

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R SF.1572
(05/2002)

Metodología para evaluar la repercusión de la interferencia en el trayecto espacio-Tierra causada por el servicio fijo por satélite al servicio fijo en las bandas de frecuencia en las que la precipitación es el mecanismo predominante de los desvanecimientos

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.1572***

Metodología para evaluar la repercusión de la interferencia en el trayecto espacio-Tierra causada por el servicio fijo por satélite al servicio fijo en las bandas de frecuencia en las que la precipitación es el mecanismo predominante de los desvanecimientos

(Cuestiones UIT-R 250/4 y UIT-R 217/9)

(2002)

Cometido

Esta Recomendación contiene un método para evaluar la repercusión de la interferencia causada por satélites del servicio fijo por satélite OSG en la disponibilidad de sistemas del servicio fijo en las bandas de frecuencias en las cuales el desvanecimiento debido a las precipitaciones limita la disponibilidad de sistemas del servicio fijo. El método se basa en un criterio en el que la relación entre la portadora y la potencia de ruido más la interferencia se aplica la disponibilidad de sistemas del servicio fijo, tanto punto a punto como punto a multipunto, con parámetros especificados sobre una base estadística. La flexibilidad de la especificación de los parámetros introducidos constantes y/o estadísticamente variables permite la consideración de muchos ejemplos diferentes de sistemas del servicio fijo.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que las emisiones procedentes de estaciones espaciales del servicio fijo por satélite (SFS) que funcionan en la órbita de los satélites geoestacionarios (OSG) y que comparten el mismo espectro que el servicio fijo pueden producir interferencia en las estaciones receptoras del servicio fijo;
- b) que los resultados obtenidos utilizando un enfoque estadístico comparado con un análisis de caso más desfavorable pueden conducir a una utilización más eficaz del espectro que los resultados obtenidos con criterios desarrollados utilizando solamente el análisis de caso más desfavorable;
- c) que las metodologías de compartición deben tener en cuenta los requisitos de calidad y las características de despliegue de los sistemas del servicio fijo utilizados y planificados en estas bandas de frecuencia;
- d) que cuando se trata del espectro en el que la precipitación es el mecanismo predominante de los desvanecimientos, conviene contar con un útil de evaluación de la interferencia utilizando las estadísticas de las relaciones C/N , C/I y $C/(N+I)$ para determinar la repercusión en la disponibilidad;
- e) que dicho útil de evaluación de la interferencia puede tener aplicación en las bandas por encima de unos 17 GHz, ayudando a las administraciones a realizar los estudios de compartición,

* La metodología del Anexo 1 se centra en la interferencia procedente de los sistemas del SFS OSG. Se requieren nuevos estudios para asegurar que esta metodología sea aplicable de forma general a la interferencia procedente de los sistemas del SFS no OSG.

** La Comisión de Estudio 5 de Radiocomunicaciones incorporó enmiendas de forma a la presente Recomendación en diciembre de 2009 con arreglo a la Resolución UIT-R 1.

recomienda

1 que se utilice la metodología descrita en el Anexo 1 para desarrollar útiles de simulación informática que permitan evaluar la repercusión de la interferencia procedente de los sistemas del SFS en los sistemas digitales del servicio fijo cuando funcionan, en las bandas de frecuencia por encima de 17 GHz.

Anexo 1

1 Introducción

La metodología descrita en este Anexo ofrece un modelo para el análisis de todos los parámetros de un sistema del servicio fijo y de los parámetros geoclimáticos locales de los sistemas punto a punto (P-P) y punto a multipunto (P-MP) que pueden influir en la susceptibilidad de los receptores del servicio fijo a la interferencia procedente de los enlaces descendentes del SFS.

1.1 Definiciones

En las bandas de frecuencia en las que la precipitación es el mecanismo predominante de los desvanecimientos, los objetivos de diseño del servicio fijo vienen determinados por las características de disponibilidad, más que por las características de error. A los efectos de esta Recomendación, se considera que el término «disponibilidad de diseño» se basa en el umbral del número de segundos con muchos errores (SME), teniendo en cuenta que en estas bandas de frecuencia, el porcentaje de sucesos con SME consecutivos inferiores a 10 s es despreciable. A partir de ahí, la disponibilidad de diseño para todos los enlaces del servicio fijo se estima por el porcentaje de tiempo en un año promedio en el que la relación C/N de una señal de receptor cae por debajo del umbral ($C/N_{ésima}$), que se corresponde con los sucesos de SME. En el presente Anexo, la indisponibilidad ($100\% - \text{disponibilidad}$) se indica por el símbolo $p_D(\%)$.

Disponibilidad de diseño para los sistemas P-MP – La disponibilidad de diseño es el porcentaje de tiempo de un año promedio en el que la relación entre la portadora y el total del ruido más la interferencia ($C/(N + I)$) aplicada a un abonado de referencia situado en el radio máximo de una célula P-MP se recibirá con el umbral $C/N_{ésima}$, o superior.

Disponibilidad de diseño para sistemas P-P – La disponibilidad de diseño es el porcentaje de tiempo de un año medio en que la relación entre la portadora y el total de ruido más la interferencia ($C/(N + I)$) aplicado al receptor se recibirá con el umbral $C/N_{ésima}$ o superior.

Abonado de referencia para un sistema P-MP – Receptor situado a la distancia máxima de la antena central transmisora que se utiliza en el cálculo de la potencia de transmisión necesaria para lograr la disponibilidad de diseño. En los sistemas P-MP en los que los modelos incluyen antenas de abonado con alturas que responden a una distribución estadística, la altura del receptor de referencia es la altura más probable. En dicho modelo de sistema P-MP, una antena central a la que se entregue la potencia de transmisor suficiente para lograr la disponibilidad de diseño en un enlace con el receptor de referencia, no tendrá suficiente potencia de transmisión para cumplir la disponibilidad de diseño del 100% de todos los abonados posibles. Ello es debido a la combinación de ganancia de la antena central inferior y mayores pérdidas en el espacio libre, en la dirección de los abonados, e incluso la distancia máxima respecto a la antena central o sus proximidades. Se necesitará añadir una potencia adicional a la antena central a fin de que todos los posibles abonados puedan lograr su disponibilidad de diseño en un sistema P-MP caracterizado por antenas de abonado que son altas y que responden a una distribución estadística.

En este Anexo se hace referencia a cuatro tipos de modulaciones utilizadas por los sistemas del servicio fijo. Estos tipos de modulación son: modulación por desplazamiento de fase cuaternaria (MDP-4) y tres tipos distintos de modulación de amplitud en cuadratura (MAQ-16, MAQ-64 y MAQ-256).

2 Tipos de sistemas del servicio fijo analizados para evaluar la susceptibilidad a la interferencia del SFS OSG

Basándose en los sistemas descritos en la Recomendación UIT-R F.758, hay dos implementaciones diferentes de sistema del servicio fijo.

2.1 Sistema P-MP

El sistema P-MP se caracteriza por una antena de transmisión central o «núcleo» que radia omnidireccionalmente en el plano horizontal (acimut) y direccionalmente en el plano vertical (elevación). El diagrama de radiación de la antena central se logra combinando una serie de antenas sectoriales y puede llevar un sesgo angular de elevación negativa a fin de hacer máxima la cobertura desde un punto elevado en lo alto de un edificio o torre. Por el contrario, las antenas de usuario o de «abonado» son directivas y puede suponerse, a efectos de cálculo, que son simétricas axialmente. La distribución de los abonados a lo largo de una gama especificada de valores posibles de longitudes de salto puede responder a un modelo estadístico o estar definida por el usuario. Algunos de los modernos sistemas P-MP actuales de tercera generación funcionan con hasta tres tipos de modulación simultáneamente, tales como las MDP-4, MAQ-16, MAQ-64 y MAQ-256. Estas configuraciones permiten una mayor capacidad de tráfico por sector, lo que es fundamental para hacer que las redes sean más económicas. El resultado de ello es que en cada emplazamiento de célula pueden existir hasta tres anillos concéntricos en los que se cumple el mismo objetivo mínimo de disponibilidad. Esto significa que un número mucho mayor de abonados que reciben capacidades superiores tienen ángulos medios de elevación mayores que los de las células P-MP y que responden a modelos en los que se utiliza un único esquema de modulación en toda la célula. Los abonados que funcionan en los niveles de modulación superiores de los anillos interiores están inherentemente sujetos a niveles superiores de la densidad de flujo de potencia (dfp) procedentes de satélites que funcionan en la OSG, pues tienen ángulos de elevación mayores que los abonados de los anillos exteriores. El efecto global de la interferencia del SFS en la disponibilidad de dichos sistemas P-MP puede responder a un modelo estadístico, ponderando el número de abonados (independiente de la capacidad) en cada uno de los anillos o ponderando el número de abonados con capacidad equivalente mediante un procesamiento posterior de los datos de disponibilidad obtenidos del análisis de cada uno de los anillos individuales.

