

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R SF.765-1
(02/2003)

Intersección de haces de antenas de sistemas de relevadores radioeléctricos con las órbitas de las estaciones espaciales del servicio fijo por satélite

Serie SF
**Compartición de frecuencias y coordinación
entre los sistemas del servicio fijo
por satélite y del servicio fijo**



Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en el Anexo 1 a la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

| Series | Título |
|------------|---|
| BO | Distribución por satélite |
| BR | Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión |
| BS | Servicio de radiodifusión sonora |
| BT | Servicio de radiodifusión (televisión) |
| F | Servicio fijo |
| M | Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos |
| P | Propagación de las ondas radioeléctricas |
| RA | Radio astronomía |
| RS | Sistemas de detección a distancia |
| S | Servicio fijo por satélite |
| SA | Aplicaciones espaciales y meteorología |
| SF | Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo |
| SM | Gestión del espectro |
| SNG | Periodismo electrónico por satélite |
| TF | Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias |
| V | Vocabulario y cuestiones afines |

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2011

© UIT 2011

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R SF.765-1*

Intersección de haces de antenas de sistemas de relevadores radioeléctricos con las órbitas de las estaciones espaciales del servicio fijo por satélite

(1992-2002)

Cometido

En esta Recomendación se discuten varios aspectos de la intersección de haces de antenas de sistemas de relevadores radioeléctricos con las órbitas de las estaciones espaciales del servicio fijo por satélite y, en particular, se presenta en su Anexo 2 un método analítico para calcular los ángulos de separación entre los haces de antenas de sistemas de relevadores radioeléctricos y la órbita de los satélites geoestacionarios. Esta Recomendación revisada amplía la aplicabilidad del Anexo 2 de modo que también sea aplicable a las antenas de sistemas de relevadores radioeléctricos con ángulos de elevación muy altos. En el Apéndice 1 al Anexo 2 se facilita el código para un programa informático en lenguaje C.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que, para examinar la conformidad de las estaciones del servicio fijo inalámbrico que funcionan por debajo de 15 GHz con las disposiciones pertinentes del Reglamento de Radiocomunicaciones, es preciso calcular el ángulo entre la dirección del haz de la antena del relevador radioeléctrico y la dirección hacia la órbita de los satélites geoestacionarios;
- b) 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 fijos inalámbricos;
- 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 radioeléctrico y la dirección hacia la órbita de los satélites geoestacionarios.

NOTA 1 – Conviene que los receptores de relevadores radioeléctricos de alta sensibilidad que funcionan en bandas comprendidas entre 1 y 15 GHz compartidas con sistemas espaciales (espacio-Tierra) eviten, para su propia protección, dirigir sus antenas hacia la órbita de los satélites geoestacionarios. Para ello también puede utilizarse el método de la presente Recomendación.

* La Comisión de Estudio 5 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2009 de conformidad con la Resolución UIT-R 1.

Anexo 1

Inserción de haces de antenas de sistemas de relevadores radioeléctricos 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 fijos inalámbricos 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.

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 fijos inalámbricos 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 las disposiciones pertinentes del RR, 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 sistemas fijos inalámbricos 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 fijos inalámbricos terrenales

Los sistemas fijos inalámbricos 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:

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

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

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:

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

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 rad, 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:

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

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:

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

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 las disposiciones pertinentes del RR, 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:

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

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 geoestacionario. 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 las disposiciones pertinentes del RR 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 τ . 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:

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

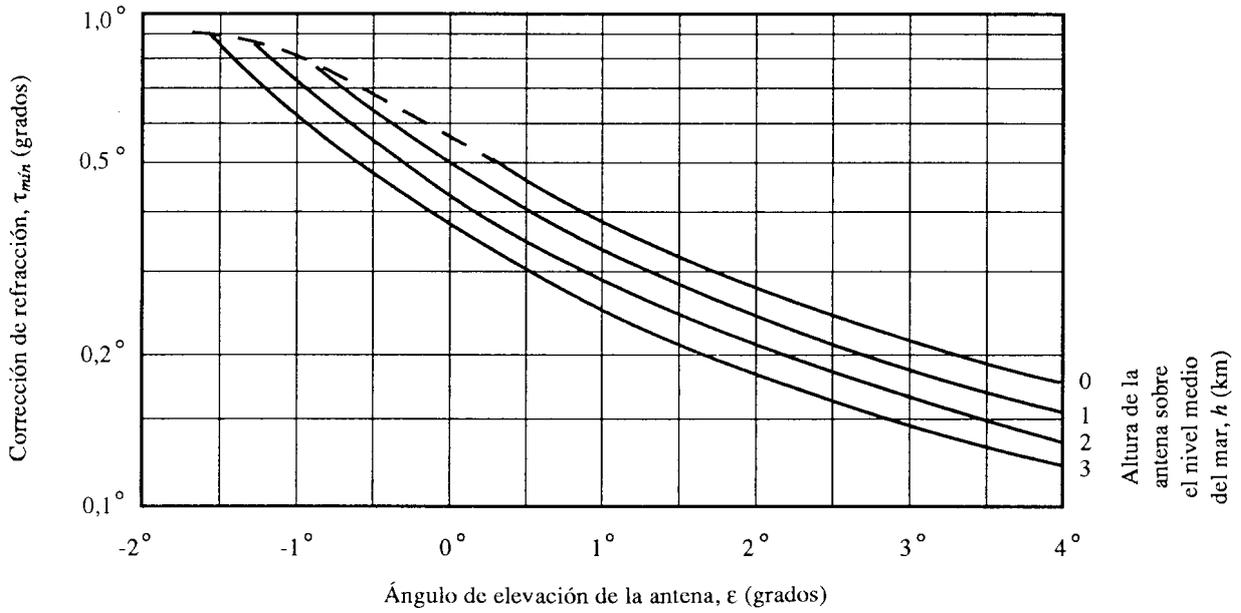
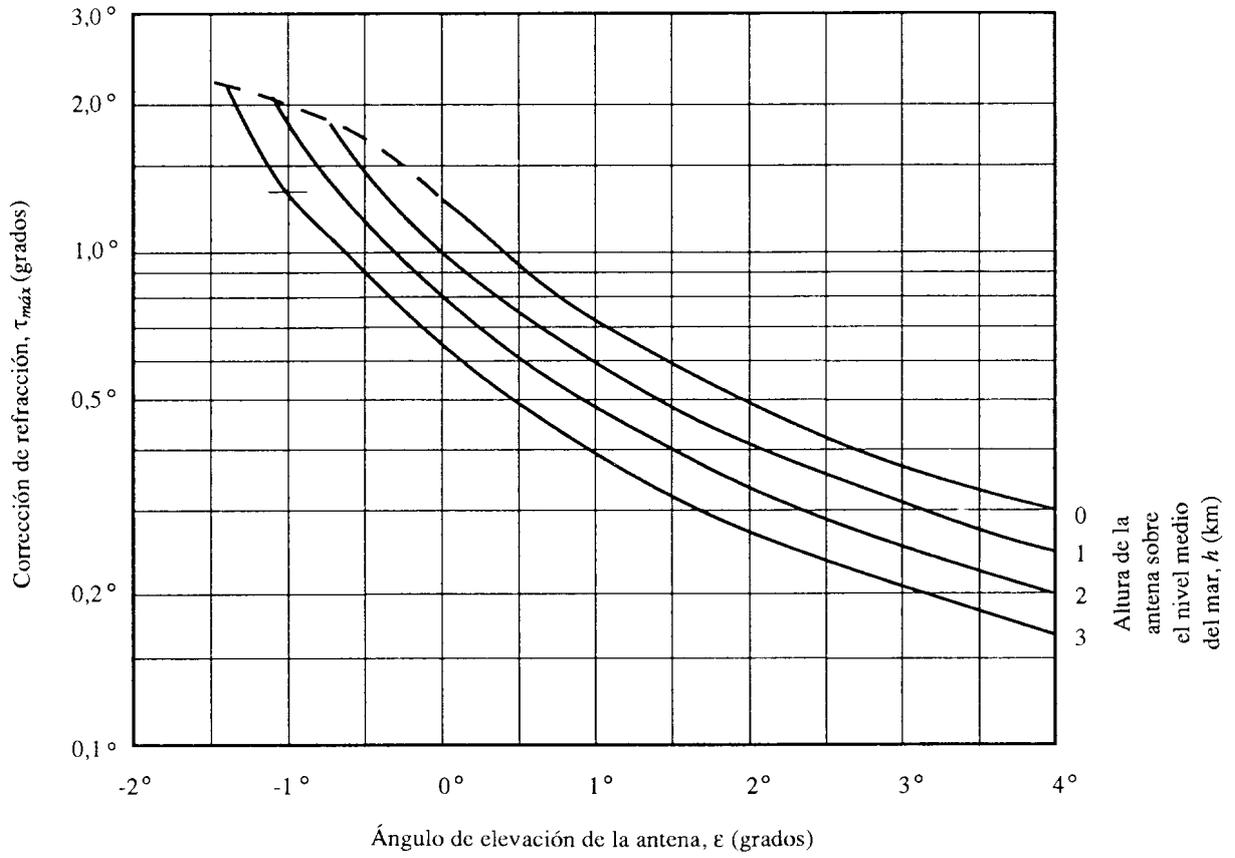
donde:

$$\begin{aligned} n(r) &= 1 + a \cdot \exp[-b(r - r_0)] \\ r_0 &: \text{radio de la Tierra (6 370 km)} \\ r_1 &= r_0 + h \text{ (} h \text{: altura de la estación)} \\ \varepsilon_1 &: \text{ángulo de elevación en la estación} \\ n_1 &: \text{coíndice de refracción a la altura de la estación} \\ n_2 &: \text{coíndice de refracción en la órbita} \\ a &= N_0 \times 10^{-6} \\ b &= \ln[N_0 / (N_0 + \Delta N)] \\ N_0 &= 400 \text{ y } \Delta N = -68 \text{ para curvatura máxima} \\ N_0 &= 250 \text{ y } \Delta N = -30 \text{ para curvatura mínima.} \end{aligned}$$

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

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

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

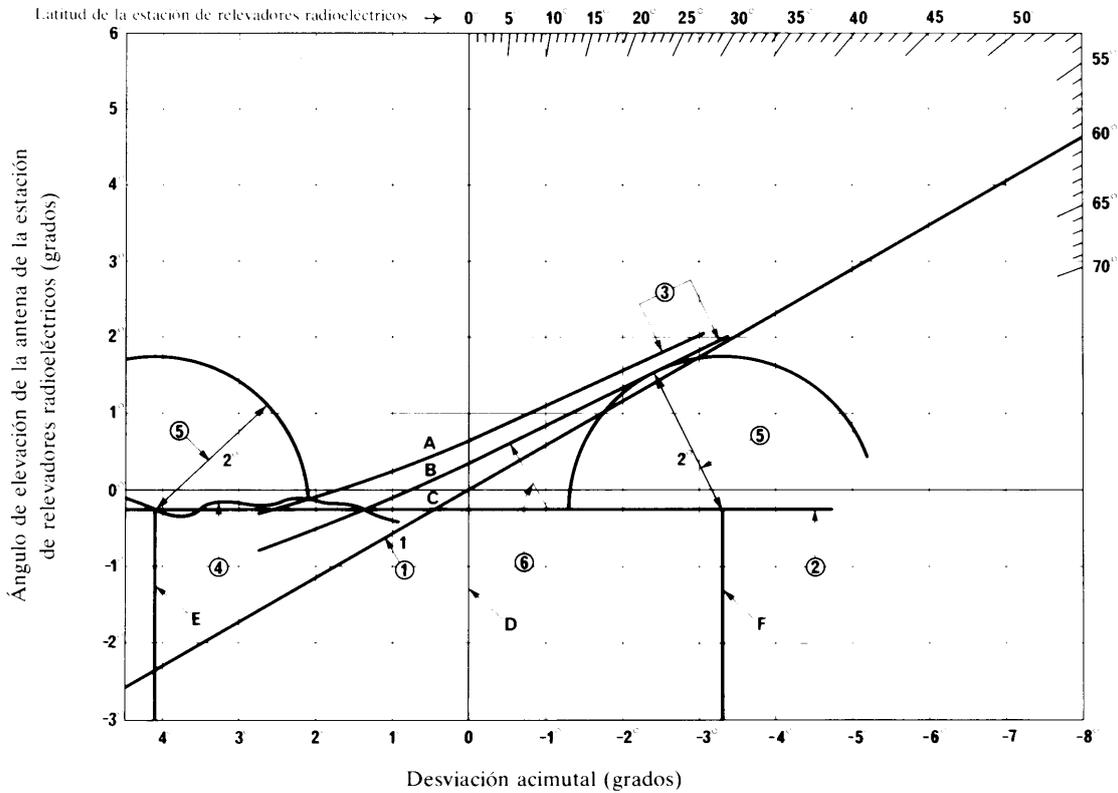
5.2 Utilización de un medio gráfico para determinar los acimutes que hay que evitar

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 (véase la 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.

