Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R P.1622-1
(08/2022)

Métodos de predicción requeridos para el diseño de sistemas Tierra-espacio que funcionan entre 20 THz y 375 THz

Serie P

Propagación de las ondas radioeléctricas

Unión Internacional de Telecomunicaciones

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 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	Radioastronomía
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, 2023

© UIT 2023

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 P.1622-1*

Métodos de predicción requeridos para el diseño de sistemas Tierra-espacio que funcionan entre 20 THz y 375 THz

(2003-2022)

Cometido

En la presente Recomendación se describen los efectos en la propagación aplicables a la planificación de sistemas Tierra-espacio que funcionan entre 20 y 375 THz. Se proporcionan los métodos de predicción de la propagación para los efectos de las dispersiones Rayleigh y Mei, y de las turbulencias atmosféricas. También se alude a la Recomendación UIT-R P.676, en la que se facilitan métodos de predicción para pérdidas por absorción atmosférica.

Palabras clave

Absorción atmosférica, turbulencias, centelleo de amplitud, dispersión Rayleigh, dispersión Mie

Recomendaciones UIT-R conexas

Recommendación UIT-R P.676

Recommendación UIT-R P.1621

NOTA – Debe utilizarse la revisión o edición más reciente de la Recomendación.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

a) que el espectro comprendido entre 20 THz y 375 THz es adecuado para ciertas comunicaciones espaciales en el espacio cercano y en el lejano;

b) que para planificar correctamente los sistemas Tierra-espacio que funcionan entre 20 THz y 375 THz es necesario disponer de técnicas de predicción de la propagación adecuadas;

c) que se han elaborado métodos para predecir los efectos más importantes de la propagación sobre los sistemas Tierra-espacio que funcionan en la banda comprendida entre 20 THz y 375 THz;

d) que estos métodos se han contrastado, en la medida de lo posible, con los datos disponibles y han demostrado tener una precisión compatible con la variabilidad natural de los fenómenos de propagación, y adecuada para la mayoría de las aplicaciones actuales en la planificación de los sistemas que funcionan entre 20 THz y 375 THz,

reconociendo

que el número 78 del Artículo 12 de la Constitución de la UIT estipula que uno de los cometidos del Sector de Radiocomunicaciones es «... realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones ...»,

* La Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones introdujo en junio de 2024 enmiendas de forma a esta Recomendación con arreglo a lo dispuesto en la resolución UIT-R 1.

recomienda

que en la planificación de los sistemas Tierra-espacio se utilicen los métodos que figuran en los Anexos 1 y 2 para la predicción de los efectos de la propagación sobre dichos sistemas, de acuerdo con los correspondientes límites de validez allí indicados.

NOTA 1 – En la Recomendación UIT-R P.1621 figura más información sobre datos fundamentales de la propagación para frecuencias comprendidas entre 20 THz y 375 THz.

Anexo 1

1 Introducción

La atmósfera de la Tierra es compleja y dinámica, y afectará al funcionamiento de los sistemas que funcionen en la gama de frecuencias de 20 THz a 375 THz entre la Tierra y un vehículo espacial en órbita. Los efectos sobre los sistemas son, entre otros:

– la atenuación total de la amplitud de la señal, debida a la absorción por las moléculas de gases atmosféricos que se encuentran en el trayecto de propagación;

– la atenuación total de la amplitud de la señal y el aumento del ruido de fondo, como consecuencia de la dispersión producida por partículas de tamaño comprendido entre una fracción de longitud de onda y muchas longitudes de onda, que se encuentran en el trayecto de propagación;

– las fluctuaciones de amplitud y fase de la señal recibida, debidas a las turbulencias causadas por las variaciones térmicas de la atmósfera.

En los puntos siguientes de este Anexo se ofrecen las técnicas y ecuaciones representativas necesarias para elaborar los métodos de predicción necesarios.

