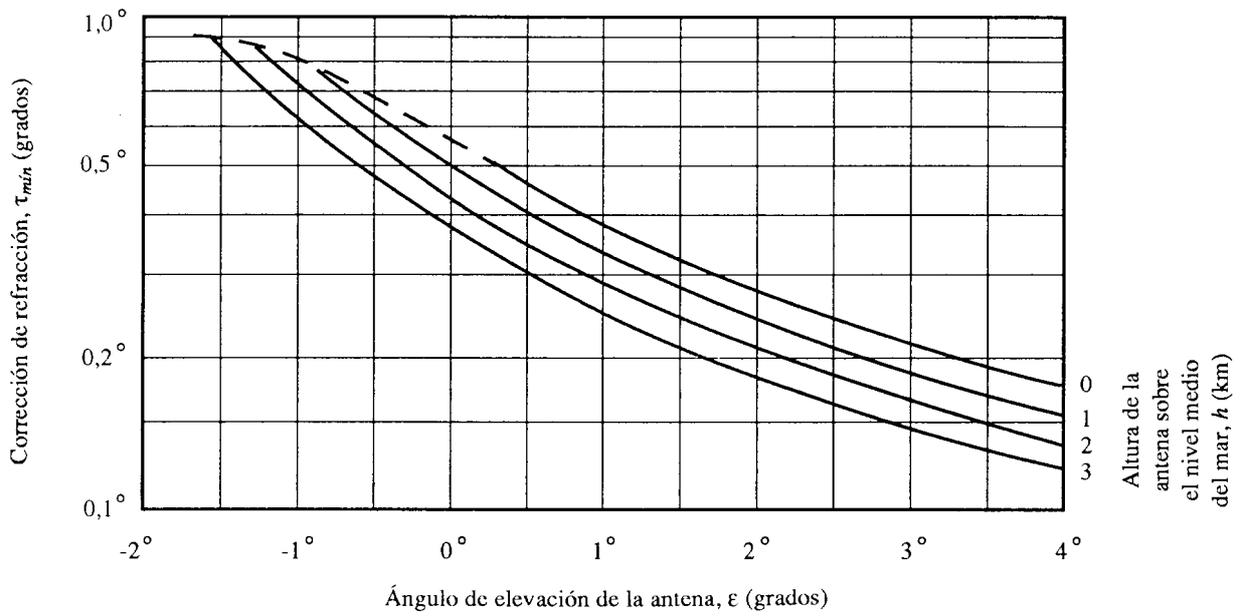
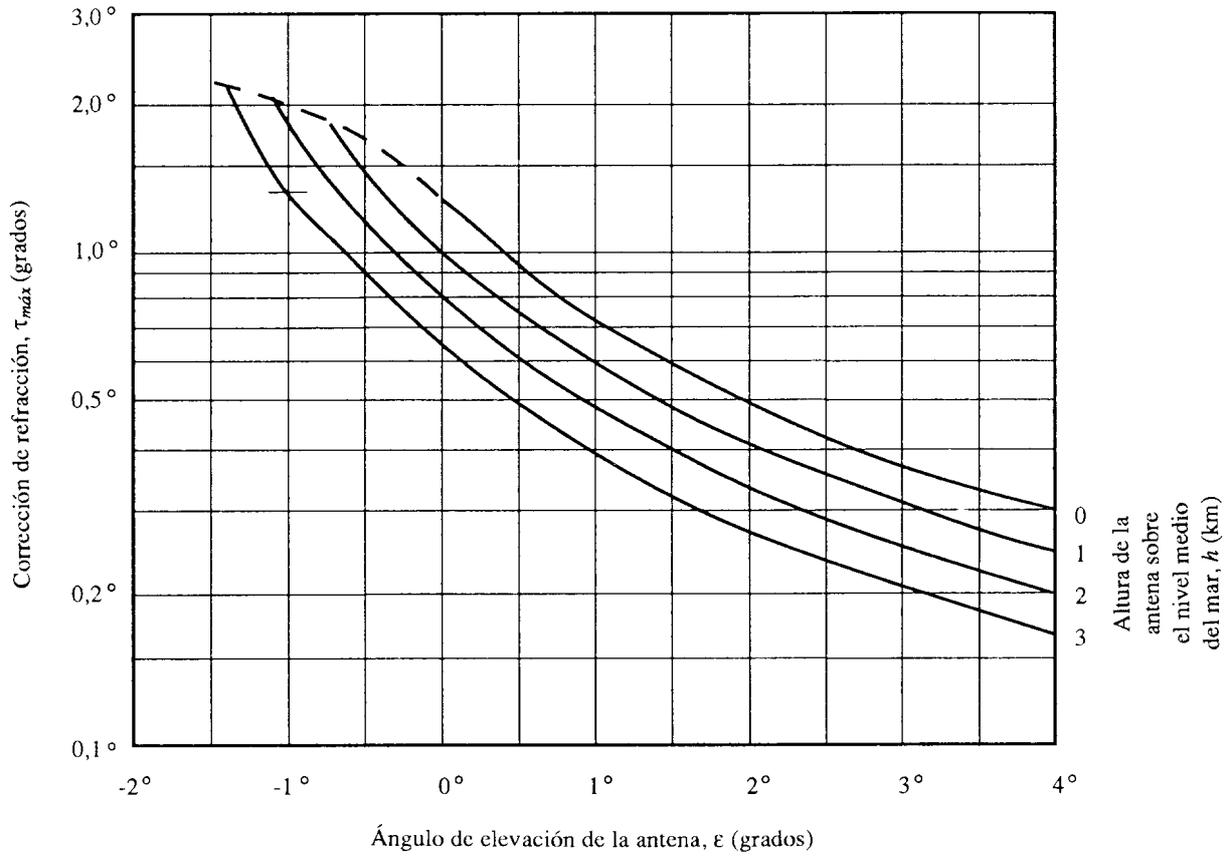
5.2.2 Trácese una recta horizontal correspondiente al ángulo de elevación ε previsto para la antena.

5.2.3 Elévase, en cada uno de sus puntos, la proyección geométrica de la órbita en una cantidad τ (función de ε) para tener en cuenta las refracciones máxima y mínima previstas. Se obtienen así dos nuevas proyecciones, una de las cuales corresponde a la curvatura máxima y la otra a la curvatura mínima.

5.2.4 Trácese el horizonte local en la región del acimut considerado. Para los estudios preliminares se puede simplificar sustituyendo este horizonte por un horizonte medio aproximado.

5.2.5 Sirviéndose de un compás con una abertura de 2°, búsquese, en la recta correspondiente al ángulo de elevación constante de la antena, el centro del círculo tangente al trazado que corresponde a la curvatura mínima: queda así definido uno de los acimutes límite. Réstese esta desviación del acimut central determinado mediante la ecuación (8).