La aplicación de la metodología en una amplia gama de escenarios posibles de despliegue permite evaluar paramétricamente la sensibilidad de los sistemas P-MP ante diversos parámetros del sistema del servicio fijo, incluyendo el diámetro de la antena del receptor del servicio fijo, el factor de ruido del sistema receptor, las características de la célula P-MP y los factores geoclimáticos.

2.2 Sistema P-P

Este tipo de sistema se caracteriza por enlaces de microondas orientados aleatoriamente con una amplia gama de longitudes de salto y ángulos de elevación. Al considerar el efecto de la interferencia de los sistemas del SFS en una red P-P del servicio fijo, se examina el efecto de la interferencia del SFS en ambos extremos del enlace del servicio fijo.

Un subconjunto de los sistemas P-P es el de la realización de un sistema P-MP o de una red con configuración en «estrella» en la que el tráfico puede o no ser asimétrico (es decir, mayor capacidad del transmisor central hacia el abonado). En este caso, habrá una mayor proporción de

receptores P-P que tengan ángulos de elevación superiores, al igual que los receptores de una red P-MP, y presentarán entonces una mayor susceptibilidad a la interferencia de los enlaces espacio-Tierra. En el tipo de configuración en «estrella» de una red P-P, la distribución de los abonados a lo largo de una gama especificada de valores posibles de longitudes de salto puede especificarse de la misma manera que para la red P-MP.

En algunos despliegues del servicio fijo, puede ser posible encontrarse con desarrollos híbridos, consistentes en esquemas P-P (configuración aleatoria y en estrella) y despliegues P-MP que se optimizan basándose en consideraciones sobre eficacia de la red. En todos esos casos, la interferencia predominante es la del SFS en el receptor de abonado del servicio fijo.

3 Consideraciones generales

3.1 Sistemas P-MP

La geometría de la célula P-MP y los diagramas de las antenas centrales y de abonado afectan a la distribución estadística de los niveles de interferencia del conjunto de los posibles receptores, así como a su susceptibilidad a la interferencia. Además, en las bandas de frecuencia por encima de 17 GHz, la atenuación de larga duración debida a los gases atmosféricos, los efectos de centelleo y la atenuación de corta duración debida a la lluvia, que a su vez resultan afectadas por los factores geoclimáticos relacionados con la latitud, son importantes para determinar la susceptibilidad de los terminales de abonado a la interferencia espacio-Tierra procedente de los satélites del SFS. El efecto de cada uno de estos factores en la susceptibilidad de los terminales de abonado a la interferencia procedente de los satélites del SFS OSG puede determinarse paramétricamente.

3.2 Sistemas fijos P-P (incluyendo la configuración en estrella)

En los sistemas P-P que funcionan en las bandas de frecuencia por encima de 17 GHz, una serie de factores que incluyen el diámetro de la antena receptora, el ángulo de elevación y los márgenes del desvanecimiento del sistema contribuyen a la susceptibilidad de los terminales receptores a la interferencia exterior. El margen contra el desvanecimiento de un sistema P-P depende de la distancia del salto y de los mismos factores geoclimáticos al igual que en los sistemas P-MP.

4 Hipótesis

La metodología que presenta este Anexo parte de ciertas hipótesis.

4.1 Hipótesis básicas

Las hipótesis básicas resumidas a continuación son comunes a los sistemas P-MP y P-P de los sistemas del servicio fijo y constituyen elementos importantes en la implementación de la metodología:

- a) El diseño del trayecto tiene en cuenta cualesquiera de los objetivos de calidad y el margen contra el desvanecimiento necesario para cumplir los objetivos aplicables recomendados o deseados de calidad a corto plazo.
- b) El efecto de la interferencia en una red del servicio fijo puede evaluarse, por ejemplo, como porcentaje del número total de receptores posibles del servicio fijo que logran una disponibilidad igual o superior a la de un nivel determinado de disponibilidad degradada.
- c) La parte del arco OSG por encima del plano horizontal es visible a todos los terminales receptores del servicio fijo y ninguna parte del arco en ninguna dirección resulta bloqueada a la vista de ninguna de las antenas receptoras del servicio fijo.

- d) Se supone que la altura por encima del nivel medio del mar (amsl, above mean sea level) de todo el trayecto de la señal deseada es la misma a los efectos del cálculo de la atenuación debida a los gases atmosféricos (cuando se adopta la opción de aplicar la Recomendación UIT-R P.676) y la atenuación de larga duración debida a la lluvia (Recomendación UIT-R P.530). La altura utilizada es el promedio de las alturas de las antenas de transmisión y de recepción, en un sistema P-P y la altura mínima de la antena del abonado, en un sistema P-MP.
- e) Se observa el valor máximo de la p.i.r.e. de 55 dBW. La anchura de banda del canal del sistema del servicio fijo en cuestión, junto con el valor de la p.i.r.e. de 55 dBW establecen los límites de la densidad de potencia máxima de transmisión para el sistema del servicio fijo.
- f) Las características del servicio fijo utilizadas para el modelo de cualquier enlace P-P o P-MP deben ser representativas de las redes típicas instaladas.
- g) La disponibilidad del servicio fijo se define siempre sobre la base de un promedio anual.

4.2 Hipótesis P-MP

4.2.1 Interferencia interior al servicio (incluyendo la interior al sistema)

En el modelo de sistema más elemental, puede suponerse que se ha atribuido al sistema del servicio fijo una interferencia interior al sistema para un terminal de abonado de referencia situado en el extremo de la célula P-MP a una altura especificada sobre el nivel del suelo (*agl, above ground level*). Esta hipótesis se traduce en que el ruido total, el térmico más el interior al servicio, se especifica a un nivel por encima del nivel del ruido térmico. Pueden considerarse, por ejemplo, si se desea, niveles reales de interferencia interior al servicio para evaluar la influencia del efecto de la interferencia espacio-Tierra (por ejemplo, si todos los sistemas de una región determinada incrementasen su modulación hasta un nivel superior para lograr mayores capacidades). Además, la metodología permite calcular, en un modelo específico de características de despliegue del servicio fijo, los niveles de la interferencia interior al servicio.

4.2.2 Antena central omnidirectiva

En la mayoría de los casos, la envolvente del diagrama de la ganancia de la antena central es simétrica circularmente en el plano horizontal y la ganancia de la antena depende del azimut para un ángulo determinado en el plano vertical (es decir, el ángulo de declinación). Esta hipótesis se aplica si la antena central es una antena única omnidireccional o si está compuesta de múltiples antenas sectoriales. En el caso en que se utilice una única antena sectorial, el diagrama fuera del eje en los planos horizontal y vertical será necesario como dato que permita el cálculo de la ganancia en cualquier punto determinado.

4.2.3 Distribución de los abonados

Hay múltiples formas posibles de establecer un modelo de distribución de los abonados a lo largo de una célula P-MP, incluyendo las distribuciones de descripción estadística tales como la uniforme o de Rayleigh, u otras distribuciones definidas por el usuario. Siempre que sea posible la selección de un modelo debe efectuarse mediante la validación basada en los datos estadísticos referentes a los emplazamientos reales de los abonados. Pueden utilizarse datos reales que den la posición relativa de un abonado en una célula P-MP al examinar los enlaces reales. También puede utilizarse una combinación de distribución estadística y datos reales.

4.2.4 Nivel del suelo

Puede considerarse que la elevación del suelo, amsl, a lo largo de toda la célula es la misma que la elevación del suelo de la estación central. Como alternativa, pueden utilizarse datos reales que den

la elevación del suelo para cada posición de abonado en una célula P-MP al examinar los enlaces caso por caso.

4.2.5 Alturas de la antena de abonado

Puede establecerse un modelo estadístico de las alturas agl de las antenas de abonado mediante la Recomendación UIT-R P.1410 si se conoce la altura, σ , de Rayleigh de la ciudad sobre la que se establece el modelo. En el caso de un modelo de altura de antena de Rayleigh, han de utilizarse consideraciones prácticas para truncar la altura en algunos valores máximo y mínimo. Pueden utilizarse datos reales que den la altura de cada terminal de abonado al examinar los enlaces caso por caso. También puede utilizarse una combinación de distribución estadística y de datos reales.

4.2.6 Bloqueo 0%

Se supone que la antena de la estación central es visible para toda antena de abonado en una célula P-MP y que su visión no está bloqueada por ningún edificio sobre el que puedan estar situadas otras antenas de abonado, aun cuando la aleatorización empleada por un modelo determinado de altura de antena se traduzca en un bloqueo de la visión por un edificio próximo de una antena de abonado más distante.

4.2.7 Sin diversidad

Se supone que todo terminal de abonado distante se orienta hacia el mismo punto, con lo que no se tiene en cuenta ningún caso más desfavorable de exposición en azimut al establecer un terminal de abonado. Es la única manera de establecer con significado el efecto de la intersección de la órbita OSG con el eje de puntería de la antena receptora del servicio fijo en la calidad del sistema del servicio fijo.