2 Atenuación debida a la absorción

Para calcular la absorción atmosférica se puede utilizar un método de raya por raya similar al que se describe en la Recomendación UIT-R P.676. Sin embargo, este método es engorroso y requiere un gran número de cálculos, ya que hay miles de rayas en la gama de frecuencias comprendida entre 10 THz y 1 000 THz (entre 30 μm y 0,3 μm). Los astrónomos determinan las ventanas de absorción atmosférica débil mediante filtros normalizados, según se describe en el Cuadro 1. Las frecuencias centrales de estos filtros sirven para calcular las regiones del espectro que se pueden utilizar para la comunicación por trayectos Tierra-espacio, teniendo en cuenta únicamente las características de la absorción de la atmósfera. Dado que la absorción depende en parte de la temperatura, de la presión y de la composición química locales de la atmósfera, la anchura de banda de los filtros no corresponde necesariamente con la anchura de banda de las regiones de absorción atmosférica débil. Las cuatro bandas de frecuencias más altas representan un continuum del espectro visible y ultravioleta con absorción atmosférica relativamente reducida, en lugar de regiones distintas de absorción débil. Siempre que sea posible, antes de instalar una estación terrena se medirá la absorción atmosférica.

CUADRO 1

Filtros astronómicos normalizados para frecuencias superiores a 15 THz

Filtro	Q	N	M	L′	L	K	H
Frecuencia central (THz)	15	30	63	79	86	136	180
Longitud de onda (μm)	20,25	10,1	4,80	3,80	3,50	2,20	1,65
Anchura de banda (THz) (μm)	15,2 6,50	18,2 5,70	15,9 1,20	14,7 0,70	17,3 0,70	30,1 0,48	33,3 0,30
Filtro	J	I_J	I_S	R	V	B	U
Frecuencia central (THz)	240	330	370	430	560	700	830
Longitud de onda (μm)	1,25	0,90	0,80	0,70	0,54	0,43	0,36
Anchura de banda (THz) (μm)	74,7 0,38	90,5 0,24	115,1 0,24	138,1 0,22	93,2 0,09	164,5 0,10	163,6 0,07

3 Atenuación debida a la dispersión

La dispersión se define generalmente como la desviación de energía producida por las partículas que se encuentran en el trayecto de propagación. Los principales efectos sobre los sistemas de comunicación en el espacio libre que utilizan frecuencias comprendidas entre 20 THz y 375 THz son debidos a:

– partículas de diámetro aproximadamente igual a la longitud de onda de la señal transmitida, que se encuentran en el trayecto de propagación y desvían parte de la energía transmitida de su trayecto original;

– partículas de diámetro muy inferior a la longitud de onda transmitida, que se encuentran en el medio de propagación y desvían hacia el receptor energía ajena a la señal transmitida.

3.1 Atenuación de la señal transmitida debida a la dispersión Mie

La dispersión Mie es la fuente predominante de atenuación en frecuencias inferiores a 375 THz, y es debida principalmente a la presencia de partículas microscópicas de agua.

Cuando no se dispone de mediciones de las características atmosféricas, se puede utilizar el método para calcular la atenuación debida a la dispersión en trayectos Tierra-espacio que se describe a continuación. Si se dispone de esas medidas, se puede utilizar el método de cálculo que se describe detalladamente en el Anexo 2.

El método es adecuado para estaciones terrenas situadas entre 0 y 5 km de altura sobre el nivel del mar con funcionamiento en frecuencias comprendidas entre 150 y 375 THz, que son las frecuencias más utilizadas para las telecomunicaciones en el espacio libre. El método tiene una precisión de aproximadamente 0,1 dB para ángulos de elevación superiores a 45°. Sin embargo es posible que las condiciones atmosféricas locales puedan dar lugar a variaciones de varios dB.

Es preciso conocer los siguientes parámetros:

λ: longitud de onda (μm)

h_E: altura de la estación terrena sobre el nivel medio del mar (km)

θ: ángulo de elevación (grados).