FIGURA 1
Corrección de refracción en función del ángulo de elevación de la antena ϵ

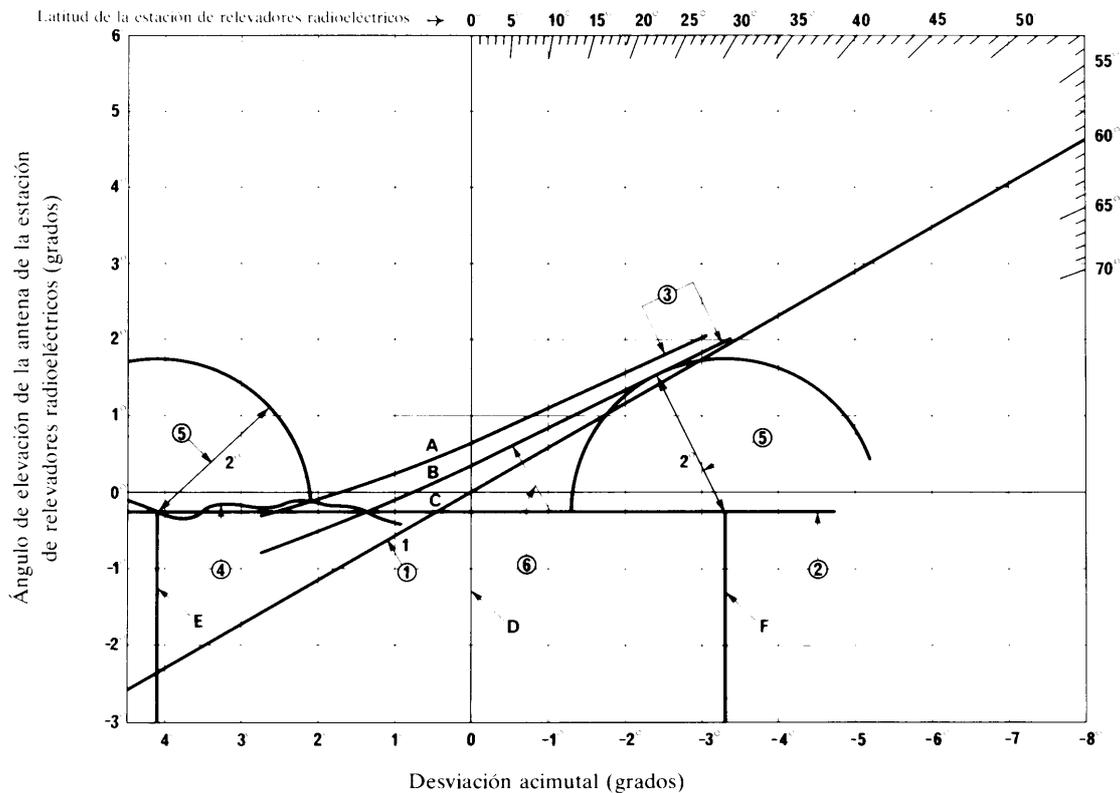


$N_0 = 400$ y $\Delta N = -68$ para curvatura máxima

$N_0 = 250$ y $\Delta N = -30$ para curvatura mínima

FIGURA 2

Ejemplo de utilización del método gráfico



Altitud de la estación de relevadores radioeléctricos: 1 km

Latitud: 60°

Ángulo de elevación ϵ : $-0,25^\circ$

- A : Refracción máxima
- B : Refracción mínima
- C : Refracción nula

- D : Acimut de referencia : $74,68^\circ$ (según la ecuación (8))
- E : Limite superior : $74,68^\circ + 4,1^\circ = 78,78^\circ$
- F : Limite inferior : $74,68^\circ - 3,3^\circ = 71,38^\circ$

D02-sc

De modo similar, en la recta que representa el ángulo de elevación constante de la antena, búscuese el centro de un segundo círculo de forma que su punto de intersección más próximo al trazado de la curvatura máxima se encuentre inmediatamente por encima del horizonte; se define así el segundo acimut límite. Súmese esta desviación al acimut central.

5.2.6 Esta construcción gráfica sirve también para encontrar la desviación angular mínima real entre el acimut de una antena existente y el de la órbita. Esa desviación será la abertura de compás correspondiente a la distancia más corta entre el punto que represente el acimut y el ángulo de elevación ϵ de esa dirección de antena y el punto de la órbita más cercano. La potencia máxima radiada autorizada ha de determinarse con arreglo a la Recomendación UIT-R SF.406.

5.3 Método analítico

El cálculo del ángulo de separación se lleva a cabo con facilidad informatizando el método de cálculo descrito en el anexo 2. Además, puede ser preferible emplear el método analítico en vez del método gráfico si las estaciones se hallan a latitudes elevadas, porque las diversas aproximaciones del método gráfico no son válidas en esa condición.

**Método analítico para calcular los ángulos de separación entre los haces
de las antenas de sistemas de relevadores radioeléctricos
y la órbita de los satélites geoestacionarios**

1. Introducción

El método analítico de cálculo de este anexo comprende:

- los cálculos preliminares del § 2, donde se clasifica el haz principal en un total de 8 zonas;
- la determinación preliminar de ángulo de separación del § 3, donde se hace una estimación inicial del ángulo de separación, como preparación para los cálculos detallados del § 4;
- los cálculos detallados del ángulo de separación efectuados en el § 4, donde se obtiene el valor exacto del ángulo de separación.

Los parámetros necesarios para el cálculo son:

B : ángulo de separación que debe evitarse (dentro de 2° para frecuencias entre 1 y 10 GHz y de $1,5^\circ$ para frecuencias de 10 a 15 GHz)

L : latitud de la estación (en valor absoluto)

A_0 : acimut del haz principal de la antena (contado en el sentido de las agujas del reloj o en el sentido contrario, desde el Sur en el hemisferio norte y desde el Norte en el hemisferio sur $0 \leq A_0 \leq 180^\circ$)

ϵ_0 : ángulo de elevación del haz principal de la antena

$\tau_{m\acute{a}x}(\epsilon)$: curvatura atmosférica máxima, correspondiente al ángulo de elevación ϵ (nota 1)

$\tau_{m\acute{i}n}(\epsilon)$: curvatura atmosférica mínima, correspondiente al ángulo de elevación ϵ (nota 1)

ϵ_{m1} : valor mínimo del ángulo de elevación hacia el horizonte local con curvatura atmosférica máxima, visto desde la altura de la antena de la estación, sobre una gama acimutal entre $A_0 - B$ y $A_0 + B$ (nota 2)

ϵ_{m2} : valor mínimo del ángulo de elevación hacia el horizonte local con curvatura atmosférica mínima, visto desde la altura de la antena de la estación, sobre una gama acimutal entre $A_0 - B$ y $A_0 + B$ (nota 2).