4.2.8 Altura de la antena central, radio de la célula y sesgo del ángulo de elevación de la antena central en los sistemas P-MP

El sesgo del ángulo de la antena central puede optimizarse de forma que la ganancia máxima de la antena central coincida con la altura más probable de un terminal de abonado a la distancia máxima desde el centro de la célula. Como alternativa, el sesgo del ángulo de elevación de la antena central puede estar definido por el usuario. Dado que un abonado en el extremo de una célula P-MP puede tener una altura agl que varíe en una gama considerable de valores, la antena central debe tener la ganancia máxima únicamente hacia una altura de antena de abonado a la distancia máxima de la célula. Al utilizar un modelo estadístico de alturas de antena, algunos abonados situados en el extremo de una célula pueden tener un margen insuficiente en condiciones de cielo despejado, a falta de toda interferencia espacio-Tierra. Si la antena central está sesgada apuntando hacia la altura de abonado más probable, puede minimizarse el porcentaje de abonados que tengan margen insuficiente en condiciones de cielo despejado. La altura de abonado más probable se calcula conforme a la distribución de probabilidades de alturas de antena para cada modelo de alturas de antena. El cálculo del ángulo de sesgo de la antena central para la ganancia óptima de ésta en el extremo de la célula se realiza mediante la expresión siguiente:

$$\varphi_{Hub} = \text{tg}^{-1}((h_{Hub} - h_{sub})/R_{m\acute{a}x})$$

donde:

- h_{Hub} : altura de la antena central sobre el nivel del suelo (m)
- h_{sub} : altura más probable del abonado a la distancia $R_{m\acute{a}x}$ respecto a la antena central (m)
- $R_{m\acute{a}x}$: distancia máxima de un abonado en una célula P-MP (m).

La realización más simple de este modelo es aquella en la que una antena central tiene simetría de 360°. Para las células P-MP con sectores individuales que tienen que tener ángulos de sesgo diferentes a fin de encajar eficazmente sus poblaciones de abonados respectivas, la metodología puede aplicarse individualmente a cada sector y pueden calcularse las estadísticas para toda la célula ponderando los resultados conforme al número de abonados en cada sector.

4.3 Hipótesis para sistemas del servicio fijo P-P

4.3.1 Emplazamiento del receptor del servicio fijo

En la realización más simple de la metodología, se supone que una antena del servicio fijo tiene la misma probabilidad de estar situada en cualquier azimut para una distancia de salto y ángulo de elevación determinados. De forma alternativa, cuando se dispone de datos reales, pueden utilizarse los ángulos de azimut y de elevación de un trayecto del servicio fijo al examinar los enlaces caso a caso.

4.3.2 Distancia máxima del salto

La distancia máxima posible del salto depende de factores geoclimáticos, así como de los parámetros de diseño del sistema del servicio fijo, tales como la disponibilidad diseñada, el umbral de la C/N para un nivel determinado de la calidad en términos de la proporción de bits erróneos (BER) y el equipo de modulación empleado. El tamaño de la antena transmisora, la disponibilidad diseñada, el tipo de modulación, el factor de ruido del receptor y la anchura de banda del canal, junto con el límite máximo de potencia que se especifican en el § 4.1 e) tendrán el efecto de limitar la distancia máxima.

4.3.3 Diámetro mínimo/máximo de la antena

La metodología puede aceptar cualquier tamaño de antena que se utilice típicamente en las bandas compartidas por encima de 17 GHz.

4.3.4 Modelo de altura de antena

Los mismos modelos utilizados para las alturas de antena de abonado de los sistemas P-MP pueden utilizarse para los modelos de altura de antena de receptores del servicio fijo P-P. No obstante, dado que hay cierta preferencia en la selección de edificios altos en los que situar las antenas para las redes P-P, pueden utilizarse, si se dispone de ellos, datos estadísticos de alturas de antena obtenidos de los bancos de datos de frecuencias nacionales.

En el caso de la implementación P-P de un sistema P-MP o de una red en estrella o de una red P-P simétrica, pueden utilizarse los mismos modelos utilizados para las alturas de antena de abonado de sistemas P-MP para los modelos de alturas de antena de receptores del servicio fijo P-P configurados en estrella.

Véase que la diferencia en los umbrales asociada a la calidad a largo y corto plazo varía dependiendo del tipo de modulación que se utilice. Los enlaces que utilizan niveles superiores de modulación con umbrales mayores de la C/N exigirán potencias de transmisión superiores en los enlaces para una distancia y anchura de banda del canal determinadas. Este hecho, junto con los límites en la potencia máxima de cualquier canal radioeléctrico especificados en el § 4.1 e), tendrá el efecto de limitar la distancia máxima de un enlace para una disponibilidad determinada o de reducir la disponibilidad que puede lograrse para una distancia dada.

5 Atenuación atmosférica en cielo despejado

5.1 Parámetros geoclimáticos y gamas aplicables

Si se desea probar la sensibilidad de parámetros específicos de sistemas del servicio fijo y los factores geoclimáticos asociados respecto a la susceptibilidad a la interferencia, puede aplicarse paramétricamente la metodología en una amplia gama de parámetros del sistema y factores geoclimáticos.

Pueden considerarse dos posibles Recomendaciones UIT-R para calcular las pérdidas debidas a la absorción atmosférica. La Recomendación UIT-R P.676-4, se puede utilizar sobre una base específica del emplazamiento para efectuar esta determinación, en los trayectos espacio-Tierra, así como para el servicio fijo, utilizando el método del Anexo 2 de la Recomendación. La Recomendación UIT-R SF.1395, basándose en el Anexo 1 de dicha Recomendación UIT-R P.676 y en la Recomendación UIT-R P.835 da la atenuación mínima espacio-Tierra en el mes más seco y se desarrolló para utilizarla en los estudios de compartición entre el SFS y el servicio fijo. El método de la atenuación espacio-Tierra de la Recomendación UIT-R P.676 requiere datos específicos del emplazamiento que están disponibles en otras Recomendaciones UIT-R de la serie de propagación. El Cuadro 1 contiene valores representativos de los parámetros geoclimáticos necesarios para 13 ejemplos de emplazamientos. En el Cuadro 2 se enumeran los factores geoclimáticos necesarios para aplicar la Recomendación UIT-R P.676 a los efectos del cálculo de la atenuación atmosférica.

CUADRO 1

Ejemplo de parámetros geoclimáticos específicos del emplazamiento que facilitan el análisis de la sensibilidad a la d_{fp} de interferencia del SFS/servicio fijo espacio-Tierra respecto al emplazamiento (latitud) y los parámetros geoclimáticos locales

Emplazamiento	Coordenadas del sistema del servicio fijo			h_s (km)	Parámetros invernales ⁽¹⁾						
	Latitud (+°N)	Longitud (+°E)	Emplazamiento		P (hPa)	N_0	ρ_1 (g/m ³)	T (K)	T (°C)	h_R (km)	$R_{0,01}$ (mm/h)
01	-60	-56,0	Antártica	0,01	1 010,8	302	3	270,9	-2,2	1,01	16,2
02	-45	-70,0	América del Sur	0,50	1 018,9	295	2	279,5	6,3	2,39	10,8
03	-30	30,5	República Sudafricana	0,50	1 018,9	307	6	290,9	17,7	4,36	59,2
04	-15	-48,0	Brasil (Este)	0,50	1 012	329	10	297,1	23,9	4,81	96,4
05	0	100,0	Indonesia	0,01	1 012	389	22	299,7	26,6	4,91	119,7
06	15	102,5	Asia Sudoriental	0,20	1 012	360	16	294,6	21,5	5,07	96,2
07	15	50,0	Oriente Medio	0,15	1 012	353	15	295,1	21,9	4,75	17,1
08	30	-91,5	Estados Unidos de América (Sur)	0,01	1 018,9	338	10	285,3	12,1	4,58	83,7
09	30	120,0	China	0,10	1 018,9	324	6,5	279,0	5,8	5,06	50,3
10	45	6,0	Europa Occidental	0,30	1 018,9	315	4,5	275,7	2,6	3,18	24,7
11	45	-67,5	Estados Unidos de América (Nororiental)	0,01	1 018,9	314	5	279,6	6,5	3,64	32,6
12	60	18,8	Escandinava	0,01	1 010,8	313	3	267,5	-5,7	2,16	21,5
13	60	30,5	Báltico	0,01	1 010,8	310	1,5	261,7	-11,4	2,44	25,3

NOTA – Las temperaturas están calculadas a partir de otros parámetros que se dan.

(1) Estos parámetros geoclimáticos se definen en el Cuadro 2.