Paso 1: Cálculo de los coeficientes empíricos en función de la longitud de onda:

$$a = 0,000487\lambda^3 - 0,002237\lambda^2 + 0,003864\lambda - 0,004442 \quad (1a)$$

$$b = -0,00573\lambda^3 + 0,02639\lambda^2 - 0,04552\lambda + 0,05164 \quad (1b)$$

$$c = 0,02565\lambda^3 - 0,1191\lambda^2 + 0,20385\lambda - 0,216 \quad (1c)$$

$$d = -0,0638\lambda^3 + 0,3034\lambda^2 - 0,5083\lambda + 0,425 \quad (1d)$$

Paso 2: Cálculo del índice de extinción, τ', de h_E a ∞:

$$\tau' = a\ h_E^3 + b\ h_E^2 + c\ h_E + d \quad \text{Np} \quad (2)$$

Paso 3: Cálculo de la atenuación atmosférica debida a la dispersión, A_S, en el trayecto:

$$A_S = \frac{4,3429\tau'}{\text{sen}(\theta)} \quad \text{dB} \quad (3)$$

3.2 Aumento del ruido de fondo debido a la dispersión de Rayleigh de la energía solar

La dispersión de Rayleigh es insignificante para los sistemas que utilizan frecuencias por debajo de 375 THz. Por encima de esta frecuencia, el efecto más importante de la dispersión de Rayleigh es la introducción de ruido de fondo en los receptores. El ruido de fondo aparece en ambos sentidos, Tierra-espacio y espacio-Tierra. La principal fuente de ruido en las estaciones terrenas que utilizan vehículos espaciales es la dispersión de Rayleigh de la luz solar durante el día. Los vehículos espaciales que apuntan hacia la Tierra también recibirán ruido procedente de la dispersión de la luz solar en la superficie de la Tierra.

4 Efectos de las turbulencias sobre los sistemas que utilizan frecuencias comprendidas entre 20 THz y 375 THz

Según se describe en la Recomendación UIT-R P.1621, las turbulencias se miden en términos del perfil de C_n^2.

Los efectos de las turbulencias pueden clasificarse en:

– centelleo de amplitud debido a la redistribución de energía en el haz;

– cambio aparente en el ángulo de llegada de la señal entrante;

– fluctuación lenta del haz que causa que el centroide del haz se desvíe del eje de propagación;

– ensanchamiento del haz debido a la refracción desigual a lo largo del frente de onda que da lugar a una disminución de potencia en el plano de la abertura de la antena receptora.

4.1 Centelleo de amplitud

Las turbulencias a frecuencias comprendidas entre 150 THz y 375 THz provocan fluctuaciones de distribución gaussiana en la irradiancia logarítmica, *N*, de la onda entrante, efecto conocido como centelleo, redistribuyendo espacialmente de manera aleatoria en el tiempo su potencia a lo largo de la superficie del frente de onda.

La intensidad del centelleo se mide mediante la varianza de la amplitud del haz. Para calcular la intensidad del centelleo se necesitan los parámetros siguientes:

h_0: altura de la estación terrena sobre el nivel del suelo (m)

λ: longitud de onda

θ: ángulo de elevación

Z: altura real de las turbulencias (normalmente 20 000 m).

Tradicionalmente, el centelleo se expresa en función de la varianza, σ^2, de $\ln(N)$:

$$\sigma^2_{\ln N} = 2{,}253 k^{7/6} \sec^{11/6} \varphi \int_{h_0}^{Z} C_n^2(h) h^{5/6} \, \mathrm{d}\, h \qquad \mathrm{Np}^2 \qquad (4a)$$

siendo:

k: número de onda ($= 2\pi/\lambda$)

λ: longitud de onda (m)

φ: ángulo cenital

h: altura sobre el nivel del suelo (m).

O lo que es lo mismo:

$$\sigma^2_{\ln N} = \frac{1{,}924 \times 10^8 \int_{h_0}^{Z} C_n^2(h) \, (h - h_0)^{5/6} \, \mathrm{d}\, h}{\lambda^{7/6} \mathrm{sen}^{11/6} \theta} \qquad \mathrm{Np}^2 \qquad (4b)$$

donde la longitud de onda, λ, se expresa en μm y los otros parámetros como anteriormente.