Además se definen las siguientes fórmulas:

$$F(E) = \arccos(K^{-1} \cos E) \quad (12)$$

siendo K la relación radio de la órbita/radio terrestre, hipotéticamente 6,63

$$S(A, E) = \arcsin[\sin L \cdot \cos(F - E) - \cos L \cdot \sin(F - E) \cdot \cos A] \quad (13)$$

siendo $S(A, E)$ el ángulo (grados) entre el haz y la órbita (véase la nota 3)

$$C(E) = \arccos[\operatorname{tg} L / \operatorname{tg}(F - E)] \quad (14)$$

siendo $C(E)$ el acimut (grados) de la órbita correspondiente al ángulo de elevación refractado E . Téngase en cuenta que el valor de F de las fórmulas (13) y (14) se calcula a partir de E utilizando la ecuación (12).

$$\alpha = \text{sen } L / \sqrt{(1 - K^{-2})^2 + (K^{-1} \text{sen } L)^2} \quad (15)$$

$$\beta = \sqrt{1 - \alpha^2} \quad (16)$$

siendo $\text{arc sen } \alpha$ el ángulo entre el horizonte y la línea normal a la órbita del satélite geoestacionario en la dirección acimutal, donde la órbita de satélites geoestacionarios en la dirección acimutal, donde la órbita de satélite geoestacionario cruza el horizonte, sin tener en cuenta la refracción atmosférica, visto desde la latitud L .

Cuando $S(A, E)$ es positivo, el haz está por encima de la órbita y cuando $S(A, E)$ es negativo, el haz está por debajo.

Los cálculos que figuran a continuación se llevan a cabo en la hipótesis de que el horizonte es llano, siendo su altura igual a la altura mínima sobre el horizonte local en la gama acimutal de $A_0 - B$ a $A_0 + B$. Cuando el horizonte local no sea llano, los resultados de los cálculos deberán interpretarse de la siguiente manera:

- si el cálculo muestra que el ángulo de separación es de por lo menos B grados el resultado es correcto incluso si se tiene en cuenta un horizonte local de contorno complejo;
- si, según el cálculo, el ángulo de separación es de menos de B grados, podrá utilizarse el método gráfico descrito en el anexo 1 para proseguir la investigación. El análisis gráfico puede mostrar que, en algunos casos, el ángulo de separación es de por lo menos B grados debido al contorno complejo del horizonte local.

2. Cálculos preliminares

La fig. 3 muestra órbitas de satélites geoestacionarios y horizontes aparentes, vistos desde la estación. $GSO_{\text{máx}}$ y $GSO_{\text{mín}}$ son las órbitas aparentes de los satélites geoestacionarios con curvatura atmosférica máxima y mínima, respectivamente. $HOR_{\text{máx}}$ y $HOR_{\text{mín}}$ son los horizontes aparentes con curvatura atmosférica máxima y mínima respectivamente. H_1 es el punto de cruce de $GSO_{\text{máx}}$ y $HOR_{\text{máx}}$ y H_2 es el punto de cruce de $GSO_{\text{mín}}$ y $HOR_{\text{mín}}$. Parece razonable suponer que, entre H_1 y H_2 , el horizonte es una línea recta que une a ambos puntos.

Los acimutes A_{m1} del punto H_1 y A_{m2} del punto H_2 vienen dados por:

$$E_{m1} = \epsilon_{m1} - \tau_{\text{máx}}(\epsilon_{m1}), \quad A_{m1} = C(E_{m1})$$

$$E_{m2} = \epsilon_{m2} - \tau_{\text{mín}}(\epsilon_{m2}), \quad A_{m2} = C(E_{m2})$$

donde E_{m1} y E_{m2} son los ángulos de elevación refractados.

Es preciso clasificar las direcciones de los haces principales en varios casos, ya que la fig. 3 es relativamente complicada.

2.1 Eliminación preliminar

En los casos siguientes puede concluirse fácilmente que el ángulo de separación es de por lo menos B grados.

- a) $A_{m1} + B \leq A_0$: El ángulo de separación es de por lo menos $A_0 - A_{m1}$ grados.
- b) $A_0 < A_{m1} + B$ y $\epsilon_0 \leq \epsilon_{m2} - B$: El ángulo de separación es de por lo menos $\epsilon_{m2} - \epsilon_0$ grados.

En los demás casos son precisos cálculos más detallados, que se indican a continuación.

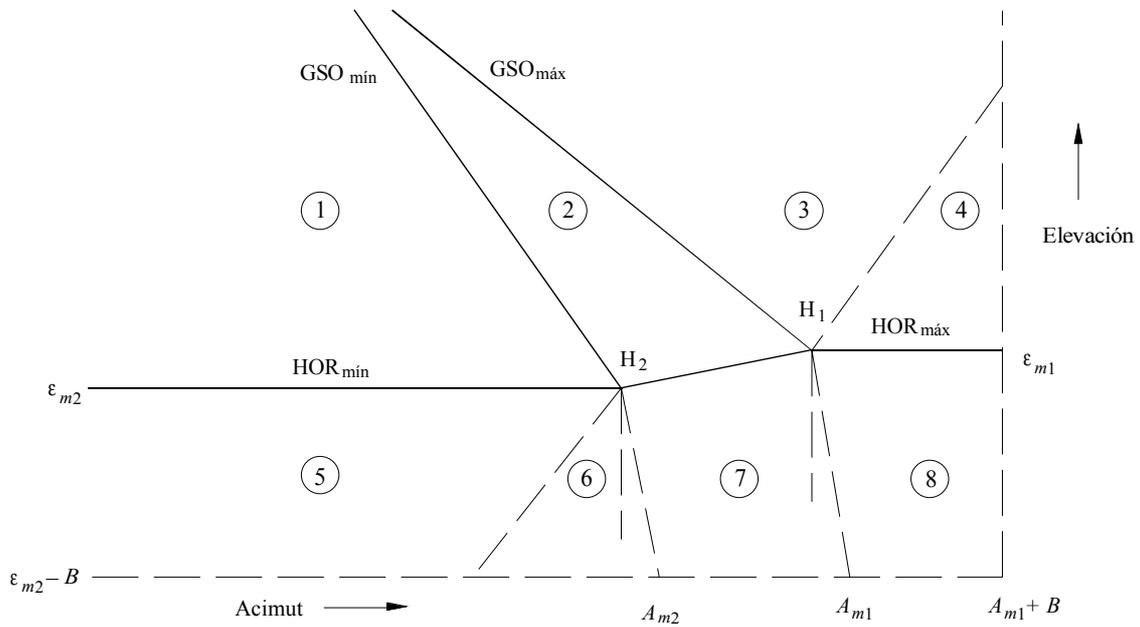
2.2 Clasificación de las direcciones del haz principal

La dirección del haz principal es la del horizonte o está por encima del mismo cuando se cumple una de las condiciones siguientes:

- a) $A_{m1} \leq A_0$ y $\epsilon_{m1} \leq \epsilon_0$
- b) $A_{m2} \leq A_0 < A_{m1}$ y $(\epsilon_{m1} - \epsilon_{m2})(A_0 - A_{m1}) \leq (\epsilon_0 - \epsilon_{m1})(A_{m1} - A_{m2})$
- c) $A_0 < A_{m2}$ y $\epsilon_{m2} \leq \epsilon_0$