CUADRO 2
Parámetros geoclimáticos

Símbolo	Parámetro	Unidades
λ	Latitud de la célula P-MP	+°N/-°S
ρ	Densidad del vapor de agua	g/m ³
P	Presión atmosférica (0 m amsl)	hPa
N_0	Índice de refracción radioeléctrica	
hR	Altura de la lluvia amsl determinada a partir de la Recomendación UIT-R P.839	km
$R_{0,01}$	Intensidad de la lluvia (rebasada durante el 0,01% del tiempo)	mm/h
ζ	Longitud	+°E/-°W

Debe señalarse que algunos de los parámetros están relacionados entre sí. En el § 5.2 figura una lista de estos parámetros interrelacionados.

5.2 Densidad del vapor de agua, presión atmosférica e índice de refracción radioeléctrica

Dado que el modelo específico del emplazamiento que se indica en la Recomendación UIT-R P.676 es de aplicación compleja para calcular la atenuación atmosférica en trayectos oblicuos, se ofrecen a continuación detalles sobre la implementación de este modelo. La Recomendación UIT-R SF.1395 contiene los detalles relativos a la aplicación de este modelo. Los parámetros de densidad de vapor del agua, presión atmosférica, temperatura e índice de refracción radioeléctrica están relacionados entre sí mediante la Recomendación UIT-R P.453-7. Al aplicar el método de la Recomendación UIT-R P.676 sólo se utiliza en la lista de parámetros geoclimáticos específicos del Cuadro 1¹ el parámetro de presión atmosférica que presenta la variabilidad mínima a nivel mundial de todos los parámetros de la Recomendación UIT-R SF.1395. Esto se hace por simplicidad. Si se dispone de datos locales más precisos pueden utilizarse en su lugar.

La densidad del vapor de agua, ρ , y el índice de refracción radioeléctrica medio, N_0 , vienen determinados en los mapas mundiales de las Recomendaciones UIT-R P.836 y UIT-R P.453, respectivamente. Se utilizan los valores de febrero (invernales) de ρ y N_0 para el Hemisferio Norte (y los valores de julio (invernales) para el Hemisferio Sur) pues son los que arrojan valores mínimos de la atenuación atmosférica gaseosa (γ (dB/km)) en el trayecto, en la dirección de la interferencia. Los valores invernales de las atenuaciones atmosféricas calculadas se aplican en los trayectos deseados (terrenal) e interferente (desde el satélite). Como la temperatura es función de la densidad del vapor de agua, de la presión atmosférica y del índice de refracción radioeléctrica, puede calcularse a partir de los otros parámetros. La temperatura, junto con la densidad del vapor de agua, ρ , y la presión atmosférica, P , se utilizan para calcular la atenuación debida a los gases atmosféricos en los trayectos deseado y de interferencia, utilizando la Recomendación UIT-R P.676. La expresión utilizada en la ecuación (1) para calcular la temperatura se obtiene de las ecuaciones (1)

¹ Mientras que la presión medida del aire referida al nivel del mar puede considerarse constante en todo el mundo (igual a 1013 hPa), la densidad del vapor de agua no sólo tiene una amplia gama de variabilidad climática, sino que se mide en la superficie (es decir, a la altura de la estación situada en el suelo). Para los valores de la densidad del vapor de agua en la superficie, véanse las Recomendaciones UIT-R P.836 y UIT-R P.453).

a (9) de la Recomendación UIT-R P.453. Se utilizan mapas mundiales adecuados de las temperaturas mensuales medias anuales mínima y máxima para verificar las temperaturas.

$$T = \frac{1722,455 \cdot \rho + 77,6P}{N_0 \cdot e^{(-h_s/7,35)}} \quad \text{K} \quad (1)$$

donde:

ρ : densidad del vapor de agua (g/m³)

P : presión atmosférica (hPa)

N_0 : índice de refracción radioeléctrica

h_s : altura de la superficie de la Tierra sobre el nivel del mar (km).

El valor ρ de la densidad del vapor de agua utilizado en la ecuación (1) es el valor teórico al nivel del mar, que se calcula de la siguiente manera:

$$\rho = \rho_1 \times \exp(h_s/2) \quad (2)$$

donde ρ_1 es el valor correspondiente a la altitud h_s de la estación en cuestión y se supone que la altura equivalente de la densidad del vapor de agua es de 2 km (véase la Recomendación UIT-R P.835).

Aunque el índice de refracción radioeléctrica, N_0 , no es necesario para el cálculo de la atenuación debida a los gases atmosféricos utilizando el método aproximado del Anexo 2 de la Recomendación UIT-R P.676, se utiliza para calcular la temperatura junto con los valores agrupados en bandas de latitud de la presión atmosférica y los valores locales de la densidad del vapor de agua. Con ello se asegura que la temperatura calculada utilizando la Recomendación UIT-R P.453 es congruente con los valores de la presión y de la densidad del vapor de agua.

5.3 Análisis de la repercusión de los efectos relacionados con la propagación

Las pérdidas del trayecto debidas a los gases atmosféricos se calculan sobre la base de los valores de febrero (invierno) de la densidad del vapor de agua y de esta manera el análisis da valores prudentes (mínimos) de la atenuación atmosférica, lo que lleva a estimaciones superiores de la interferencia. En la mayor parte de las demás épocas del año, la atenuación debido a los gases atmosféricos será mayor que la del mes más desfavorable. Así pues, el efecto neto de la interferencia a largo plazo en los sistemas del servicio fijo P-MP y P-P será inferior a los niveles de degradación de la calidad calculados utilizando valores mínimos de la atenuación debida a los gases atmosféricos de invierno.

En todo entorno operativo real, la atenuación debida a la vegetación y a las estructuras artificiales es inevitable. El nivel de la interferencia en el trayecto interferente desde el arco en la OSG será inferior al calculado en este análisis, pues es probable que una parte del arco esté bloqueada a la visión de la antena receptora. En la práctica, un abonado del servicio fijo que esté expuesto plenamente al arco de la OSG recibirá una contribución predominante de la interferencia de un solo satélite y contribuciones inferiores de los satélites adyacentes que están separados por 2° o más. De esta manera, el nivel de la interferencia recibida realmente será función de la parte del arco de la OSG sometida al bloqueo.

6 Sistema y cálculos de interferencia

Los cálculos de esta metodología comparan la $C/(N+I)$ recibida con el umbral de la C/N del receptor para evaluar el potencial de interferencia, en vez del criterio de la relación I/N . Como la interferencia que se origina en los satélites OSG tiene carácter de larga duración y un nivel constante en condiciones de cielo despejado, la repercusión de la disponibilidad a largo plazo se mide por el porcentaje de tiempo en que el sistema del servicio fijo funciona con una BER peor que la del umbral de la BER a largo plazo en un año medio, en presencia de interferencia.

6.1 Cálculos del margen requerido

El nivel máximo de la portadora recibida en una anchura de banda de referencia de 1 MHz, P_{Rx} , en el receptor del servicio fijo, en condiciones de cielo despejado es:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} - L_{FS} - L_{Atm_t} + G_{Rx} \quad \text{dB(W/MHz)} \quad (3)$$

donde:

- P_{Tx} : potencia del transmisor en la anchura de banda de referencia (dB(W/MHz))
- G_{Tx} : ganancia máxima de la antena transmisora del servicio fijo (dBi)
- G_{Rx} : ganancia máxima de la antena receptora del servicio fijo (dBi)
- L_{FS} : pérdidas en el espacio libre desde la antena transmisora a la antena receptora (dB)
- L_{Atm_t} : pérdidas debidas a los gases atmosféricos en el trayecto terrenal deseado:
 - L_{Atm_t} para un sistema P-MP se calcula a la altura mínima de la antena, agl, pues ésta representa el caso más desfavorable en el que ρ sea máxima y la longitud del trayecto sea la más larga, y
 - L_{Atm_t} para un sistema P-P se calcula a la altura media del trayecto sobre el nivel medio del mar, amsl.

Un enlace del servicio fijo se diseña de manera que la relación entre $C/(N+I)$ recibidos sea igual o superior al umbral de la C/N del receptor, correspondiente al criterio de calidad de la BER a largo plazo. El margen requerido del sistema para el desvanecimiento debido a la lluvia con el que se pretende que un receptor reciba la señal deseada a un nivel determinado de la C/N (correspondiente a un umbral deseado de calidad de la BER) con la disponibilidad de diseño del $100\% - p_D$ (%), viene dado por:

$$M_{Req} = A_p(p_D) \quad \text{dB} \quad (4)$$

donde $A_p(p_D)$ es el desvanecimiento debido a la lluvia rebasado durante el $p_D\%$ más desfavorable del tiempo que se determina conforme al § 2.4 de la Recomendación UIT-R P.530-8.

En muchos sistemas P-P la utilización del control automático de la potencia de transmisión (ATPC) puede permitir el funcionamiento con márgenes de desvanecimiento inferiores, para la misma disponibilidad. Esta metodología no sirve actualmente para enlaces P-P que aplican el ATPC.