Si se desea, es muy fácil convertir a dBN de fluctuación, multiplicando el coeficiente del numerador por la relación de cambio de base y un factor 10, obteniéndose así:

$$\sigma^2_{\mathrm{dB}N} = \left(\frac{10}{\ln(10)} \right)^2 \sigma^2_{\ln N} = \frac{3{,}622 \times 10^9 \int_{h_0}^{Z} C_n^2(h) \, (h - h_0)^{5/6} \, \mathrm{d}\, h}{\lambda^{7/6} \mathrm{sen}^{11/6} \theta} \qquad \mathrm{dB}^2 \qquad (4c)$$

Si no se dispone de mediciones locales de C_n^2, se puede utilizar el perfil de $C_n^2(h)$, descrito en el § 5.1.1 de la Recomendación UIT-R P.1621.

En el Cuadro 2 se muestran ejemplos para algunas frecuencias de la región espectral comprendida entre 10 THz y 1 000 THz (30 μm y 0,3 μm). Los valores de $\sigma^2_{\ln N}$ y $\sigma^2_{\mathrm{dB}N}$, para cada frecuencia se han calculado suponiendo que la estructura de la turbulencia es la descrita en el § 5.1.1 de la Recomendación UIT-R P.1621, que el tamaño de la apertura es menor que la longitud de coherencia atmosférica, r_0, que el ángulo de elevación es de 75°, que la antena de la estación terrena está situada a 5,5 m sobre el suelo y que el valor eficaz de la velocidad del viento en el trayecto vertical, v_{rms}, son de 21 m/s y 30 m/s.

CUADRO 2

Ejemplo de estadísticas de centelleo para $C_0 = 1.7\times10^{-14}$ $m^{-2/3}$

Frecuencia (THz)	Longitud de onda (μm)	$\sigma^2_{\ln N}$	$\sigma^2_{dB\,N}$	$\sigma^2_{\ln N}$	$\sigma^2_{dB\,N}$
		(v_{rms} = 21 m/s)		(v_{rms} = 30 m/s)	
563,9	0,532	0,23	4,35	0,36	6,84
352,9	0,850	0,13	2,52	0,21	3,96
282,0	1,064	0,10	1,94	0,16	3,05
193,5	1,55	0,07	1,25	0,10	1,97

4.1.1 Centelleo de amplitud en los trayectos Tierra-espacio

La varianza de la irradiancia logarítmica en los trayectos Tierra-espacio σ^2_{E-s} es la misma (<<4). Se ha comprobado experimentalmente que la probabilidad de que se supere este límite es muy baja. Normalmente el valor de $\sigma^2_{\ln N}$ se reduce en dos órdenes de magnitud cuando la frecuencia aumenta de 24 THz a 750 THz (12,5 μm a 0,4 μm).

Por lo general, el efecto de promediado debido a la apertura de la antena no se tiene en cuenta en los trayectos Tierra-espacio. Los frentes de onda que salen de la atmósfera experimentan la misma redistribución espacial de la energía en su superficie que en el sentido espacio-Tierra. Sin embargo, la difracción del frente de onda, al propagarse por el espacio, hace que se extiendan las perturbaciones de amplitud y fase a través de zonas extensas. Así pues, el radio de coherencia de fase en la apertura de la antena receptora de un vehículo espacial es mucho mayor que el tamaño probable de esta apertura (< 1 m). Por consiguiente, no se produce un promediado de la apertura y el centelleo en el receptor viene dado por la expresión:

$$\sigma^2_{E-s} = \sigma^2_{\ln N} \qquad \text{Np}^2 \tag{5}$$

A 150 THz (2,0 μm) y con un valor $\sigma^2_{\ln N}$ próximo a 0,15, se producen desvanecimientos de 4 dB cada 1% del tiempo aproximadamente, con una frecuencia y una duración de unos 150 Hz y 10^{-5} s.