FIGURA 3

Clasificación de las direcciones del haz principal



$GSO_{m\acute{a}x}$: Órbita aparente de los satélites geostacionarios con curvatura atmosférica máxima

$GSO_{m\acute{i}n}$: Órbita aparente de los satélites geostacionarios con curvatura atmosférica mínima

D03

En los casos anteriores, las direcciones de los haces principales se clasifican en las Zonas 1, 2, 3 y 4 de acuerdo con el siguiente criterio (véase la fig. 3):

$$\text{Zona 1: } S_{m\acute{i}n} < 0$$

$$\text{Zona 2: } S_{m\acute{a}x} \leq 0 \quad \text{y} \quad S_{m\acute{i}n} \geq 0$$

$$\text{Zona 3: } S_{m\acute{a}x} > 0 \quad \text{y} \quad \alpha(A_0 - A_{m1}) < \beta(\epsilon_0 - \epsilon_{m1})$$

$$\text{Zona 4: } S_{m\acute{a}x} > 0 \quad \text{y} \quad \alpha(A_0 - A_{m1}) \geq \beta(\epsilon_0 - \epsilon_{m1})$$

donde $S_{m\acute{a}x}$ y $S_{m\acute{i}n}$ vienen dados por:

$$E_{m\acute{a}x} = \epsilon_0 - \tau_{m\acute{a}x}(\epsilon_0), \quad S_{m\acute{a}x} = S(A_0, E_{m\acute{a}x})$$

$$E_{m\acute{i}n} = \epsilon_0 - \tau_{m\acute{i}n}(\epsilon_0), \quad S_{m\acute{i}n} = S(A_0, E_{m\acute{i}n})$$

En los casos en que las direcciones de los haces principales están por debajo del horizonte, se clasifican en las Zonas 5, 6, 7 y 8, como se indica a continuación (véase la fig. 3):

$$\text{Zona 5: } \alpha(A_0 - A_{m2}) < \beta(\epsilon_0 - \epsilon_{m2})$$

$$\text{Zona 6: } \alpha(A_0 - A_{m2}) \geq \beta(\epsilon_0 - \epsilon_{m2}) \text{ y}$$

$$(\epsilon_{m1} - \epsilon_{m2})(\epsilon_0 - \epsilon_{m2}) + (A_{m1} - A_{m2})(A_0 - A_{m2}) < 0$$

$$\text{Zona 7: } (\epsilon_{m1} - \epsilon_{m2})(\epsilon_0 - \epsilon_{m2}) + (A_{m1} - A_{m2})(A_0 - A_{m2}) \geq 0 \text{ y}$$

$$(\epsilon_{m1} - \epsilon_{m2})(\epsilon_0 - \epsilon_{m1}) + (A_{m1} - A_{m2})(A_0 - A_{m1}) < 0$$

$$\text{Zona 8: } (\epsilon_{m1} - \epsilon_{m2})(\epsilon_0 - \epsilon_{m1}) + (A_{m1} - A_{m2})(A_0 - A_{m1}) \geq 0$$

3. Determinación preliminar del ángulo de separación

Zona 1

En este caso, la dirección del haz principal está por debajo de la órbita, con curvatura atmosférica tanto máxima como mínima. La elevación y el acimut de la dirección en la circunferencia del haz con un ángulo de separación B respecto al haz principal, en una línea aproximadamente normal a la órbita, vienen dados por:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \alpha \cdot B, \quad A_1 = A_0 + \beta \cdot B$$

Se calcula $E_1 = \varepsilon_1 - \tau_{min}(\varepsilon_1)$ y $S_1 = S(A_1, E_1)$

Una estimación aproximada del ángulo de separación es:

$$SA = B \cdot S_{min} / (S_{min} - S_1) \quad \text{grados}$$

Se calcula $\varepsilon_s = \varepsilon_0 + \alpha \cdot SA$ y se procede como se indica en el § 4 para un cálculo más exacto.

Zona 2

En este caso, el ángulo de separación es cero.

Zona 3

En este caso, el haz principal está por encima de la órbita tanto para la máxima como para la mínima curvatura atmosférica. La elevación y el acimut de la dirección en la circunferencia del haz con un ángulo de separación B con respecto al haz principal, en una línea aproximadamente normal a la órbita, vienen dados por:

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_0 - \alpha \cdot B, \quad A_3 = A_0 - \beta \cdot B$$

Si $\varepsilon_3 \geq \varepsilon_{m1}$, se calcula:

$$E_3 = \varepsilon_3 - \tau_{máx}(\varepsilon_3) \quad \text{y} \quad S_3 = S(A_3, E_3)$$

Una estimación aproximada del ángulo de separación es:

$$SA = B \cdot S_{máx} / (S_{máx} - S_3) \quad \text{grados}$$

Se calcula $\varepsilon_s = \varepsilon_0 - \alpha \cdot SA$ (si $\varepsilon_s < \varepsilon_{m1}$, se hace $\varepsilon_s = \varepsilon_{m1}$), y se pasa al § 4 para un cálculo más exacto.

Si $\varepsilon_3 < \varepsilon_{m1}$, se calcula:

$$A_{31} = A_0 - (\varepsilon_0 - \varepsilon_{m1}) \cdot \beta / \alpha$$

donde A_{31} es el acimut de la dirección en la que la línea que atraviesa el haz principal y es normal a la órbita intersecta el horizonte local $HOR_{máx}$.

Una estimación aproximada del ángulo de separación es:

$$SA = [(\varepsilon_0 - \varepsilon_{m1}) / \alpha] \cdot S_{máx} / (S_{máx} - S_{31}) \quad \text{grados}$$

donde $S_{31} = S(A_{31}, E_{m1})$ y E_{m1} se calcula en el § 2.

(Como los computadores pueden tratar solamente un número limitado de dígitos, la fórmula anterior puede no ser apropiada en ciertos casos excepcionales, cuando S_{31} está muy próximo a $S_{máx}$. Por tanto, esta fórmula debe aplicarse cuando $|S_{máx} - S_{31}| > \Delta$ grados. Si no, una estimación razonable del ángulo de separación es $SA = S_{máx}$ (grados). El valor de Δ es suficientemente pequeño, por ejemplo $0,001^\circ$.)

Se calcula $\varepsilon_s = \varepsilon_0 - \alpha \cdot SA$ y se pasa al § 4 para un cálculo más exacto.

Zona 4

En este caso, la elevación y el acimut de la dirección de la órbita más próxima al haz principal son ε_{m1} y A_{m1} . Por tanto, el ángulo SA entre esa dirección y el haz principal viene dado por:

$$SA = \sqrt{(\varepsilon_{m1} - \varepsilon_0)^2 + (A_{m1} - A_0)^2} \quad \text{grados}$$

Este ángulo de separación es exacto y no se requieren más cálculos.