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°

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

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

D02-sc

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 $\tau_{m\acute{a}x}()$ o $\tau_{m\acute{i}n}()$ de la Nota 2 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 e) 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).

De modo similar, en la recta que representa el ángulo de elevación constante de la antena, búsquese 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 las disposiciones pertinentes del RR.

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.

Anexo 2

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) (véase la Nota 1)
- 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 (véase la Nota 2)
- $\tau_{m\acute{i}n}(\epsilon)$: curvatura atmosférica mínima, correspondiente al ángulo de elevación ϵ (véase la Nota 2)
- 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 $A_0 + B$ (véase la Nota 3)
- 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 $A_0 + B$ (véase la Nota 3).

Además se definen las siguientes ecuaciones:

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

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

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

siendo $S(A, E)$ el ángulo (grados) entre el haz y la órbita (véase la Nota 4)

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

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 ecuaciones (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 $\arcsen \alpha$ 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 .

$$SAF(A, E) = \arccos[\cos \varepsilon_0 \cdot \cos E \cdot \cos(A - A_0) + \text{sen } \varepsilon_0 \cdot \text{sen } E] \quad (17)$$

donde $SAF(A, E)$ es el ángulo de separación (grados) entre el eje del haz principal de la antena y la dirección del azimut A y la elevación E .

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 sea 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. $OSG_{m\acute{a}x}$ y $OSG_{m\acute{i}n}$ son las órbitas aparentes de los satélites geoestacionarios con curvatura atmosférica máxima y mínima, respectivamente. $HOR_{m\acute{a}x}$ y $HOR_{m\acute{i}n}$ son los horizontes aparentes con curvatura atmosférica máxima y mínima respectivamente. H_1 es el punto de cruce de $OSG_{m\acute{a}x}$ y $HOR_{m\acute{a}x}$ y H_2 es el punto de cruce de $OSG_{m\acute{i}n}$ y $HOR_{m\acute{i}n}$. 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:

$$\begin{aligned} E_{m1} &= \varepsilon_{m1} - \tau_{m\acute{a}x}(\varepsilon_{m1}), & A_{m1} &= C(E_{m1}) \\ E_{m2} &= \varepsilon_{m2} - \tau_{m\acute{i}n}(\varepsilon_{m2}), & A_{m2} &= C(E_{m2}) \end{aligned}$$

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

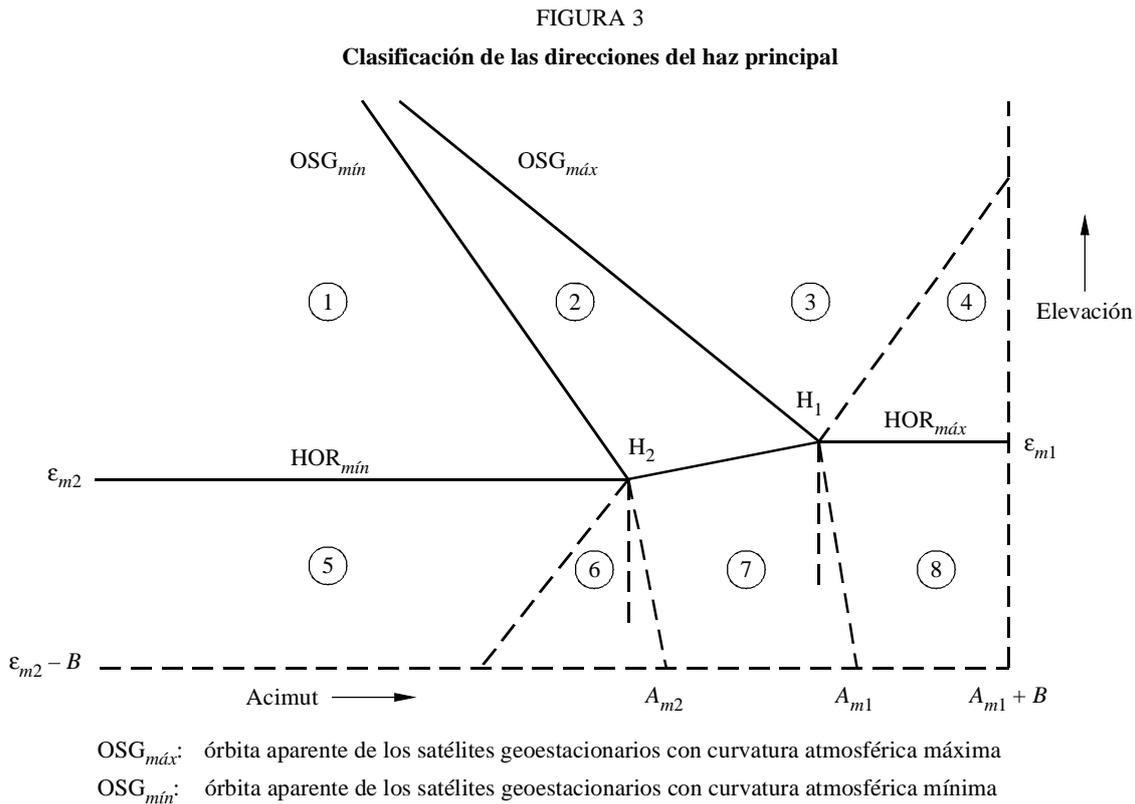
Es preciso clasificar las direcciones de los haces principales en varios casos, ya que la Fig. 3 es relativamente complicada.

2.1 Eliminación preliminar

En los casos siguientes puede concluirse fácilmente que el ángulo de separación es de por lo menos B grados (véase la Nota 1).

- 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.