6.1.1 Determinación de la interferencia interior al servicio (incluyendo la interior al sistema) y de la interferencia entre servicios

En condiciones de cielo despejado, el ruido total, incluyendo la interferencia entre servicios, viene dado por la siguiente ecuación:

$$(N_{Thermal} + I_{Intra} + I_{Inter}) = 10 \log(10^{N_{Thermal}/10} + 10^{I_{Intra}/10} + 10^{I_{Inter}/10}) \quad \text{dB(W/MHz)} \quad (5)$$

donde:

$N_{Thermal}$ es el ruido térmico del sistema en una anchura de banda de referencia de 1 MHz en un receptor determinado del servicio fijo que se calcula conforme al procedimiento descrito en el § 6.5, dado lo siguiente:

- factor del ruido del receptor, F, y pérdidas del alimentador, LF,
- ángulo de elevación de la antena de recepción del servicio fijo,
- absorción atmosférica en todo el trayecto oblicuo a través de la atmósfera, y

siendo $I_{Intra\ CS}$ la interferencia interior al servicio, incluyendo la interferencia interior al sistema, procedentes de todos los demás transmisores del servicio fijo, en condiciones de cielo despejado. En el caso de ambos sistemas P-P y P-MP se supone, a los efectos de la aplicación de la metodología del § 6.1.1.1, que la interferencia interior al servicio se propaga a lo largo de trayectos horizontales.

El nivel de la interferencia interior al servicio, I_{Intra} , en un receptor del servicio fijo puede fijarse en un nivel que provoque un aumento del ruido total en dicho receptor mediante una atribución especificada del usuario de Y (dB) por encima del ruido térmico del sistema. Alternativamente, la atribución de la interferencia interior al servicio en condiciones de cielo despejado puede fijarse en términos de la relación entre la interferencia interior al servicio y el ruido térmico, y la interferencia interior al servicio puede calcularse directamente. A menos que se genere un modelo específico del despliegue del servicio fijo para calcular la interferencia interior al servicio en cada receptor del servicio fijo de un sistema P-MP o P-P, puede utilizarse la metodología del § 6.1.1.1.

I_{Inter} es la interferencia entre servicios procedente del SFS. El nivel de la interferencia entre sistemas, I_{Inter} , en un receptor del servicio fijo puede fijarse a un nivel que provoque un aumento del ruido total en dicho receptor mediante una atribución especificada de usuario de Z (dB) por encima del ruido térmico del sistema. Se supone que la atribución de la interferencia entre sistemas es constante respecto al ruido térmico en condiciones de desvanecimiento debido a la lluvia y de cielo despejado.

6.1.1.1 Interferencia interior al servicio (incluyendo la interior al sistema) en los receptores del servicio fijo

El nivel de la interferencia interior al servicio, $I_{Intra\ 0}$, en un receptor de abonado de referencia de un sistema P-MP o P-P con un ángulo de elevación ϵ_0 , se fija a un nivel que provoque un aumento del ruido térmico en un receptor con el radio máximo mediante un valor especificado de usuario de Y (dB). El nivel de interferencia entre servicios, I_{Inter} , en un receptor de abonado de un sistema P-MP o P-P puede fijarse a un nivel que provoque un aumento del ruido térmico en un receptor mediante una atribución especificada de usuario de Z (dB). El nivel de la interferencia interior al servicio recibida por este receptor de referencia en la anchura de banda de referencia se calcula utilizando la ecuación (6):

$$I_{Intra\ 0} = N_{Thermal} + 10 \log(10^{Y/10} - 1) \quad \text{dB(W/MHz)} \quad (6)$$

Para todos los demás abonados, el nivel de la interferencia se calcula en relación con la interferencia interior al servicio recibida por el abonado de referencia, utilizando la ecuación (7):

$$I_{Intra i} = I_{Intra 0} + (G(\epsilon_i) - G(\epsilon_0)) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

donde:

- i : valor índice del receptor i -ésimo
- n : número total de receptores posibles
- $G(\epsilon_0)$: ganancia de la antena receptora del abonado de referencia hacia el horizonte (dBi)
- $G(\epsilon_i)$: ganancia de la antena receptora del abonado i -ésimo hacia el horizonte (dBi)
- ϵ_0 : ángulo de elevación de la línea que une el abonado de referencia con la antena transmisora del servicio fijo (grados)
- ϵ_i : ángulo de elevación de la línea que une el abonado i -ésimo y la antena transmisora del servicio fijo (grados).

El nivel de la interferencia entre servicios recibida por este receptor de referencia en la anchura de banda de referencia se calcula utilizando la ecuación (8):

$$I_{Inter} = N_{Thermal} + 10 \log(10^{Z/10} - 1) \quad \text{dB(W/MHz)} \quad (8)$$

En este caso, los receptores de abonado situados en edificios altos próximos al extremo de una célula pueden recibir niveles más elevados de interferencia que los de un receptor de referencia, pues están más expuestos al tener una ganancia superior hacia el horizonte. Este caso se trata mediante la ecuación (7) cuando $\epsilon_i < \epsilon_0$ y $G(\epsilon_i) > G(\epsilon_0)$ que da lugar a $I_{Intra i} > I_{Intra 0}$.

6.1.1.2 Cálculo de la contribución de la interferencia interior al servicio y la exterior en condiciones de desvanecimiento debido a la lluvia

Durante las condiciones de desvanecimiento debido a la lluvia, los niveles de la interferencia que contribuyen al total del ruido térmico más la interferencia se atenuarán respecto a los niveles de las condiciones de cielo despejado. Dado que la interferencia interior al servicio procedente de otros sistemas del servicio fijo y la interferencia exterior procedente de todo el arco visible de los satélites OSG llega de múltiples direcciones distintas, la correlación entre los desvanecimientos a lo largo del trayecto deseado y los de todos los trayectos interferentes no será del 100%. Se supone que la interferencia exterior, $I_{OSG i}$, se atenúa únicamente cuando el satélite OSG está situado dentro del ángulo $u\phi_m$ del eje del haz principal de la antena receptora del servicio fijo, siendo u una constante que provisionalmente se fija entre 1 y 2,5. A la espera de nuevos resultados de los estudios de propagación, esto permite al Grupo de Trabajo 3M asesorar sobre el ángulo adecuado respecto al eje en el que se produce el desvanecimiento en correlación de los trayectos interferentes y deseado del servicio fijo, siendo el valor de u provisional. El ángulo ϕ_m es el ángulo mitad del haz principal de la antena del servicio fijo que se define en la Recomendación UIT-R F.1245.

Habrà alguna atenuación en la dirección de los otros satélites que no están dentro del ángulo u_m del eje del haz principal de la antena receptora del servicio fijo. No obstante, puede adoptarse la hipótesis prudente de fijar en cero la atenuación debida a la lluvia hacia todos los satélites OSG que no están en el haz principal de un posible receptor del servicio fijo.

$I_{Intra i}$ puede considerarse como un nivel constante de contribución de interferencia en condiciones de cielo despejado y de desvanecimiento debido a la lluvia. Alternativamente, $I_{Intra i}$, en el caso en

que se suponga que la contribución predominante procede de la interferencia interior del servicio que se propaga horizontalmente a lo largo del acimut de puntería del servicio fijo, puede atenuarse durante las condiciones de desvanecimiento debido a la lluvia a lo largo de la proyección horizontal del trayecto deseado del servicio fijo.

6.2 Cálculo de la potencia de transmisión requerida

Dado que el receptor debe recibir a su nivel umbral de (C/N) o superior a éste, $(C/N)_{umbral}$ durante todo el tiempo excepto el $p(\%)$ de él, puede determinarse la densidad de potencia mínima de transmisión sabiendo que en condiciones de desvanecimiento debido a la lluvia:

$$\begin{aligned} \left(\frac{C}{N}\right)_{umbral} &= P_{Rx \text{ Rain Faded}} - (N + I_{Intra} + I_{Inter})_{Rain \text{ Faded}} \quad \text{dB} \\ &= P_{Rx \text{ CS}} - A_p(p) - (N + I_{Intra} + I_{Inter})_{Rain \text{ Faded}} \end{aligned} \quad (9)$$

donde:

$P_{Rx \text{ Rain Faded}}$: nivel de la portadora deseada recibida (dB(W/MHz)) en condiciones de lluvia cuando el receptor está en el umbral

$P_{Rx \text{ CS}}$: nivel de la portadora deseada recibida (dB(W/MHz)) en condiciones de cielo despejado.

$(N + I_{Intra} + I_{Inter})_{Rain \text{ Faded}}$: ruido total (dB(W/MHz)) incluyendo la interferencia interior al servicio e interservicios en condiciones de desvanecimiento debido a la lluvia.

Incluyendo la ecuación (9) en la ecuación (3) y resolviendo para P_{Tx} , la potencia mínima de transmisión requerida para que el enlace funcione con su disponibilidad de diseño es:

$$\begin{aligned} P_{Tx_{min}} &= L_{FS} + L_{Atm_t} - (G_{Tx} + G_{Rx}) + M_{Req} + \left(\frac{C}{N}\right)_{umbral} \quad \text{dB(W/MHz)} \\ &\quad + (N + I_{Intra} + I_{Inter})_{Rain \text{ Faded}} \end{aligned} \quad (10)$$

donde L_{FS} y L_{Atm_t} son las pérdidas definidas en la ecuación (3).