Zona 5

En este caso, la dirección del haz principal está por debajo del horizonte y también por debajo de la órbita, tanto para máxima como para mínima curvatura atmosférica.

Se calcula, en primer lugar:

$$A_5 = A_0 + (\varepsilon_{m2} - \varepsilon_0) \cdot \beta / \alpha \quad \text{y} \quad S_5 = S(A_5, E_{m2})$$

donde A_5 es el acimut de la dirección en la que la línea que atraviesa el haz principal y es normal a la órbita intersecta el horizonte local HOR_{\min} , y E_{m2} se calcula como en el § 2.

A continuación se calcula:

$$\varepsilon_{51} = \varepsilon_{m2} + \alpha \cdot B, \quad A_{51} = A_5 + \beta \cdot B$$

donde la dirección $(A_{51}, \varepsilon_{51})$ está separada B grados con respecto a la dirección (A_5, ε_{m2}) en la línea que atraviesa el haz principal y es normal a la órbita.

$$\text{Se calcula } E_{51} = \varepsilon_{51} - \tau_{\min}(\varepsilon_{51}) \quad \text{y} \quad S_{51} = S(A_{51}, E_{51}).$$

Una estimación aproximada del ángulo de separación es:

$$SA = (\varepsilon_{m2} - \varepsilon_0) / \alpha + B \cdot S_5 / (S_5 - S_{51}) \quad \text{grados}$$

Se calcula $\varepsilon_s = \varepsilon_0 + \alpha \cdot SA$ y se pasa al § 4 para un cálculo más exacto.

Zona 6

En este caso, el ángulo entre el haz principal y el punto H_2 representa una estimación aproximada del ángulo de separación, y viene dado por:

$$SA = \sqrt{(\varepsilon_{m2} - \varepsilon_0)^2 + (A_{m2} - A_0)^2} \quad \text{grados}$$

Sin embargo, como a veces, raramente, la dirección de la órbita más próxima puede ser ligeramente diferente, se hace $\varepsilon_s = \varepsilon_{m2}$ y se pasa al § 4 para un cálculo más exacto.

Zona 7

En este caso, la dirección de la órbita más próxima coincide con el horizonte que une H_1 y H_2 , y el ángulo de separación viene dado por:

$$SA = [(\varepsilon_{m1} - \varepsilon_{m2})(A_0 - A_{m1}) - (\varepsilon_0 - \varepsilon_{m1})(A_{m1} - A_{m2})] / \sqrt{(\varepsilon_{m1} - \varepsilon_{m2})^2 + (A_{m1} - A_{m2})^2}$$

Este ángulo de separación es exacto por lo que no son necesarios más cálculos.

Zona 8

En este caso, la dirección de la órbita más próxima es el punto H_1 y el ángulo de separación es:

$$SA = \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{m1})^2 + (A_0 - A_{m1})^2} \quad \text{grados}$$

Este ángulo de separación es exacto por lo que no son necesarios más cálculos.

4. Cálculos detallados del ángulo de separación

En el caso de las Zonas 1, 3, 5 y 6 el ángulo de separación calculado en el punto anterior es sólo aproximado. No obstante, si $SA \geq 1,5 B$, puede decirse con seguridad que el ángulo de separación es de por lo menos B grados, y no hacen falta entonces más cálculos.

Si $SA < 1,5 B$, harán falta más cálculos para obtener valores más exactos. Para ello conviene empezar con ε_s , ya calculado, correspondiente al ángulo de separación aproximado.

En el caso de las Zonas 1, 5 y 6, la dirección de la órbita más próxima se halla en GSO_{\min} . El acimut A_s y el ángulo de separación SA correspondientes a ϵ_s vienen dados por:

$$E_s = \epsilon_s - \tau_{\min}(\epsilon_s), \quad A_s = C(E_s), \quad SA = \sqrt{(\epsilon_0 - \epsilon_s)^2 + (A_0 - A_s)^2}$$

En el caso de la Zona 3, la dirección de la órbita más próxima se halla en GSO_{\max} . El acimut y el ángulo de separación correspondientes a ϵ_s vienen dados por:

$$E_s = \epsilon_s - \tau_{\max}(\epsilon_s), \quad A_s = C(E_s), \quad SA = \sqrt{(\epsilon_0 - \epsilon_s)^2 + (A_0 - A_s)^2}$$

En cualquiera de los casos anteriores, el ángulo de separación exacto puede calcularse por un método iterativo, aumentando o reduciendo gradualmente ϵ_s hasta hallar un valor mínimo de SA .

Si el cálculo se hace en el supuesto de que $h_1 = 0$, véase la nota 2. El resultado del cálculo sirve para verificar si se cumple o no la Recomendación UIT-R SF.406.

Nota 1 – La curvatura atmosférica (grados) puede calcularse mediante las fórmulas siguientes:

$$\begin{aligned} \tau_{\max}(\epsilon, h) &= 1/[0,7885809 + 0,175963 h + 0,0251620 h^2 \\ &\quad + \epsilon(0,549056 + 0,0744484 h + 0,0101650 h^2) \\ &\quad + \epsilon^2(0,0187029 + 0,0143814 h)] \\ \tau_{\min}(\epsilon, h) &= 1/[1,755698 + 0,313461 h \\ &\quad + \epsilon(0,815022 + 0,109154 h) \\ &\quad + \epsilon^2(0,0295668 + 0,0185682 h)] \end{aligned}$$

siendo h la altura de la antena (km) de la estación sobre el nivel del mar.

Las fórmulas anteriores representan una aproximación dentro de las gamas $\epsilon_m \leq \epsilon \leq 8^\circ$ y $0 \leq h \leq 4$ km, en donde ϵ_m se calcula por la ecuación de la nota 2 con la condición $h_1 = 0$. Con el algoritmo descrito en el presente anexo, las fórmulas anteriores sólo se aplican cuando $\epsilon \geq \epsilon_m$.

Nota 2 – Cuando el horizonte local es un terreno llano o el mar, ϵ_m viene dado por:

$$\epsilon_m = - \arccos \left[\frac{R + h_1}{R + h} \cdot \frac{1 + N_0 \cdot 10^{-6} (1 + \Delta N / N_0)^{h_1}}{1 + N_0 \cdot 10^{-6} (1 + \Delta N / N_0)^h} \right]$$

siendo:

h : altura de la antena de la estación sobre el nivel del mar (km)

h_1 : altitud del horizonte local (km) ($h \geq h_1$)

R : el radio terrestre, que se supone igual a 6 370 km.

ϵ_{m1} es el ángulo de elevación correspondiente a la curvatura atmosférica máxima ($N_0 = 400$ y $\Delta N = -68$), y ϵ_{m2} es el correspondiente a la curvatura mínima ($N_0 = 250$ y $\Delta N = -30$). Conviene señalar que $\epsilon_{m1} \geq \epsilon_{m2}$.