0765-03

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 $\epsilon_{m2} \leq \epsilon_0$

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):

- Zona 1: $S_{mín} < 0$
 Zona 2: $S_{máx} \leq 0$ y $S_{mín} \geq 0$
 Zona 3: $S_{máx} > 0$ y $\alpha (A_0 - A_{m1}) < \beta (\epsilon_0 - \epsilon_{m1})$
 Zona 4: $S_{máx} > 0$ y $\alpha (A_0 - A_{m1}) \geq \beta (\epsilon_0 - \epsilon_{m1})$

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

$$\begin{aligned} E_{m\acute{a}x} &= \varepsilon_0 - \tau_{m\acute{a}x}(\varepsilon_0), & S_{m\acute{a}x} &= S(A_0, E_{m\acute{a}x}) \\ E_{m\acute{i}n} &= \varepsilon_0 - \tau_{m\acute{i}n}(\varepsilon_0), & S_{m\acute{i}n} &= S(A_0, E_{m\acute{i}n}) \end{aligned}$$

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):

$$\begin{aligned} \text{Zona 5:} & \quad \alpha (A_0 - A_{m2}) < \beta (\varepsilon_0 - \varepsilon_{m2}) \\ \text{Zona 6:} & \quad \alpha (A_0 - A_{m2}) \geq \beta (\varepsilon_0 - \varepsilon_{m2}) \text{ y} \\ & \quad (\varepsilon_{m1} - \varepsilon_{m2}) (\varepsilon_0 - \varepsilon_{m2}) + (A_{m1} - A_{m2}) (A_0 - A_{m2}) < 0 \\ \text{Zona 7:} & \quad (\varepsilon_{m1} - \varepsilon_{m2}) (\varepsilon_0 - \varepsilon_{m2}) + (A_{m1} - A_{m2}) (A_0 - A_{m2}) \geq 0 \text{ y} \\ & \quad (\varepsilon_{m1} - \varepsilon_{m2}) (\varepsilon_0 - \varepsilon_{m1}) + (A_{m1} - A_{m2}) (A_0 - A_{m1}) < 0 \\ \text{Zona 8:} & \quad (\varepsilon_{m1} - \varepsilon_{m2}) (\varepsilon_0 - \varepsilon_{m1}) + (A_{m1} - A_{m2}) (A_0 - A_{m1}) \geq 0 \end{aligned}$$

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. Si $\varepsilon_0 < 0,3E_T$ (véase la Nota 5 para el cálculo de E_T), 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 $E_1 = \varepsilon_1 - \tau_{m\acute{i}n}(\varepsilon_1)$ y $S_1 = S(A_1, E_1)$

Una estimación aproximada del ángulo de separación es:

$$SA = B \cdot S_{m\acute{i}n} / (S_{m\acute{i}n} - S_1) \quad \text{grados}$$

Esto es adecuado cuando $|S_{m\acute{i}n}|$ es pequeño, pero cuando sea grande, esta fórmula puede no ser exacta. Por lo tanto, cuando $|S_{m\acute{i}n}| > 20^\circ$, se debera utilizar:

$$SA = |S_{m\acute{i}n}| \quad \text{grados}$$

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

Por otra parte, si $\varepsilon_0 \geq 0,3E_T$, comenzando por $\varepsilon_s = E_T$, se calcula SA para valores más pequeños de ε_s con pasos de 1° mediante la ecuación siguiente y determinando el valor de ε_s que minimiza SA :

$$E_s = \varepsilon_s - \tau_{m\acute{i}n}(\varepsilon_s), \quad A_s = C(E_s), \quad SA = SAF(A_s, \varepsilon_s)$$

Para un cálculo más exacto se pasa al ó 4.

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. Si $\varepsilon_0 < 0,3E_T$ (véase la Nota 5 para el cálculo de E_T), 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 $\epsilon_3 \geq \epsilon_{m1}$, se calcula:

$$E_3 = \epsilon_3 - \tau_{m\acute{a}x}(\epsilon_3) \quad \text{y} \quad S_3 = S(A_3, E_3)$$

Una estimación aproximada del ángulo de separación es:

$$SA = B \cdot S_{m\acute{a}x} / (S_{m\acute{a}x} - S_3) \quad \text{grados}$$

Esto es adecuado cuando $S_{m\acute{a}x}$ es pequeño, pero cuando sea grande, esta fórmula puede no ser exacta. Por lo tanto, cuando $S_{m\acute{a}x} > 20^\circ$, se debería utilizar:

$$SA = S_{m\acute{a}x} \quad \text{grados}$$

Se calcula $\epsilon_s = \epsilon_0 - \alpha \cdot SA$ (si $\epsilon_s < \epsilon_{m1}$, se hace $\epsilon_s = \epsilon_{m1}$), y se pasa al § 4 para un cálculo más exacto.

Si $\epsilon_3 < \epsilon_{m1}$, se calcula:

$$A_{31} = A_0 - (\epsilon_0 - \epsilon_{m1}) \cdot \beta / \alpha$$

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 $HOR_{m\acute{a}x}$.

Una estimación aproximada del ángulo de separación es:

$$SA = [(\epsilon_0 - \epsilon_{m1}) / \alpha] \cdot S_{m\acute{a}x} / (S_{m\acute{a}x} - S_{31}) \quad \text{grados}$$

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 $S_{m\acute{a}x}$. Por tanto, esta fórmula debe aplicarse cuando $|S_{m\acute{a}x} - S_{31}| > \Delta$ grados. Si no, una estimación razonable del ángulo de separación es $SA = S_{m\acute{a}x}$ (grados). El valor de Δ es suficientemente pequeño, por ejemplo $0,001^\circ$.)

Se calcula $\epsilon_s = \epsilon_0 - \alpha \cdot SA$ y se pasa al § 4 para un cálculo más exacto.

Por otra parte, si $\epsilon_0 \geq 0,3E_T$, comenzando por $\epsilon_s = E_T$, se calcula SA para valores más pequeños de ϵ_s con pasos de 1° mediante la fórmula siguiente y determinando el valor de ϵ_s que minimiza SA :

$$E_s = \epsilon_s - \tau_{m\acute{a}x}(\epsilon_s), \quad A_s = C(E_s), \quad SA = SAF(A_s, \epsilon_s)$$

Para un cálculo más exacto se pasa al § 4.

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:

$$SA = SAF(A_{m1}, \epsilon_{m1}) \quad \text{grados}$$

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 $HOR_{mín}$, 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.

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

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:

$$SA = SAF(A_{m2}, \varepsilon_{m2}) \quad \text{grados}$$

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:

$$SA = SAF(A_{m1}, \varepsilon_{m1}) \quad \text{grados}$$

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 $SA \geq 2B$, puede decirse con seguridad que el ángulo de separación es de por lo menos B grados, y no hacen falta entonces más cálculos.