6.3 Cálculos del nivel de la portadora recibida

6.3.1 Cálculo del nivel de la portadora recibida y del margen requerido para el enlace estación central-abonado (ruta de salida) de un sistema P-MP del servicio fijo

El nivel de la portadora recibida en condiciones de cielo despejado se calcula utilizando la misma expresión que en el § 6.1, aunque G_{TX} no es un único valor constante. G_{TX} varía conforme el sesgo del ángulo de puntería de la antena central, la distancia y el ángulo de elevación desde el abonado.

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx}(\varphi_{Hub}) - L_{FS} - L_{Atm_t} + G_{Rx \text{ Sub}} \quad \text{(dB(W/MHz))} \quad (11)$$

$G_{TX}(\varphi)_{Hub}$ es la directividad de la antena central en la dirección de una antena de abonado determinada, siendo $(\varphi)_{Hub}$ el valor absoluto del ángulo a partir de la dirección de directividad máxima que se mide en el plano vertical. $G_{TX}(\varphi)_{Hub}$ se calcula según la Recomendación UIT-R F.1336. G_{RXSub} es la ganancia máxima de recepción de la antena de abonado. Las pérdidas L_{FS} y L_{Atm_t} se especifican en un receptor de abonado de referencia en el extremo de la célula.

En vez de tener que calcular un valor único del margen requerido para una disponibilidad deseada como en el caso de un sistema P-MP del servicio fijo de una longitud de trayecto determinada, ha de volver a calcularse el margen requerido para lograr la disponibilidad de diseño en todos los posibles puntos de la célula P-MP en los que pueda recibirse la señal de la ruta de salida. El margen requerido de la célula P-MP varía a lo largo de ella a medida que varía la distancia y el ángulo de elevación desde la antena central. El nivel de la portadora recibida por el abonado resulta muy afectado por dos factores:

- La ganancia de la antena transmisora central en la dirección del abonado que es función del ángulo fuera del eje de la antena central en el plano del ángulo de elevación.
- La distancia del abonado a la estación central que es función de la longitud del trayecto horizontal y de la de diferencia entre las alturas de la antena de abonado y de la antena central.

6.3.2 Cálculo del nivel de la portadora recibido y del margen requerido para el enlace de un sistema P-P del servicio fijo

El nivel de la portadora recibido en condiciones de cielo despejado se calcula utilizando la ecuación (3) del § 6.1:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx\ P-P} - L_{FS} - L_{Atm_t} + G_{Rx\ P-P} \quad \text{dB(W/MHz)} \quad (12)$$

donde:

$G_{Tx\ P-P}$: directividad máxima de la antena transmisora P-P en la dirección de la antena de abonado

$G_{Rx\ P-P}$: ganancia de la antena receptora P-P en la dirección de la antena transmisora

L_{FS} : pérdidas en el espacio libre por el trayecto entre el transmisor y el receptor que dependen únicamente de la longitud del trayecto y la frecuencia

L_{Atm} : pérdida atmosférica a lo largo de la longitud del trayecto deseado.

6.4 Cálculo del margen disponible

En el cálculo del margen disponible para todo posible receptor del servicio fijo se deben tener en cuenta los cambios de los niveles de la interferencia interior al servicio y exterior que se producen en condiciones de desvanecimiento debido a la lluvia. El cálculo del margen disponible es un procedimiento repetitivo porque depende de la solución del porcentaje real de tiempo en el enlace deseado en el que puede tolerarse el desvanecimiento. El margen disponible para el desvanecimiento debido a la lluvia con la antena receptora i -ésima del servicio fijo en un sistema P-P o en una antena de abonado interior a una célula P-MP se calcula mediante la ecuación (13):

$$M_{Avail_i} = \left(\frac{P_{Rx\ CS}}{N_{Thermal} + I_{Intra\ i} + I_{Inter} + I_{OSG\ Total}} \right) - \left(\frac{C}{N} \right)_{umbral} \quad \text{dB} \quad (13)$$

donde:

- $P_{Rx\ CS}$: P_{RX} de la ecuación (10) u (11) para el nivel de la señal recibida en condiciones de cielo despejado del sistema P-MP o del P-P, según el caso
- $N_{Thermal}$: ruido térmico del sistema en la anchura de banda de referencia (dB(W/MHz)) a la entrada del receptor, calculada con la ecuación (18) del § 6.5
- $I_{Intra\ i}$: interferencia interior al servicio calculada en el i -ésimo posible receptor del servicio fijo para un sistema P-MP o uno P-P, utilizando las ecuaciones (6) a (7) según el caso, o utilizando un modelo de interferencia interior al servicio más elaborado
- I_{Inter} : interferencia entre servicios calculada a partir de la atribución de la interferencia entre servicios a la interferencia producida por el SFS en el receptor del servicio fijo
- $I_{OSG\ Total}$: interferencia externa total recibida por el receptor i -ésimo del servicio fijo interferido por los enlaces espacio-Tierra de todos los satélites OSG (véase el § 6.6), modificada por el desvanecimiento debido a la lluvia en el trayecto oblicuo, si es el caso
- $(C/N)_{umbral}$: relación umbral portadora/ruido del receptor del servicio fijo interferido.

El nivel de la diferencia del margen, ΔM puede calcularse utilizando el valor de M_{Avail} de la ecuación (13) y el valor de M_{Req} de la ecuación (3). La disponibilidad lograda, en presencia de la interferencia externa, es inferior a la disponibilidad de diseño, si ΔM es negativo. En el caso de sistemas P-P, este modelo supone que los enlaces se diseñan para cumplir justamente una disponibilidad de diseño en ausencia de interferencia entre sistemas y que ΔM será negativo en presencia de cualquier interferencia exterior. No obstante, en el caso de sistemas P-M, ΔM puede ser positivo para un gran porcentaje de posibles receptores. Esto se traduce en que los abonados de ciertos emplazamientos de una célula P-MP reciben con una disponibilidad lograda $(100 - p_{Unavail}\%)$ que excede de su disponibilidad de diseño $(100 - p_D\%)$.

Puede calcularse un nuevo valor de $A(p)$, $A_j(p_j)$, a partir de la ecuación (14) siguiente para calcular una nueva disponibilidad lograda que sea igual a $(100 - p_j (\%))$, resolviendo la expresión en p_j , e igualando $A_j(p_j)$ a A_p en la ecuación (42) (o en la ecuación (43) según el caso), de la Recomendación UIT-R P.530:

$$A_j(p_j) = A(p_D) + \Delta M \quad 0,001 \leq p_j \leq 1,0 \quad (14)$$

Debe resolverse el cálculo de la disponibilidad lograda para los posibles receptores del servicio fijo en los que hay un satélite OSG dentro del arco ϕ_m . Cuando los trayectos deseado e interferentes son colineales, debe establecerse la correlación al 100% entre la parte del trayecto que es común a las estaciones terrenales deseada y espacial interferente. Se supone la correlación entre el desvanecimiento debido a la lluvia en el trayecto oblicuo entre el transmisor deseado del servicio fijo y el satélite interferente del SFS OSG con desvanecimiento por el trayecto deseado únicamente cuando el satélite está dentro de ϕ_m del eje de puntería de una posible antena receptora del servicio fijo. En estas condiciones, el porcentaje correspondiente del tiempo $p_{Unavail}$ durante el que la atenuación del trayecto deseado terrenal y del trayecto oblicuo de interferencia se exceden debe ser el mismo. Ha de aplicarse el algoritmo siguiente:

Procedimiento repetitivo para calcular la disponibilidad lograda del receptor del servicio fijo en presencia de una dirección próxima de la interferencia de sistemas de satélites OSG del SFS

Inicio:

Paso 1: Calcular $M_{Req} = A(p_D)$ (ecuación (4))

Paso 2: Iniciar la repetición, $j = 1$

Paso 3: Hacer $p_j = p_D$

Paso 4: Calcular $M_{Avail j}(p_j)$ (ecuación (13)).

Véase que en el valor $I_{OSG i}$, de la ecuación (13) se debe tener en cuenta que las contribuciones de la $I_{OSG i}$ (ecuación 19) en las proximidades del haz principal de la estación del servicio fijo (ϕ_m del § 6.1.1.2) se atenúan en $A(p_j)$ conforme a la ecuación (11) del Paso 10 de la Recomendación UIT-R P.618-6.

$I_{intra i}$, de la ecuación (13) se atenúa únicamente a lo largo del trayecto horizontal deseado del servicio fijo (rebasado durante el porcentaje p_j del tiempo) utilizando la ecuación (42) (o la (43) según el caso) de los Pasos 5 y 6 de la Recomendación UIT-R P.530-8.