4.1.2 Centelleo de amplitud en los trayectos espacio-Tierra

El impacto del centelleo en los trayectos espacio-Tierra puede limitar gravemente el funcionamiento de los receptores. Si la apertura del receptor es mayor que la longitud de coherencia atmosférica, r_0, el efecto del centello se promedia espacialmente a lo largo de la apertura, lo que da lugar a una reducción de $\sigma^2_{\ln N}$. Aunque la promediación de la apertura puede reducir los efectos del centelleo de amplitud, la distorsión de fase puede degradar considerablemente el funcionamiento de los sistemas receptores ópticos de modo espacial único, tales como el de detección coherente o el de detección directa preamplificada.

El valor de $\sigma^2_{\ln N}$ en los trayectos espacio-Tierra, σ^2_{s-E} queda modificado por un factor de promediado de la apertura, *A*. Dicho factor se define como la razón entre la varianza de la irradiancia logarítmica obtenida a partir de una apertura receptora de tamaño finito y el valor correspondiente obtenido a partir de una apertura puntual, calculándose de la siguiente manera:

Paso 1: Cálculo de la altura de escala de la turbulencia, z_0:

$$z_0 = \left[\frac{\int_{h_0}^{Z} C_n^2(h) h^2 \, \mathrm{d}h}{\int_{h_0}^{Z} C_n^2(h) h^{5/6} \, \mathrm{d}h} \right]^{6/7} \quad \text{m} \tag{6}$$

siendo:

h_0: altura de la estación terrena sobre el nivel del suelo (m)

h: altura sobre el nivel del suelo (m)

Z: altura real de las turbulencias sobre el nivel del suelo (normalmente 20 000 m).

Paso 2: Cálculo del factor de promediación de la apertura, A:

$$A = \frac{1}{1 + 1{,}1 \times 10^7 \left(\frac{D^2 \operatorname{sen} \theta}{z_0 \lambda} \right)^{7/6}} \tag{7}$$

siendo:

D: diámetro de la apertura de la estación terrena (m)

θ: ángulo de elevación

λ: longitud de onda (μm).

Paso 3: Cálculo de la varianza de la irradiancia logarítmica en el trayecto espacio-Tierra, σ_{s-E}^2:

$$\sigma_{s-E}^2 = A \sigma_{\ln N}^2 \quad \text{Np}^2 \tag{8}$$

4.2 Ángulo de llegada

Las fluctuaciones producidas por las turbulencias en el ángulo aparente de llegada del haz recibido se deben a las variaciones de los índices de refracción en las bolsas de aire que se encuentran en el trayecto de propagación. Los efectos de estas fluctuaciones son despreciables en el sentido Tierra-espacio. El valor eficaz del ángulo de incidencia es normalmente del orden de 1 μrad y por lo tanto tiene muy poco efecto. Sin embargo, en el sentido espacio-Tierra este valor eficaz es del orden de varios μrad y debe tenerse en cuenta.

El método que se describe a continuación puede utilizarse para calcular la varianza del ángulo de incidencia, σ_β^2, en los trayectos espacio-Tierra a través de un determinado perfil de turbulencia, C_n^2, para ángulos de elevación superiores a 45°. Es preciso conocer los siguientes parámetros:

h_0: altura de la estación terrena sobre el nivel del suelo (m)

θ: ángulo de elevación

D_R: diámetro de la apertura del receptor (m)

Z: altura real de las turbulencias (normalmente 20 000 m).

Paso 1: Cálculo del perfil vertical de turbulencia de la atmósfera. Cuando no se pueda conseguir estadísticas a largo plazo de las fuentes de datos locales, se puede calcular una estimación según el método descrito en el § 5.1.1 de la Recomendación UIT-R P.1621.