Si $SA < 2B$, 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 $OSG_{mín}$. El acimut A_s y el ángulo de separación SA correspondientes a ϵ_s vienen dados por:

$$E_s = \epsilon_s - \tau_{mín}(\epsilon_s), \quad A_s = C(E_s), \quad SA = SAF(A_s, \epsilon_s)$$

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

$$E_s = \epsilon_s - \tau_{máx}(\epsilon_s), \quad A_s = C(E_s), \quad SA = SAF(A_s, \epsilon_s)$$

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 3. El resultado del cálculo sirve para verificar si se cumplen o no las disposiciones pertinentes del RR.

NOTA 1 – En algunos casos puede ser conveniente calcular los valores exactos de los ángulos de separación para ángulos mayores de 2° . En tales casos, debe elegirse un valor mayor de B , siendo entonces exactos los ángulos de separación calculados para hasta $2B$ grados, a costa de requerir un tiempo de cálculo más prolongado. Por ejemplo, si B es 10° , los ángulos de separación calculados serán en general exactos para hasta 20° . A tal fin, cuando B sea mayor de 2° , se debe omitir la eliminación preliminar realizada en el § 2.1. Se recomienda que B no sea demasiado grande.

NOTA 2 – La curvatura atmosférica (grados) puede calcularse mediante las fórmulas siguientes:

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

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 3 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 3 – 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 : radio terrestre, que se supone igual a 6370 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 (véase la Nota 1), 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 (véase la Nota 1), habrá que repetir el cálculo utilizando los valores reales de ϵ_{m1} y ϵ_{m2} .

NOTA 4 – 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:

$$x = R \cos L + u (\sin E \cdot \cos L + \cos E \cdot \sin L \cdot \cos A) \quad (18)$$

$$y = -u \cdot \cos E \cdot \sin A \quad (19)$$

$$z = R \sin L + u (\sin E \cdot \sin L - \cos E \cdot \cos L \cdot \cos A) \quad (20)$$

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:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 + u^2 + 2Ru \cdot \sin E \quad (21)$$

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:

$$u / R = \sqrt{K^2 - \cos^2 E} - \sin E \quad (22)$$

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

$$z = K R \sin S \quad (23)$$

En consecuencia:

$$\sin S = \frac{1}{K} \left[\sin L + \left(\sqrt{K^2 - \cos^2 E} - \sin E \right) (\sin E \cdot \sin L - \cos E \cdot \cos L \cdot \cos A) \right] \quad (24)$$

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:

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

$$\sin S = \sin L \cdot \cos (F - E) - \cos L \cdot \sin (F - E) \cdot \cos A \quad (25)$$

Cuando la estación está ubicada en el Hemisferio Sur, las ecuaciones (18) a (20) se expresan de diferente manera, pero los resultados de las ecuaciones (24) y (25) son idénticos.

Conviene señalar que, cuando S es cero, la ecuación (25) anterior es equivalente a la ecuación (8) del Anexo 1.

NOTA 5 – E_T es el ángulo de elevación más elevado hacia la OSG desde la latitud L y viene dada por:

$$E_T = \arctg [(K \cos L - 1) / (K \sin L)] \quad (26)$$

NOTA 6 – En el Apéndice 1 se reproduce un programa informático para calcular ángulos de separación basado en el presente Anexo.

Apéndice 1 al Anexo 2

Programa informático para el cálculo de los ángulos de separación

```

/*****
/* sangle-a.c
/* Separation angles between radio-relay antenna beams and
/* the geostationary-satellite orbit
*****/

/*-- include files --*/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <error.h>
#include <string.h> /* for strcmp */

/* static */
#define PI 3.1415926 /* circular constant */
#define DR PI /180.0 /* degree to radian */
#define RD 180.0 / PI /* radian to degree */
#define K 6.63 /* orbit radius / earth radius */
static double SINL,COSL,TANL;
static double H0; /* height of station in km */
static double H1; /* height of horizon in km */
FILE* fp; /* Result File */

/* function */
*****/
/* module:fn_TMAX,fn_TMIN
/* function: calculate maximum/minimum atmospheric bending in radian
double fn_TMAX(double e)
{
    return (double)(DR / (.7885809 + .175963 * H0 + .025162 * H0 * H0
        + e * RD * (.549056 + .0744484 * H0 + .010165 * H0 * H0
        + e * RD * (.0187029 + .0143814 * H0)));
}
double fn_TMIN(double e)
{
    return (DR / (1.755698 + .313461 * H0 + e * RD * (.815022
        + .109154 * H0 + e * RD * (.0295668 + .0185682 * H0)));
}

```

```

/*****/
/* module:fn_F */
/* function: calculate auxiliary elevation angle */
double fn_F(double e)
{
    return ( acos( cos(e) / K ) );
}
/*****/
/* module:fn_S */
/* function: calculation angle between the beam and the orbit */
double fn_S(double a, double e)
{
    return (asin(SINL * cos(fn_F(e) - e)
        - COSL * sin( fn_F(e) - e ) * cos(a)));
}
/*****/
/* module:fn_C */
/* function: calculate azimuth of the orbit */
double fn_C(double e)
{
    return (double)(acos(TANL / tan( fn_F(e) - e )));
}
/*****/
/* module:fn_Em */
/* function: calculation elevation angle toward the local horizon */
double fn_Em(double r, double t6, double dn, double n0)
{
    double emh;
    emh = (r + H1) / (r + H0) * (1 + n0 * t6 * pow((1 + dn / n0),H1))
        / (1 + n0 * t6 * pow((1 + dn / n0),H0));
    if(emh == 1) return 0.0;
    else return (-1 * acos(emh));
}
/*****/
/* module: fn_ET */
/* function: calculate highest elevation angle of */
/* the geostationary-satellite orbit */

```

```

double fn_ET(double l)
{
    double et;
    if (l == 0)
        et = PI / 2.0 ;
    else
        et = atan(( K * cos(l) - 1) / (K * sin(l)));
    return et;
}

/*****
/* module: fn_SAF */
/* function: calculate separation angle */
double fn_SAF(double a, double e, double a0, double e0)
{
    return ( acos ( cos(e0) * cos(e) * cos(a - a0) + sin(e0) * sin(e) ) );
}

/*****
/* module: CalculationSub */
/* function: separation angle calculation */
/* in:    l :latitude of the station */
/*        b :separation angle to avoided */
/*        a0:azimuth of the antenna main beam */
/*        e0:elevation of the antenna main beam */
/*        nFlg: if this flg = 0, skip "preliminary elimination" */
/* out:   psa :separation angle */
/*        pstr:judged zone */
/*        pkf :decision flag */
/*        3:extreme northern or southern latitude */
/*        2:SA is at least SA */
/*        1:SA is at least B */
/*        0:SA is 0 */
/*        -1:SA is less than B */
/*        -2:If horizon is flat then SA is less than B */
/*****

int CalculationSub(double l, double b, double a0, double e0, double *psa, char* pstrC, int* pkf, int nFlg)
{
    double r; /* earth radius */
    double t6; /* */
    double n0; /* refractivity at sea level in N unit */
    double dn; /* refractivity difference at 1km above sea level in N unit */