Paso 5: Calcular la diferencia del margen, $\Delta M_j = M_{Avail j} - M_{Req}$

Paso 6: Si $\Delta M_j < \text{Umbral de precisión}$, pásese directamente a «Fin»

Si no

Paso 7: Igualar $A(p_{j+1}) = A(p_j) + \Delta M_j = Ap$ conforme a la ecuación (42) (o la (43) según el caso) de la Recomendación UIT-R P.530 y resolver para p_{j+1} .

Paso 8: Si $0,001 \leq p_{j+1} \leq 1,0$, continuar

Si no ir a «Fin»

Paso 9: Calcular un nuevo valor de p_{j+1} que se utilizará en la siguiente repetición.

Dar a p_{j+1} el valor $10^{[(\log(p_{j+1}) + \log(p_j))/2]}$

Paso 10: Aumentar j , fijando j a un valor de $j + 1$

Paso 11: Volver al Paso 4

Fin.

En los casos en que la indisponibilidad de diseño es de 0,001%, la disponibilidad lograda en los casos de $\Delta M = 0$, se fija a un máximo de 99,999% pues no hay un modelo válido de propagación para la atenuación debida a la lluvia rebasada durante el $p < 0,001\%$.

6.5 Cálculo del ruido térmico del sistema

Se entiende que la temperatura de ruido del sistema se compone de las contribuciones del ruido del equipo y del de la antena.

Por definición, la temperatura de ruido del equipo receptor, T_e , se calcula a partir del factor de ruido del sistema mediante la ecuación siguiente:

$$T_e = T_0(10^{F/10} - 1) \quad (15)$$

donde:

T_0 : Temperatura ambiente (K)

F : Factor de ruido del sistema referido a la entrada del receptor (dB)

y la ecuación general de la temperatura de ruido del sistema, T_{Sys} , en condiciones de cielo despejado es:

$$T_{Sys} = 10^{-L_F/10} \cdot T_{Ant} + T_m \cdot (1 - 10^{-L_F/10}) + T_e \quad \text{K} \quad (16)$$

donde por definición, las pérdidas del sistema alimentador del receptor, L_F se fijan en 0 dB, la temperatura media, T_m se fija en T_0 (290 K) y T_{Ant} se pone en T_0 (290 K).

Sustituyendo los valores de L_F , T_m y T_{Ant} que se aplican en la definición del factor de ruido del sistema, la ecuación de T_{Sys} se simplifica:

$$T_{Sys} = T_{Ant} + T_e = 290 + T_e \quad (17)$$

La densidad de ruido térmico del sistema N_0 se calcula utilizando el valor de T_{Sys} de la ecuación (16) anterior por la ecuación siguiente:

$$N_0 = 10 \log(kT_{Sys}) \quad (18)$$

donde:

k : constante de Boltzman = $1,3806 \times 10^{-23}$ J/K.

6.6 Cálculo de la interferencia procedente de los enlaces descendentes de sistemas OSG del SFS en los receptores de los sistemas P-MP y P-P del servicio fijo

El nivel de la interferencia en cada receptor del servicio fijo se calcula para cada satélite visible suponiendo que se transmite con un nivel definido por el usuario que llega hasta el contorno de la dfp adecuado para la banda en cuestión. La metodología es completamente flexible y puede utilizarse con cualquier contorno de la dfp que permita realizar un análisis de la sensibilidad en función de los niveles de la dfp. El nivel máximo de la interferencia de una sola fuente, I_{OSG_j} , rebasado durante el p(%) del tiempo en un receptor del servicio fijo determinado sería:

$$I_{OSG_j}(p) = dfp_j + G_{Rx}(\varphi_{Sj}) - G_{1m^2} - A(p) - L_F - L_{ATM_Sj} - L_{bsj} \quad \text{dB(W/MHz)}$$

$$I_{OSG_Total} = 10 \log \left(\sum_{j=1}^{n_{OSG}} 10^{I_{OSG_j}/10} \right) \quad (19)$$

donde:

j : satélite interferente j -ésimo, $j = 1, 2, \dots, n$

n_{OSG} : número posible total de satélites visibles sobre el horizonte

dfp_j : nivel de la densidad de flujo de potencia aplicada al enlace descendente del satélite GSO j -ésimo, teniendo en cuenta el ángulo de elevación visto desde el receptor del servicio fijo víctima (dB(W/m² · MHz))

$G_{Rx}(\varphi_{Sj})$: ganancia del receptor en la dirección de la fuente de interferencia (dBi) calculada conforme al § 2.2 de la Recomendación UIT-R F.1245, que representa adecuadamente el promedio de los lóbulos laterales de una antena direccional cuando la interferencia procede de fuentes múltiples

φ_{Sj} : ángulo entre la dirección de la señal del servicio fijo deseado y la señal del SFS interferente (grados)

- G_{1m^2} : ganancia de una antena perfecta de 1 m² a la frecuencia de la interferencia ($4\pi/\lambda^2$) (dBi)
- $A(p)$: pérdidas causadas por la atenuación debida a la lluvia excedida durante el p (%) del tiempo en el trayecto oblicuo, en la dirección de un satélite OSG² que vienen dadas por:
- 0, para $\varphi_{Sj} > \varphi_m$
- A_p ³: (calculada conforme a la Recomendación UIT-R P.618), para $\varphi_{Sj} \leq \varphi_m$
- L_F : pérdida del sistema alimentador del receptor del servicio fijo (dB)
- L_{Atm_Sj} : atenuación debida a los gases atmosféricos en el trayecto oblicuo (dB)
- L_{bsj} : atenuación debida a la dispersión del haz en el trayecto espacio-Tierra (dB).

La Nota 7 del *recomienda* 4 de la Recomendación UIT-R F.1245 contiene una fórmula para calcular la ganancia efectiva de una antena direccional del servicio fijo en la dirección de un satélite OSG. Se ha supuesto que cada satélite del SFS OSG transmite el nivel máximo del contorno de la dfp prescrito. Cuando el satélite está en el haz principal de la antena del servicio fijo, dicha antena del servicio fijo está también en el haz principal de la antena del satélite y entonces es aplicable la fórmula de la ganancia efectiva, G_{eff} , teniendo en cuenta la ventaja de la polarización que figura en la Nota 7. Se supone que los satélites transmitirán señales polarizadas circularmente y que los sistemas del servicio fijo utilizarán señales polarizadas linealmente.

En el cálculo de la $G_{Rx}(\varphi_{Sj})$ de la ecuación (19) se supone que ambas polarizaciones ortogonales no se reutilizarán en el mismo haz del mismo satélite. En los satélites que explotan un número separado geográficamente de pequeños haces puntuales dirigidos a grandes estaciones terrenas de cabecera, se ha supuesto que, dadas las limitaciones de potencia y las consideraciones en cuanto al balance del enlace, no se utilizarán canales polarizados ortogonalmente en la misma frecuencia, en los mismos haces.

Al calcular el ángulo de separación, φ_{Si} para los satélites OSG con ángulos de elevación reducidos, puede utilizarse la Recomendación UIT-R P.834 con la altura del receptor del servicio fijo (h_s) agl y el valor calculado de la refracción radioeléctrica en la superficie de la Tierra, N_S ⁴ para determinar el ángulo de elevación aparente del satélite interferente sobre el horizonte de cero grados.

En condiciones de cielo despejado y en una atmósfera real, habrá dos pérdidas de larga duración en el trayecto de interferencia espacio-Tierra desde los satélites del SFS OSG. La primera de estas dos pérdidas es la atenuación debida a los gases atmosféricos en el trayecto oblicuo, L_{Atm_S} , que se calcula conforme a la Recomendación UIT-R P.676. La segunda de estas pérdidas es la de dispersión del haz, L_{bs} , (§ 2.3.2 de la Recomendación UIT-R P.618). Para obtener una estimación prudente de la interferencia del SFS, sólo debe incluirse la atenuación debida a los gases atmosféricos, L_{Atm_S} , como atenuación en el trayecto oblicuo, pues se verá que la atenuación debida a los gases atmosféricos es insignificante en las bandas por encima de 17 GHz. El efecto de la dispersión del haz sólo es significativo con ángulos de elevación muy reducidos y además tiene la

² En los casos en los que hay un satélite del SFS OSG visible en el haz principal de la antena posible de recepción del servicio fijo, el nivel del margen disponible afectará al valor de $A(p)$ y al porcentaje de tiempo p en el que se evalúa A_p . Para más detalles sobre el procedimiento de cálculo repetitivo de p véase el § 6.4.

³ $A(p) = 0$, para el caso de cielo despejado y larga duración en el que $p \geq 20\%$.