En la práctica puede resultar engorroso calcular los valores exactos de ϵ_{m1} y ϵ_{m2} teniendo en cuenta la forma complicada del horizonte local. En tal caso, quizás sea más sencillo estimar los valores de ϵ_{m1} y ϵ_{m2} utilizando la fórmula anterior, en la hipótesis de $h_1 = 0$. Si el cálculo basado en esta hipótesis arroja un ángulo de separación de por lo menos B grados, tal conclusión es correcta incluso cuando el horizonte local tiene una forma complicada. Si el resultado es un ángulo de separación de menos de B grados, habrá que repetir el cálculo utilizando los valores reales de ϵ_{m1} y ϵ_{m2} .

Nota 3 – Esta fórmula puede obtenerse de la siguiente manera:

Se parte de la hipótesis de que los parámetros de una estación de un sistema de relevadores radioeléctricos son los siguientes:

– latitud L (en valor absoluto);

- acimut del haz principal de la antena A (medido en el sentido de las agujas del reloj, desde el Sur en el hemisferio norte y desde el Norte en el hemisferio sur);
- ángulo de elevación del haz principal de la antena E (después de tener en cuenta los efectos de la refracción).

Para una estación de un sistema de relevadores radioeléctricos en el hemisferio Norte, el cálculo se efectuará como sigue:

La trayectoria del haz principal de la antena del sistema de relevadores radioeléctricos puede representarse en el espacio tridimensional mediante las siguientes ecuaciones:

$$x = R \cos L + u (\sin E \cdot \cos L + \cos E \cdot \sin L \cdot \cos A) \quad (17)$$

$$y = -u \cdot \cos E \cdot \sin A \quad (18)$$

$$z = R \sin L + u (\sin E \cdot \sin L - \cos E \cdot \cos L \cdot \cos A) \quad (19)$$

en donde R es el radio terrestre y se supone que la longitud de la estación del sistema de relevadores radioeléctricos es cero (está en el plano $x - z$). Combinando las anteriores ecuaciones, se obtiene la siguiente fórmula:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 + u^2 + 2Ru \cdot \sin E \quad (20)$$

El haz principal de la antena de un sistema de relevadores radioeléctricos intersecta la superficie de una esfera de radio igual al de la órbita cuando $x^2 + y^2 + z^2 = K^2 R^2$ (en donde K es la relación radio de la órbita/radio terrestre, hipotéticamente 6,63), esto es:

$$u/R = \sqrt{K^2 - \cos^2 E} - \sin E \quad (21)$$

El ángulo de separación S puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$z = K R \sin S \quad (22)$$

En consecuencia:

$$\sin S = \frac{1}{K} \left[\sin L + \left(\sqrt{K^2 - \cos^2 E} - \sin E \right) (\sin E \cdot \sin L - \cos E \cdot \cos L \cdot \cos A) \right] \quad (23)$$

siendo S positivo si el eje del haz de la antena está por encima de la órbita. Esta fórmula se puede expresar también de la siguiente manera:

$$F = \arccos (K^{-1} \cos E)$$

$$\sin S = \sin L \cdot \cos (F - E) - \cos L \cdot \sin (F - E) \cdot \cos A \quad (24)$$

Cuando la estación está ubicada en el hemisferio Sur, las ecuaciones (17) a (19) se expresan de diferente manera, pero los resultados de las ecuaciones (23) y (24) son idénticos.

Conviene señalar que, cuando S es cero, la ecuación (24) anterior es equivalente a la ecuación (8) del anexo 1.

Nota 4 – En muchas aplicaciones de los cálculos anteriores, el ángulo de separación SA entre el haz principal y la dirección de elevación ϵ y acimut A se calcula de la siguiente manera:

$$SA = \sqrt{(\epsilon - \epsilon_0)^2 + (A - A_0)^2}$$

En realidad, esta fórmula es aproximativa. La fórmula exacta es:

$$SA = 2 \cdot \arcsin \sqrt{\sin^2 \Delta \epsilon + \cos \epsilon \cdot \cos \epsilon_0 \cdot \sin^2 \Delta A}$$

donde:

$$\Delta \epsilon = (\epsilon - \epsilon_0)/2 \quad \text{y} \quad \Delta A = (A - A_0)/2.$$

No obstante, la fórmula aproximativa da valores suficientemente precisos siempre que $|\epsilon|$, $|\epsilon_0|$, $|\Delta \epsilon|$ y $|\Delta A|$ sean relativamente pequeños.

Nota 5 – En el apéndice 1 se reproduce un programa informático para calcular ángulos de separación basado en el presente anexo.

APÉNDICE I

AL ANEXO 2

```

1000 ' SANGLE-A.BAS
1010 '*****
1020 '* Separation Angles between *
1030 '* radio-relay antenna beams and *
1040 '* the geostationary-satellite orbit *
1050 '*****
1060 SCREEN 0: WIDTH 80: CLS
1070 '----- Function definition -----
1080 DEF FNTMAX (E) = DR / (.7885809 + .175963 * H0 + .025162 * H0 ^ 2 +
E * RD * (.549056 + .0744484 * H0 + .010165 * H0 ^ 2) +
(E * RD) ^ 2 * (.0187029 + .0143814 * H0))
1090 DEF FNTMIN (E) = DR / (1.755698 + .313461 * H0 +
E * RD * (.815022 + .109154 * H0) +
(E * RD) ^ 2 * (.0295668 + .0185682 * H0))
1100 DEF FNASIN (X) = ATN (X / SQRT (-X * X + 1))
1110 DEF FNACOS (X) = -ATN (X / SQRT (-X * X + 1)) + PI / 2
1120 DEF FNF (E) = FNACOS (1 / K * COS (E))
1130 DEF FNS (A, E) = FNASIN (SINL * COS (FNF (E) - E) -
COSL * SIN(FNF(E) - E) * COS (A))
1140 DEF FNC (E) = FNACOS (TANL / TAN (FNF (E) - E))
1150 '-----
1160 ' PI : circular constant
1170 ' RD : radian to degree
1180 ' DR : degree to radian
1190 ' F : transmitter frequency
1200 ' BD : separation angle to be avoided in degree
1210 ' LD,LM,LS : latitude of the station in degrees,minutes,seconds
1220 ' PT : allowable e.i.r.p value
1230 '----- Parameter input -----
1240 PI = 4 * ATN(1): RD = 180 / PI: DR = PI / 180
1250 PRINT "Do you want print output on printer?(YIN)"
1260 A$ = INKEY$: IF A$ = "" THEN 1260
1270 IF A$ = "Y" OR A$ "y" THEN IPRT = 1 ELSE IPRT = 0: GOTO 1320
1280 OPEN "LPT1:" FOR OUTPUT AS #1
1290 PRINT #1, STRING$(70, "-")
1300 PRINT #1, "F(GHz) Latitude A0(°) E0(°) H0(m) H1(m) ZONE "
SA(°) EIRP(dBW)"
1310 PRINT #1, STRING$(70, "-")
1320 CLS : INPUT "F : frequency (GHz) "; F
1330 IF F < 1 OR F > 15 THEN PRINT "1<=F<=15": GOTO 1320
1340 IF F <= 10 THEN BD = 2 ELSE BD = 1.5
1350 B = BD * DR
1360 INPUT "L : latitude (°, ', ") "; LD, LM, LS
1370 L = ABS((LD + LM / 60 + LS / 3600) * DR)
1380 SINL = SIN(L): COSL = COS(L): TANL = SINL / COSL
1390 INPUT "A0: antenna azimuth (°) "; A0D: A0 = A0D * DR
1400 INPUT "E0: antenna elevation (°) "; E0D: E0 = E0D * DR
1410 INPUT "H0: station height (m) "; H0: H0 = H0 / 1000
1420 INPUT "H1: horizon height (m) "; H1: H1 = H1 / 1000
1430 IF H1 > H0 THEN PRINT "H1<=H0": GOTO 1420
1440 '----- Call subroutine -----
1450 GOSUB 2000
1460 '----- Print result -----
1470 CLS : PRINT STRING$(70, "-")