```

```

double em1; /* the local horizon at maximum atmospheric bending */
double em2; /* the local horizon at minimum atmospheric bending */
double al; /* equation */
double am1,am2, dem, dam;
double be,emax,smax,emin,smin, e1,a1,ee1,s1,es,
      e3,a3,a31,s31,ee3,s3, a5,s5,e51,ee51,a51,s51,
      de,ees,as,sa0,es1,sa1;
double eem1, eem2;
double wkEs, wkEs_0, wkAs_0, wkSA_0, wkEs_1, wkAs_1, wkSA_1; /* for SAF */
/* constants init*/
r = 6370.0; t6 = .000001;
n0 = 400.0; dn = -68; em1 = fn_Em(r,t6,dn,n0);
n0 = 250.0; dn = -30; em2 = fn_Em(r,t6,dn,n0);
SINL = sin(l); COSL = cos(l); TANL = tan(l);
al = SINL / sqrt(pow((1 - 1 / (K * K)),2) + pow((SINL / K),2));
/* preliminary calculation */
eem1 = em1 - fn_TMAX(em1);
eem2 = em2 - fn_TMIN(em2);
if( al > 1.0 ) { printf(pstrC,"PRELIM"); *pkf = 3; return 1;}
else{be = sqrt(1 - al * al);}
am1 = fn_C(eem1); am2 = fn_C(eem2);
dem = em1 - em2; dam = am1 - am2;
/* preliminary elimination */
if(nFlg == 1){
  if( a0 >= am1 + b ) { *psa = a0 - am1; printf(pstrC,"PRELIM"); *pkf = 2; return 1;}
  if( e0 <= em2 - b ) { *psa = em2 - e0; printf(pstrC,"PRELIM"); *pkf = 2; return 1;}
}
/* classification of main beam direction */
if( (am1 <= a0 && em1 <= e0) ||
    (am2 <= a0 && a0 < am1 && dem * (a0 - am1) <= (e0 - em1) * dam ) ||
    (a0 < am2 && em2 <= e0)
  ){
  /* main beam is on or above the horizon */
  emax = e0 - fn_TMAX(e0); smax = fn_S(a0, emax);
  emin = e0 - fn_TMIN(e0); smin = fn_S(a0, emin);
  if( smin < 0 ) goto PROC_ZONE_1 ;
  if( smax <= 0 ) goto PROC_ZONE_2 ;
  if( al * (a0 - am1) < be * (e0 - em1) ) goto PROC_ZONE_3 ;
  else goto PROC_ZONE_4 ;
}

```

```

}else{
    /* main beam is below the horizon */
    if( al * (a0 - am2) < be * (e0 - em2)) goto PROC_ZONE_5 ;
    if( dem * (e0 - em2) + dam * (a0 - am2) < 0 ) goto PROC_ZONE_6 ;
    if( dem * (e0 - em1) + dam * (a0 - am1) < 0 ) goto PROC_ZONE_7 ;
    else goto PROC_ZONE_8 ;
}
/* preliminary determination */

```

PROC_ZONE_1:

```

if( e0 < .3 * fn_ET(l) ){
    e1 = e0 + al * b; a1 = a0 + be * b;
    ee1 = e1 - fn_TMIN(e1); s1 = fn_S(a1, ee1);
    *psa = b * smin / (smin - s1);
    if( fabs(smin) > 20.0 * DR) { *psa = fabs(smin); }
    es = e0 + al * (*psa);
}else{
    wkEs = fn_ET(l); wkEs_0 = wkEs - fn_TMIN(wkEs); es = wkEs;
    wkAs_0 = fn_C(wkEs_0); wkSA_0 = fn_SAF(wkAs_0, wkEs, a0, e0);
    do{
        wkEs = wkEs - 1.0 * DR; wkEs_1 = wkEs - fn_TMIN(wkEs);
        wkAs_1 = fn_C(wkEs_1); wkSA_1 = fn_SAF(wkAs_1, wkEs, a0, e0);
        if(wkSA_1 < wkSA_0){ wkSA_0 = wkSA_1; es = wkEs;}
    }while (wkSA_1 <= wkSA_0); *psa = wkSA_0;
}
sprintf(pstrC, "ZONE 1");
goto DETAIL_CALC_ZONE156 ;

```

PROC_ZONE_2:

```

*psa = 0; sprintf(pstrC, "ZONE 2"); *pkf = 0; return 1;

```

PROC_ZONE_3:

```

if( e0 < .3 * fn_ET(l) ){
    e3 = e0 - al * b; a3 = a0 - be * b; sprintf(pstrC, "ZONE 3");
    if (e3 < em1){
        a31 = a0 - (e0 - em1) * be / al;      s31 = fn_S(a31, eem1);
        if( fabs(smax - s31) <= .001 * DR ) *psa = smax;
        else *psa = (e0 - em1) / al * smax / (smax - s31);
        es = e0 - al * (*psa);
    }
}