Paso 2: Cálculo del perfil de turbulencia integrado, ζ:

$$\zeta = \int_{h_0}^{Z} C_n^2(h)\,\mathrm{d}\,h \qquad \mathrm{m}^{1/3} \tag{9}$$

siendo h la altura sobre el nivel del suelo (m).

Cuando no se disponga de mediciones locales del perfil C_n^2 integrado, la aproximación empírica de las ecuaciones (9) a (12) de la Recomendación UIT-R P.1621, ofrece resultados satisfactorios para la mayoría de las aplicaciones.

Paso 3: Cálculo de la varianza del ángulo de llegada, σ_β^2:

$$\sigma_\beta^2 = \frac{2{,}914\ \zeta\ D_R^{-1/3}}{\operatorname{sen}\theta} \qquad \mathrm{rad}^2 \tag{10}$$

A lo largo de los trayectos en el sentido espacio-Tierra, la divergencia del haz y las grandes distancias de propagación por el espacio libre harán que el frente de onda sea mucho mayor que r_0 cuando éste llegue a las turbulencias. Por consiguiente, los efectos de la atmósfera se promedian a través del ancho del haz. El término para el tamaño de la antena de la ecuación (11) representa la fracción del haz que ve la estación terrena.

4.3 Fluctuación lenta del haz

La fluctuación lenta del haz es la desviación del haz respecto a su dirección de propagación. Esta fluctuación es importante en el sentido Tierra-espacio y puede ser del orden del ancho del haz. A una distancia L, el valor eficaz de la desviación del haz con fluctuación, r_c, es:

$$\sigma_{rc} = 2\,080 \cdot L \sqrt{\frac{\int_{h_0}^{Z} C_n^2(h)\,\mathrm{d}\,h}{D_T^{1/3}\operatorname{sen}(\theta)}} \qquad \mathrm{m} \tag{11a}$$

siendo:

L: distancia de propagación de la estación terrena al satélite (km)

D_T: diámetro de la apertura del receptor (m)

h_0: altura de la estación terrena sobre el nivel del suelo (m)

h: altura sobre el nivel del suelo (m)

Z: altura real de las turbulencias (normalmente 20 000 m).

El valor eficaz del desplazamiento angular, ω_c, del haz con fluctuación lenta puede calcularse eliminando de la ecuación la longitud del trayecto de propagación:

$$\sigma_{\omega c} = \frac{\sigma_{rc}}{L \times 10^3} = 2{,}08 \sqrt{\frac{\int_{h_0}^{Z} C_n^2(h)\,\mathrm{d}\,h}{D_T^{1/3}\operatorname{sen}(\theta)}} \qquad \mathrm{rad} \tag{11b}$$

Cuando no se disponga de mediciones locales del perfil C_n^2 integrado, la aproximación empírica de las ecuaciones (9) a (12) de la Recomendación UIT-R P.1621, ofrece resultados satisfactorios para la mayoría de las aplicaciones.

Es posible reducir la fluctuación lenta del haz en el sentido Tierra-espacio utilizando múltiples haces o un emisor controlado por un dispositivo de seguimiento. La fluctuación lenta del haz no supone un problema importante en el sentido espacio-Tierra. Los haces que viajan en este sentido sólo se propagan a través de turbulencias en los últimos 10 ó 20 km del trayecto.

4.4 Dispersión del haz

La dispersión del haz es el aumento del diámetro del haz, además de la producida por la divergencia, como consecuencia de la propagación a través de turbulencias presentes en la atmósfera. El efecto de la dispersión es una disminución del nivel de la potencia que llega al receptor, debido a que la energía transmitida se dispersa sobre una zona más grande. Ahora bien, la dispersión provocada por la atmósfera es normalmente muy pequeña comparada con la divergencia, y por lo tanto no supone una atenuación importante de la señal en ninguno de los dos sentidos, Tierra-espacio o espacio-Tierra.