```

```

1480 PRINT USING "F : frequency          ##.# (GHz) "; F
1490 PRINT USING "L : latitude          #####°##'##'"; LD; LM; LS
1500 PRINT USING "A0: antenna azimuth   #####.# (°) "; A0D
1510 PRINT USING "E0: antenna elevation  ##.# (°) "; E0D
1520 PRINT USING "H0: station height     ##### (m) "; H0 * 1000
1530 PRINT USING "H1: horizon height     ##### (m) "; H1 * 1000
1540 PRINT "Separation angle should be at least"; BD; "degrees."
1550 PRINT STRING$(70, "-")
1560 PRINT " The main beam is in "; C$; "."
1570 IF KF < > 3 THEN PRINT "The separation angle is";
1580 IF KF = 2 THEN PRINT USING "at least##.# degrees."; SA * RD
1590 IF KF = 1 THEN PRINT "at least"; BD; "degrees."
1600 IF KF = 0 THEN PRINT "zero."
1610 IF KF < 0 THEN PRINT "less than"; BD; "degrees."
1620 IF KF = -2 THEN PRINT "If the local horizon is not flat,"
PRINT "further investigation should be carried out."
1630 IF KF = 3 THEN PRINT "You can't see orbit from your latitude."
1640 IF SA > 90 * DR OR KF = 3 OR KF = 2 THEN GOTO 1660
1650 PRINT USING "Actual separation angle can be estimated
as ##.### degrees."; SA * RD
1660 '----- DETERMINATION OF EIRP -----
1670 IF 10 < F THEN PT = 55: GOTO 1710
1680 IF SA <= .5 * DR THEN PT = 47: GOTO 1710
1690 IF SA >= 1.5 * DR THEN PT = 55: GOTO 1710
1700 PT = 47 + 8 * (SA * RD - .5)
1710 PRINT USING "Maximum e.i.r.p shall not exceed ##.### dBW."; PT
1720 PRINT STRING$(70, "-")
1730 IF IPRT = 0 THEN 1750
1740 PRINT #1, USING "##.# #####°##'##" #####.# ###.# ##### ##, #
\ \###.## ##.##"; F; LD; LM; LS; A0D; E0D; H0 * 1000;
H1 * 1000; C$; SA * RD; PT
1750 '-----end -----
1760 PRINT "Do you continue? (Y/N)"
1770 A$ = INKEY$: IF A$ = "" THEN 1770
1780 IF A$ = "N" OR A$ = "n" THEN CLOSE #1: STOP ELSE GOTO 1320
2000 '= = = = =subroutine = = = = =
2010 ' IN  B : separation angle to be avoided in radian
2020 '     L : latitude of station in radian
2030 '     A0 : azimuth of antenna main beam in radian
2040 '     E0 : elevation of antenna main beam in radian
2050 '     H0 : height of station in km
2060 '     H1 : height of horizon in km
2080 '     N0 : refractivity at sea level in N unit
2090 '     DN : refractivity difference at 1 km above sea level in N unit
2100 '     EM1: the local horizon at maximum atmospheric bending
2110 '     EM2: the local horizon at minimum atmospheric bending
2120 '     R : Earth radius
2130 '     K : orbit radius / Earth radius
2140 '     AL : equation (12)
2150 '
2160 ' OUT SA : estimated separation angle
2170 '     C$ : judged zone
2180 '     KF : decision flag
2190 '         3 .. extreme northern or southern latitude
2200 '         2 .. SA is at least SA
2210 '         1 .. SA is at least B
2220 '         0 .. SA is 0
2230 '        -1 .. SA is less than B