```

```

    }else{
        ee3 = e3 - fn_TMAX(e3); s3 = fn_S(a3, ee3);
        *psa = b * smax / (smax - s3); es = e0 - al * (*psa);
        if( es < em1 ) es = em1;
    }
    if (smax > 20.0 * DR) *psa = smax;
}else{
    sprintf(pstrC, "ZONE 3");
    wkEs = fn_ET(l); wkEs_0 = wkEs - fn_TMAX(wkEs); es = wkEs;
    wkAs_0 = fn_C(wkEs_0); wkSA_0 = fn_SAF(wkAs_0, wkEs, a0, e0);
    /* search */
    do{
        wkEs = wkEs - 1.0 * DR; wkEs_1 = wkEs - fn_TMAX(wkEs);
        wkAs_1 = fn_C(wkEs_1); wkSA_1 = fn_SAF(wkAs_1, wkEs, a0, e0);
        if(wkSA_1 < wkSA_0){ wkSA_0 = wkSA_1; es = wkEs;}
    }while (wkSA_1 <= wkSA_0);*psa = wkSA_0;
}
goto DETAIL_CALC_ZONE3;
PROC_ZONE_4:
    *psa = fn_SAF(am1,em1,a0,e0); sprintf(pstrC,"ZONE 4"); goto JUDGEMENT ;
PROC_ZONE_5:
    a5 = a0 + (em2 - e0) * be / al; s5 = fn_S(a5, eem2);
    e51 = em2 + al * b; a51 = a5 + be * b;
    ee51 = e51 - fn_TMIN(e51); s51 = fn_S(a51, ee51);
    *psa = (em2 - e0) / al + b * s5 / (s5 - s51);
    if( *psa > 1 ) *psa = (em2 - e0) / al - s5;
    es = e0 + al * (*psa); sprintf(pstrC, "ZONE 5"); goto DETAIL_CALC_ZONE156 ;
PROC_ZONE_6:
    *psa = fn_SAF(am2,em2,a0,e0); es = em2;
    sprintf(pstrC, "ZONE 6"); goto DETAIL_CALC_ZONE156 ;
PROC_ZONE_7:
    *psa = (dem * (a0 - am1) - (e0 - em1) * dam) / sqrt( dem * dem + dam * dam );
    sprintf(pstrC, "ZONE 7"); goto JUDGEMENT ;
PROC_ZONE_8:
    *psa = fn_SAF(am1,em1,a0,e0);
    sprintf(pstrC, "ZONE 8"); goto JUDGEMENT ;
/* detailed calculation for zone 1,5,6 */

```

DETAIL_CALC_ZONE156:

/* step 1 */

if(*psa >= 2.0 * b) goto JUDGEMENT ;

else de = be * b / 200.0;

ZONE156_STEP1_LOOP:

ees = es - fn_TMIN(es);

if(fn_F(ees) - ees < 1){ es = es - de; goto ZONE156_STEP1_LOOP ;}

as = fn_C(ees); sa0 = fn_SAF(as,es,a0,e0); es1 = es + de;

ees = es1 - fn_TMIN(es1);

if(fn_F(ees) - ees < 1){ es1 = es; *psa = sa0; goto ZONE156_STEP3 ;}

as = fn_C(ees); *psa = fn_SAF(as, es1, a0, e0);

if(*psa > sa0){ es1 = es; *psa = sa0; goto ZONE156_STEP3 ;}

/* step 2 */

ZONE156_STEP2:

es1 = es1 + de; ees = es1 - fn_TMIN(es1);

if(fn_F(ees) - ees < 1) goto JUDGEMENT ;

as = fn_C(ees); sa1 = fn_SAF(as, es1, a0, e0);

if(sa1 < *psa){ *psa = sa1; goto ZONE156_STEP2 ;}else{ goto JUDGEMENT ;}

/* step 3 */

ZONE156_STEP3:

if(es1 <= em2) goto JUDGEMENT ;

es1 = es1 - de;

if(es1 < em2) es1 = em2;

ees = es1 - fn_TMIN(es1); as = fn_C(ees); sa1 = fn_SAF(as, es1, a0, e0);

if(sa1 < *psa){ *psa = sa1; goto ZONE156_STEP3 ;}else{ goto JUDGEMENT ;}

/* detailed calculation for zone 3 */

DETAIL_CALC_ZONE3:

/* step 1 */

if(*psa >= 2.0 * b) goto JUDGEMENT ; else de = be * b / 200.0;

ZONE3_STEP1:

ees = es - fn_TMAX(es);

if (fn_F(ees) - ees < 1){ es = es - de; goto ZONE3_STEP1 ;}

as = fn_C(ees); sa0 = fn_SAF(as,es,a0,e0);

es1 = es + de; ees = es1 - fn_TMAX(es1);

if(fn_F(ees) - ees < 1){es1 = es; *psa = sa0; goto ZONE3_STEP3 ;}

as = fn_C(ees); *psa = fn_SAF(as,es1,a0,e0);

if(*psa > sa0){ es1 = es; *psa = sa0; goto ZONE3_STEP3; }

/* step 2 */

ZONE3_STEP2:

```

    es1 = es1 + de; ees = es1 -fn_TMAX(es1);
    if( fn_F(ees) - ees < 1 ) goto JUDGEMENT ;
    as = fn_C(ees); sa1 = fn_SAF(as, es1, a0, e0);
    if( sa1 < *psa){ *psa = sa1; goto ZONE3_STEP2 ;      }else{ goto JUDGEMENT; }
    /* step 3 */

```

ZONE3_STEP3:

```

    if( es1 <= em1 ) goto JUDGEMENT ;
    es1 = es1 - de;
    if( es1 < em1 ) es1 = em1;
    ees = es1 - fn_TMAX(es1); as = fn_C(ees);
    sa1 = fn_SAF( as, es1, a0, e0);
    if( sa1 < *psa ){ *psa = sa1; goto ZONE3_STEP3 ;}

```

JUDGEMENT:

```

    if( *psa >= b ) *pkf = 1; else *pkf = -2;
    return 1;

```

}

/***/

/* main routine */

/***/

void main()

{

/* parameters */

```

    double f; /* frequency */
    double bd; /* separation angle to be avoided in degree */
    double b; /* separation angle to be avoided in radian */
    double ld,lm,ls; /* latitude of the station in degrees, minutes, sec */
    double l; /* latitude of the station in radian */
    double a0; /* azimuth of antenna main beam in radian */
    double a0d; /* azimuth of antenna main beam in degree */
    double e0; /* elevation of antenna main beam in radian */
    double e0d; /* elevation of antenna main beam in degree */
    double sa; /* estimated separation angle */
    int kf; /* decision flag */
    char strC[32]; /* judge zone */
    double pt; /* allowable e.i.r.p value */
    double recbd; /* recommended bd*/
    char strRedo[4],strLog[4]; /*keyin buffer for redo control */
    int nDefaultBDFlg,nLogFlg;
    ld = lm = ls = a0d = e0d = 0.0;