⁴ Véase la ecuación (9) de la Recomendación UIT-R P.453.

característica de presentar una desviación típica significativa alrededor de su valor medio. Asimismo, la desviación típica se acerca al valor medio para la elevación de 0. El efecto de la dispersión del haz puede incluirse como una atenuación en el trayecto oblicuo si se desea poner de manifiesto el efecto de la dispersión del haz entre los sistemas del servicio fijo en latitudes superiores, en las que suelen ser característicos los receptores con ángulo de elevación inferior. En esta metodología no se han considerado los efectos a corto plazo de los desvanecimientos profundos y de los aumentos de señal (§ 2.4 de la Recomendación UIT-R P.618-6).

6.7 Análisis para incorporar los efectos de la lluvia en las contribuciones a la interferencia en condiciones de desvanecimiento debido a la lluvia de la señal deseada del servicio fijo

En las bandas de frecuencia por encima de 17 GHz, el efecto de la atmósfera representa un papel significativo en la atenuación de la interferencia espacio-Tierra y varía significativamente dependiendo del emplazamiento real del sistema del servicio fijo interferido. Esta metodología examina únicamente el efecto a largo plazo de la interferencia en condiciones de cielo despejado. Durante las condiciones de desvanecimiento debido a la lluvia, también se atenuará la interferencia espacio-Tierra; no obstante, no habrá una correlación al 100% entre la atenuación en el trayecto de la señal deseada y la atenuación en todos los trayectos de la señal interferente.

Al calcular la disponibilidad lograda en presencia de la interferencia de larga duración del SFS OSG, se supone que la componente de interferencia debida a la OSG puede atenuarse por la lluvia en el trayecto oblicuo que lleva al satélite interferente, pero únicamente si dicho satélite está en el haz principal de la antena de receptor del servicio fijo. Así pues, cuando se calcula el total del ruido más la interferencia del sistema en condiciones de desvanecimiento debido a la lluvia, $(N + I_{Intra} + I_{Inter} + I_{OSG})_{Total\ Rain}$ únicamente la interferencia procedente de los satélites del SFS OSG dentro de ϕ_m del haz principal de la antena del servicio fijo se atenúa en el valor calculado del desvanecimiento debido a la lluvia a lo largo de todo el trayecto oblicuo, hasta niveles significativamente inferiores que dejan fundamentalmente a la interferencia fuera del haz principal aportar su contribución al total de ruido más la interferencia $(N + I_{Intra} + I_{Inter} + I_{OSG})_{Total\ Rain}$ ⁵. Ésta es una hipótesis razonable, pues probablemente habrá también cierta atenuación en la dirección de otros satélites. La Recomendación UIT-R P.618 se aplica a todo el trayecto oblicuo que se inicia en un punto determinado a la altitud h_s (amsl) para un ángulo de elevación determinado, a través de toda la atmósfera. No incluye ninguna previsión de incorporar ninguna correlación (o falta de ella) entre las altitudes bajas y las altas a lo largo del mismo trayecto oblicuo a través de la atmósfera. Como mínimo, la atenuación debida a la lluvia a lo largo del trayecto entre la antena receptora del servicio fijo y la antena transmisora del servicio fijo, común a la señal deseada del servicio fijo y a la interferencia del SFS OSG (cuando la estación espacial está en el haz principal) debe guardar una correlación del 100%. Sólo es en el trayecto, que va más allá de la antena transmisora del servicio fijo (es decir, entre la fuente de la señal deseada y la estación espacial interferente) que no se conoce la correlación entre el desvanecimiento a lo largo del trayecto y el desvanecimiento en el trayecto de la señal deseada.

En el caso de la interferencia interior al servicio procedente de otros sistemas del servicio fijo, la componente de dicha interferencia interior al servicio puede no resultar atenuada con la misma intensidad que el desvanecimiento en el trayecto de la señal deseada durante condiciones de lluvia. La interferencia interior al servicio tenderá a proceder de enlaces que tengan su origen en múltiples direcciones, distancias y azimuts diferentes.

⁵ Que se define por el ángulo fuera del eje de puntería de una antena del servicio fijo con el modelo de la Recomendación UIT-R F.1245.

Así pues, dadas las dos hipótesis prudentes en relación con las contribuciones respectivas de la interferencia entre sistemas e interior al servicio al ruido total del sistema durante la lluvia, el margen de desvanecimiento disponible debe ser mayor que el que se calcula utilizando esta metodología y, como consecuencia de ello, la disponibilidad calculada que se logre debe subestimarse de forma prudente.

7 Interpretación de las estadísticas resultantes de la disponibilidad que se obtienen por la aplicación de la metodología y formas posibles de expresar los criterios de compartición

Las dos configuraciones del sistema del servicio fijo, P-MP y P-P, son muy distintas y resultan afectadas diferentemente por la interferencia espacio-Tierra. De esta manera, los criterios con los que se mide la aceptabilidad de la interferencia son también distintos. En los sistemas P-MP con un porcentaje de posibles receptores del servicio fijo en los que se excede el margen, habrá una proporción considerable de posibles receptores que rebasen su disponibilidad de diseño. No obstante, los sistemas P-P están concebidos sobre una base de enlace por enlace y por tanto, la disponibilidad de los receptores del servicio fijo en presencia de interferencia externa será inferior a la disponibilidad de diseño en ausencia de la interferencia exterior. En las bandas compartidas, dichos enlaces deben concebirse con un margen para la interferencia entre servicios que tengan en cuenta la interferencia exterior.

Se requiere una forma ilustrativa de expresar el efecto de la interferencia espacio-Tierra en las dos configuraciones distintas del sistema del servicio fijo. El Cuadro 3 ofrece una forma posible de expresar el criterio que debe cumplir el SFS en cuanto al efecto en el servicio fijo.

CUADRO 3

Parámetros utilizados para expresar el criterio de compartición

Parámetros utilizados para expresar el criterio de compartición en los sistemas P-MP

Calidad del sistema del servicio fijo sin interferencia del SFS (indisponibilidad de diseño del sistema)	$X_0\%$
Calidad del sistema del servicio fijo en presencia de interferencia del SFS	
Aumento de la indisponibilidad en porcentaje de la indisponibilidad de diseño	$X_j\%$
Porcentaje de los posibles receptores del servicio fijo que cumplen o rebasan la disponibilidad degradada « $U_j = (100 - X_0 - X_j X_0/100)\%$ » en presencia de interferencia del SFS	$W_j\%$
$j = 1, \dots, m$ ($m =$ pendiente de determinar)	

Parámetros utilizados para expresar el criterio de compartición en los sistemas P-P

Calidad del sistema del servicio fijo sin interferencia del SFS (indisponibilidad de diseño del sistema)	$Z_0\%$
Calidad del sistema del servicio fijo en presencia de interferencia del SFS	
Aumento medio de la indisponibilidad en porcentaje de la indisponibilidad de diseño	$Z_k\%$
Porcentaje de los posibles receptores del servicio fijo que cumplen o rebasan la disponibilidad degradada « $V_k = (100 - Z_0 - Z_k Z_0/100)\%$ » en presencia de interferencia del SFS	$Y_k\%$
$k = 1, \dots, n$ ($n =$ pendiente de determinar)	

W_j e Y_k se asociarán a los percentilos de los posibles receptores para los sistemas P-MP y P-P, respectivamente, de forma que se minimicen los aumentos de la indisponibilidad X_j y Z_k asociados a los posibles receptores restantes $(100 - W_j)\%$ y $(100 - Y_k)\%$.

En el Cuadro 3, dado un aumento de los porcentajes posibles de receptores $W_{j+1} > W_j$ y $Y_{k+1} > Y_k$ los aumentos resultantes de la indisponibilidad se traducen en $X_{j+1} > X_j$ y $Z_{k+1} > Z_k$.

El modelo considera la disponibilidad del sistema del servicio fijo en presencia de la interferencia de los satélites del SFS OSG en un entorno del que la atenuación debida a la precipitación es el límite predominante en la disponibilidad del sistema del servicio fijo.

Véase que en el Cuadro 3, en el caso de los P-MP, pueden diseñarse los sistemas con niveles distintos de disponibilidad $(100 - X_0)\%$. En presencia de interferencia del SFS, la distribución estadística de los aumentos porcentuales de la indisponibilidad X_j asociada a los porcentajes de receptores del servicio fijo afectados, W_j , dependerá de la disponibilidad de diseño $(100 - X_0)\%$. Así pues, el porcentaje de receptores W_j que cumplen o rebasan la disponibilidad degradada, U_j depende del valor de X_0 . Los valores de W_j son objetivos de diseño con los que debe compararse la calidad, siguiendo únicamente una aplicación repetitiva de la metodología. Se requiere un acuerdo sobre el porcentaje de receptores del servicio fijo, W_j que cumple o rebasa los diversos niveles de disponibilidad degradada. Para un sistema P-P con valores determinados de la disponibilidad de diseño $(100 - Z_0)\%$, los valores de Y_k asociados a los distintos niveles de disponibilidad degradada, V_k , se determinan de forma similar. Esta Recomendación no da valores de W , X , Y y Z , por lo que debe aportarlos el usuario de la metodología como criterios de compartición.