```

```

2240          -2 .. If horizon is flat then SA is less than B
2250 -----
2260 R = 6370: K = 6.63: T6 = .000001
2270 N0 = 400: DN = -68: GOSUB 2290: EM1 = EM
2280 N0 = 250: DN = -30: GOSUB 2290: EM2 = EM: GOTO 2310
2290 EMH = (R + H1) / (R + H0) * (1 + N0 * T6 * (1 + DN / N0) ^ H1) /
      (1 + N0 * T6 * (1 + DN / N0) ^ H0)
2300 IF EMH = 1 THEN EM = 0: RETURN ELSE EM = -FNACOS(EMH): RETURN
2310 AL = SINL / SQR ((1 - 1 / K ^ 2) ^ 2 + (SINL / K) ^ 2)
2330 '----- PRELIMINARY CALCULATION -----
2340 EEM1 = EM1 - FNTMAX(EM1): EEM2 = EM2 - FNTMIN(EM2)
2350 IF AL > 1 THEN C$ = "PRELIM": KF = 3: RETURN ELSE BE = SQR(1 - AL ^ 2)
2360 AM1 = FNC(EEM1) : AM2 = FNC(EEM2) DEM = EM1 - EM2: DAM = AM1 - AM2
2380 '----- PRELIMINARY ELIMINATION -----
2390 IF A0 >= AM1 + B THEN SA = A0 - AM1: C$ = "PRELIM": KF = 2: RETURN
2400 IF E0 <= EM2 - B THEN SA = EM2 - E0: C$ = "PRELIM": KF = 2: RETURN
2420 '----- CLASSIFICATION OF MAIN BEAM DIRECTIONS -----
2430 IF AM1 <= A0 AND EM1 <= E0 OR AM2 <= A0 AND A0 < AM1 AND DEM *
      (A0 - AM1) <= (E0 - EM1) * DAM OR A0 < AM2 AND EM2 <= E0
      GOTO 2450 ELSE 2520
2450 ' ----- main beam is on or above the horizon -----
2460 EMAX = E0 - FNTMAX(E0): SMAX = FNS(A0, EMAX)
2470 EMIN = E0 - FNTMIN(E0): SMIN = FNS(A0, EMIN)
2480 IF SMIN < 0 GOTO 2590
2490 IF SMAX <= 0 GOTO 2630
2500 IF AL * (A0 - AM1) < BE * (E0 - EM1) GOTO 2660 ELSE 2750
2520 ' ----- main beam is below the horizon -----
2530 IF AL * (A0 - AM2) < BE * (E0 - EM2) GOTO 2780
2540 IF DEM * (E0 - EM2) + DAM * (A0 - AM2) < 0 GOTO 2850
2550 IF DEM * (E0 - EM1) + DAM * (A0 - AM1) < 0 GOTO 2880 ELSE 2920
2570 '----- PRELIMINARY DETERMINATION -----
2590 ' ----- ZONE 1 -----
2600 E1 = E0 + AL * B: A1 = A0 + BE * B: EE1 = E1 - FNTMIN(E1)
      S1 = FNS(A1, EE1)
2610 SA = B * SMIN / (SMIN - S1): IF SA > 1 THEN SA = - SMIN
2615 C$ = "ZONE 1": ES = E0 + AL * SA: GOTO 2950
2630 ' ----- ZONE 2 -----
2640 SA = 0: C$ = "ZONE 2": KF = 0: RETURN
2660 ----- ZONE 3 -----
2670 E3 = E0 - AL * B: A3 = A0 - BE * B: C$ = "ZONE 3"
      IF E3 < EM1 GOTO 2710
2680 EE3 = E3 - FNTMAX(E3): S3 = FNS(A3, EE3)
2690 SA = B * SMAX / (SMAX - S3): ES = E0 - AL * SA
      IF ES < EM1 THEN ES = EM1
2700 GOTO 3200
2710 A31 = A0 - (E0 - EM1) * BE / AL: S31 = FNS(A31, EEM1)
2720 IF ABS (SMAX - S31) <= .001 * DR THEN SA = SMAX
      ELSE SA (E0 - EM1) / AL * SMAX / (SMAX - S31)
2730 ES = E0 - AL * SA: GOTO 3200
2750 ----- ZONE 4 -----
2760 SA = SQR((EM1 - E0) ^ 2 + (AM1 - A0) ^ 2): C$ = "ZONE 4": GOTO 3450
2780 ' ----- ZONE 5 -----
2790 A5 = A0 + (EM2 - E0) * BE / AL: S5 = FNS(A5, EEM2)
2800 E51 = EM2 + AL * B: A51 = A5 + BE * B
2810 EE51 = E51 - FNTMIN(E51): S51 = FNS(A51, EE51)
2820 SA = (EM2 - E0) / AL + B * S5 / (S5 - S51)
      IF SA > 1 THEN SA = (EM2 - E0) / AL - S5
2830 ES = E0 + AL * SA: C$ = "ZONE 5": GOTO 2950

```

```

2850 ' ----- ZONE 6 -----
2860 SA = SQR ((E0 - EM2) ^ 2 + (A0 - AM2) ^ 2): ES = EM2
    C$ = "ZONE 6": GOTO 2950
2880 ----- ZONE 7 -----
2890 SA = (DEM * (A0 - AM1) - (E0 - EM1) * DAM) / SQR(DEM ^ 2 + DAM ^ 2)
2900 C$ = "ZONE 7": GOTO 3450
2920 ' ----- ZONE 8 -----
2930 SA = SQR((E0 - EM1) ^ 2 + (A0 - AM1) ^ 2): C$ = "ZONE 8": GOTO 3450
2950 ' ----- DETAILED CALCULATIONS FOR ZONES 1, 5 AND 6-----
2970 ' ----- STEP 1 -----
2980 IF SA >= 1.5 * B GOTO 3450 ELSE DE = BE * B / 60
2990 EES = ES - FNTMIN(ES)
3000 IF FNF(EES) - EES < L THEN ES = ES - DE: GOTO 2990
3010 AS=FNC(EES):SA0=SQR((ES-E0)^2+(AS-A0)^2)
3020 ES1 = ES + DE: EES = ES1 - FNTMIN(ES1)
3030 IF FNF(EES) - EES < L THEN ES1 = ES: SA = SA0: GOTO 3130
3040 AS=FNC(EES):SA=SQR((ES1-E0)^2+(AS-A0)^2)
3050 IF SA > SA0 THEN ES1 = ES: SA = SA0: GOTO 3130
3070 ' ----- STEP 2 -----
3080 ES1 = ES1 + DE: EES = ES1 - FNTMIN(ES1)
3090 IF FNF(EES) - EES < L GOTO 3450
3100 AS=FNC(EES):SA1=SQR((ES1-E0)^2+(AS-A0)^2)
3110 IF SA1 < SA THEN SA = SA1: GOTO 3080 ELSE 3450
3130 '----- STEP 3 -----
3140 IF ES1 <= EM2 GOTO 3450
3150 ES1 = ES1 - DE: IF ES1 < EM2 THEN ES1 = EM2
3160 EES=ES1-FNTMIN(ES1):AS=FNC(EES)
3170 SA1=SQR((ES1-E0)^2+(AS-A0)^2)
3180 IF SA1 < SA THEN SA = SA1: GOTO 3140 ELSE 3450
3200 ' ----- DETAILED CALCULATION FOR ZONE 3 -----
3220 ' ----- STEP 1 -----
3230 IF SA >= 1.5 * B GOTO 3450 ELSE DE = BE * B / 60
3240 EES = ES - FNTMAX(ES)
3250 IF FNF(EES) - EES < L THEN ES = ES - DE: GOTO 3240
3260 AS=FNC(EES):SA0=SQR((ES-E0)^2+(AS-A0)^2)
3270 ES1 = ES + DE: EES = ES1 - FNTMAX(ES1)
3280 IF FNF(EES) - EES < L THEN ES1 = ES: SA = SA0: GOTO 3380
3290 AS=FNC(EES):SA=SQR((ES1-E0)^2+(AS-A0)^2)
3300 IF SA > SA0 THEN ES1 = ES: SA = SA0: GOTO 3380
3320 '----- STEP 2 -----
3330 ES1 = ES1 + DE: EES = ES1 - FNTMAX(ES1)
3340 IF FNF(EES) - EES < L GOTO 3450
3350 AS=FNC(EES):SA1=SQR((ES1-E0)^2+(AS-A0)^2)
3360 IF SA1 < SA THEN SA = SA1: GOTO 3330 ELSE 3450
3380 '----- STEP 3 -----
3390 IF ES1 <= EM1 GOTO 3450
3400 ES1 = ES1 - DE: IF ES1 < EM1 THEN ES1 = EM1
3410 EES=ES1-FNTMAX(ES1):AS=FNC(EES)
3420 SA1=SQR((ES1-E0)^2+(AS-A0)^2)
3430 IF SA1 < SA THEN SA = SA1: GOTO 3390
3450 '----- JUDGMENT -----
3460 IF SA >= B THEN KF = 1: RETURN ELSE KF = -2: RETURN

```