Anexo 2

Cálculo detallado de la atenuación debida a la dispersión de Rayleigh y de Mie

Cuando se dispone de mediciones de las características atmosféricas, se puede utilizar el método que se describe a continuación para calcular la atenuación en los trayectos Tierra-espacio. Los parámetros necesarios para este modelo son:

λ: longitud de onda (μm)

h_E: altura de la estación terrena sobre el nivel del mar (km)

θ: ángulo de elevación.

Paso 1: Cálculo del coeficiente de la dispersión de Rayleigh, β_R, en incrementos de 1 km desde la altura de la estación terrena hasta 30 km sobre el nivel del mar:

$$\beta_R(h) = \sigma_R n_R(h) \times 10^3 \qquad \text{km}^{-1} \tag{12}$$

siendo:

σ_R: sección transversal de la dispersión de Rayleigh (m^2)

$n_R(h)$: densidad atmosférica (m^{-3}).

Por encima de 30 km los efectos de la dispersión de Rayleigh son insignificantes. Cuando no se dispone de valores medidos de σ_R se utilizan los valores normales para una atmósfera de referencia que figuran en el Cuadro 3. Cuando no se dispone de valores medidos de n_R se utilizan los valores normales para una atmósfera de referencia que figuran en el Cuadro 4.

Paso 2: Cálculo del coeficiente de la dispersión de Mie, β_A, (es decir, aerosol) en incrementos de 1 km desde la altura de la estación terrena hasta 30 km sobre el nivel del mar:

$$\beta_A(h) = \frac{\beta_A(0)\, n_A(h)}{n_A(0)} \qquad \text{km}^{-1} \tag{13}$$

siendo:

$\beta_A(0)$: coeficiente de dispersión de los aerosoles al nivel del mar (km^{-1})

$n_A(h)$: densidad del número de aerosoles a una altura igual a h km sobre el nivel del mar (m^{-3}).

Cuando no se dispone de mediciones a nivel del mar de β_A se utilizan los valores correspondientes a una atmósfera de referencia que figuran en el Cuadro 3. Cuando no se dispone de valores medidos de n_A se utilizan los valores correspondientes a una atmósfera de referencia que figuran en el Cuadro 4.

CUADRO 3

Secciones transversales de dispersión de Rayleigh, σ_R y coeficiente de dispersión Mie a nivel del mar, $\beta_A(0)$, para varias longitudes de onda

Longitud de onda (μm)	**σ_R[1] (m^2)**	**$\beta_A(0)$[2] (km^{-1})**	**Longitud de onda (μm)**	**σ_R[1] (m^2)**	**$\beta_A(0)$[2] (km^{-1})**
0,50	$6{,}735 \times 10^{-31}$	0,167	1,06	$3{,}320 \times 10^{-32}$	0,113
0,55	$4{,}563 \times 10^{-31}$	0,158	1,26	$1{,}600 \times 10^{-32}$	0,108
0,60	$3{,}202 \times 10^{-31}$	0,150	1,67	$5{,}210 \times 10^{-33}$	0,098
0,65	$2{,}313 \times 10^{-31}$	0,142	2,17	$1{,}800 \times 10^{-33}$	0,085
0,70	$1{,}713 \times 10^{-31}$	0,135	3,50	$2{,}681 \times 10^{-34}$	0,070
0,80	$9{,}989 \times 10^{-32}$	0,127	4,00	$1{,}571 \times 10^{-34}$	0,063
0,90	$6{,}212 \times 10^{-32}$	0,120			

[1] Los valores de σ_R para longitudes de onda no incluidas en este Cuadro se pueden interpolar suponiendo una relación logarítmica lineal.

[2] Los valores de $\beta_A(0)$ para longitudes de onda no incluidas en este Cuadro se pueden interpolar suponiendo una relación de ley potencial.