```

```

/* file out flg */
printf(" Do you want to make output file? (sf765.txt)?[y/n] ");
do{
    gets(strLog);
}while(!strcmp (strLog,""));
if(strcmp(strLog,"y") == 0 || strcmp(strLog,"Y") == 0){
    nLogFlg = 1; fp = fopen("sf765.txt","wt");
    if(fp == NULL){
        printf(" Cannot create result file (sf765.txt)\n "); nLogFlg = 0;
    }
}
else{ nLogFlg = 0;}
/* parameters input */

```

PARAMETERS_INPUT_START:

INPUT_F:

```

printf(" input F : frequency (GHz) ");
scanf("%le", &f);
if (f < 0 || f > 15){ printf(" 1 <= F <= 15 "); goto INPUT_F ; }
if(f <= 10) bd = 2; else bd = 1.5;recbd = bd;

```

INPUT_B:

```

printf(" input B : separation angle to be avoided (deg) ");
printf("      (if the Recommendation is followed, B = %.1f) ", recbd);
scanf("%le", &bd);
if (bd <= 0){ printf(" B should be positive. "); goto INPUT_B ; }
if(bd == recbd) nDefaultBDFlg = 1; else nDefaultBDFlg = 0;
b = bd * DR;
printf(" input l : latitude( deg, min, sec ) ");
scanf("%le,%le,%le",&ld, &lm, &ls);
l = fabs(ld + lm / 60.0 + ls / 3600.0) * DR;
printf(" input A0 : antenna azimuth ( deg ) ");
scanf("%le",&a0d); a0 = a0d * DR;
printf(" input E0 : antenna elevation ( deg ) ");
scanf("%le",&e0d); e0 = e0d * DR;
printf(" input H0 : station height ( m ) ");
scanf("%le",&H0); H0 = H0 / 1000.0;

```

INPUT_H1:

```

printf(" input H1 : horizon height ( m ) ");
scanf("%le",&H1); H1 = H1 / 1000.0;
if (H1 > H0){ printf(" H1<=H0 "); goto INPUT_H1 ; }

```

```

/* call calculation function */
CalculationSub(l, b, a0, e0, &sa, strC, &kf, nDefaultBDFlg);
/* output result */
printf(" F : frequency = %4.1f(GHz) ",f);
printf(" L : latitude = %.0f° %.0f%'.0f" ", ld, lm, ls);
printf(" A0 : antenna azimuth = %.1f( deg ) ",a0d);
printf(" E0 : antenna elevation = %.1f( deg ) ",e0d);
printf(" H0 : station height = %.0f( m ) ", H0 * 1000);
printf(" H1 : horizon height = %.0f( m ) ",H1 * 1000);
if(nDefaultBDFlg == 1) printf(" Separation angle should be at least %.2f degrees. ",bd);
printf(" ----- ");
printf(" The main beam is in %s. ",strC);
if(kf != 3 && nDefaultBDFlg == 1) printf(" The separation angle is");
if(kf == 2 && nDefaultBDFlg == 1) printf(" at least %.2f degrees. ", sa * RD);
if(kf == 1 && nDefaultBDFlg == 1) printf(" at least %.2f degrees. ",bd);
if(kf == 0 && nDefaultBDFlg == 1) printf(" zero. ");
if(kf < 0 && nDefaultBDFlg == 1) printf(" less than %.2f degrees. ",bd);
if(kf == -2 && nDefaultBDFlg == 1){
    printf(" If the local horizon is not flat,");
    printf(" further investigation should be carried out. ");
}
if(kf == 3) printf(" You can't see the orbit from your latitude. ");
if(sa > 90 * DR || kf == 3 || kf == 2) goto DETERMINATION_EIRP ;
printf(" Actual separation angle can be estimated as %.3f degrees. ", sa * RD);

```

```

if(nDefaultBDFlg == 1){

```

DETERMINATION_EIRP:

```

/* determination of eirp */
if ( 10 < f )          { pt = 55.0; goto PRINT_PT ; }
if ( sa < .5 * DR )   { pt = 47.0; goto PRINT_PT ; }
if ( sa >= 1.5 * DR ) { pt = 55.0; goto PRINT_PT ; }
pt = 47.0 + 8.0 * (sa * RD -.5);

```

PRINT_PT:

```

printf(" Maximum e.i.r.p shall not exceed %.3f dBW ",pt);
}
printf(" ----- ");
/* file out */
if(nLogFlg == 1){
    fprintf(fp," F : frequency = %4.1f(GHz) ",f);
    fprintf(fp," L : latitude = %.0f° %.0f%'.0f" ", ld, lm, ls);

```

```

fprintf(fp," A0 : antenna azimuth = %.1f( deg ) ",a0d);
fprintf(fp," E0 : antenna elevation = %.1f( deg ) ",e0d);
fprintf(fp," H0 : station height = %.0f( m ) ", H0 * 1000);
fprintf(fp," H1 : horizon height = %.0f( m ) ",H1 * 1000);
if(nDefaultBDFlg == 1) fprintf(fp," Separation angle should be at least %.2f degrees. ",bd);
fprintf(fp," ----- ");
fprintf(fp," The main beam is in %s. ",strC);
if(kf != 3 && nDefaultBDFlg == 1) fprintf(fp," The separation angle is");
if(kf == 2 && nDefaultBDFlg == 1) fprintf(fp," at least %.2f degrees. ", sa * RD);
if(kf == 1 && nDefaultBDFlg == 1) fprintf(fp," at least %.2f degrees. ",bd);
if(kf == 0 && nDefaultBDFlg == 1) fprintf(fp," zero. ");
if(kf < 0 && nDefaultBDFlg == 1) fprintf(fp," less than %.2f degrees. ",bd);
if(kf == -2 && nDefaultBDFlg == 1){
    fprintf(fp," If the local horizon is not flat,");
    fprintf(fp," further investigation should be carried out. ");
}
if(kf == 3) fprintf(fp," You can't see the orbit from your latitude. ");
if(sa > 90 * DR || kf == 3 || kf == 2){
    if(nDefaultBDFlg == 1 ) fprintf(fp," Maximum e.i.r.p shall not exceed %.3f dBW ",pt);
}
else{
    fprintf(fp," Actual separation angle can be estimated as %.3f degrees. ", sa * RD);
}
fprintf(fp," ----- ");
}
/* redo calculation */
printf(" Do you continue? (y/n) ");
REDO:
gets(strRedo); if (strcmp(strRedo,"") == 0) goto REDO;
if(strcmp(strRedo,"n") == 0 || strcmp(strRedo,"N") == 0) {
    fclose(fp);
    return;
}
else goto PARAMETERS_INPUT_START ;
}

```