CUADRO 4

Densidades del número de aerosoles, n_A, y densidades atmosféricas, n_R, para varias alturas sobre el nivel del mar

Altura (km)	n_A (m^{-3})	n_R (m^{-3})	Altura (km)	n_A (m^{-3})	n_R (m^{-3})
0	$2{,}0 \times 10^{8}$	$2{,}548 \times 10^{25}$	16	$6{,}7 \times 10^{4}$	$3{,}462 \times 10^{24}$
1	$8{,}7 \times 10^{7}$	$2{,}312 \times 10^{25}$	17	$7{,}3 \times 10^{4}$	$2{,}959 \times 10^{24}$
2	$3{,}8 \times 10^{7}$	$2{,}093 \times 10^{25}$	18	$8{,}0 \times 10^{4}$	$2{,}530 \times 10^{24}$
3	$1{,}6 \times 10^{7}$	$1{,}891 \times 10^{25}$	19	$9{,}0 \times 10^{4}$	$2{,}163 \times 10^{24}$
4	$7{,}2 \times 10^{6}$	$1{,}704 \times 10^{25}$	20	$8{,}6 \times 10^{4}$	$1{,}849 \times 10^{24}$
5	$3{,}1 \times 10^{6}$	$1{,}532 \times 10^{25}$	21	$8{,}2 \times 10^{4}$	$1{,}574 \times 10^{24}$
6	$1{,}3 \times 10^{6}$	$1{,}373 \times 10^{25}$	22	$8{,}0 \times 10^{4}$	$1{,}341 \times 10^{24}$
7	$4{,}0 \times 10^{5}$	$1{,}227 \times 10^{25}$	23	$7{,}6 \times 10^{4}$	$1{,}144 \times 10^{24}$
8	$1{,}4 \times 10^{5}$	$1{,}093 \times 10^{25}$	24	$5{,}2 \times 10^{4}$	$9{,}760 \times 10^{23}$
9	$5{,}0 \times 10^{4}$	$9{,}713 \times 10^{24}$	25	$3{,}6 \times 10^{4}$	$8{,}335 \times 10^{23}$
10	$2{,}6 \times 10^{4}$	$8{,}599 \times 10^{24}$	26	$2{,}5 \times 10^{4}$	$7{,}123 \times 10^{23}$
11	$2{,}3 \times 10^{4}$	$7{,}586 \times 10^{24}$	27	$2{,}4 \times 10^{4}$	$6{,}092 \times 10^{23}$
12	$2{,}1 \times 10^{4}$	$6{,}487 \times 10^{24}$	28	$2{,}2 \times 10^{4}$	$5{,}214 \times 10^{23}$
13	$2{,}3 \times 10^{4}$	$5{,}544 \times 10^{24}$	29	$2{,}0 \times 10^{4}$	$4{,}466 \times 10^{23}$
14	$2{,}5 \times 10^{4}$	$4{,}739 \times 10^{24}$	30	$1{,}9 \times 10^{4}$	$3{,}848 \times 10^{23}$
15	$4{,}1 \times 10^{4}$	$4{,}050 \times 10^{24}$			

NOTA 1 – Los valores n_A y n_R para altitudes no incluidas en este Cuadro se pueden interpolar linealmente .

Paso 3: Cálculo del coeficiente de extinción atmosférica, β_T, para cada altura desde la altura de la estación terrena hasta 30 km sobre el nivel del mar:

$$\beta_T(h) = \beta_R(h) + \beta_A(h) \qquad \text{km}^{-1} \tag{14}$$

Paso 4: Cálculo de la razón de extinción atmosférica τ'_T para cada altura desde la altura de la estación terrena hasta 30 km sobre el nivel del mar:

$$\tau'_T = \sum_{h=h_0}^{30} \overline{\beta_T}(h)\, \Delta h \tag{15}$$

siendo:

h_E: Altura de la estación terrena sobre el nivel del mar (km)

$\overline{\beta_T}(h)$: valor medio de $\beta_T(h)$ y $\beta_T(h-1)$ (km^{-1})

Δh: distancia entre h y $h-1$ (km).

Paso 5: Cálculo de la atenuación total debida a la dispersión, A_S, en el trayecto Tierra-espacio:

$$A_S = 10 \cdot \log_{10}\left(e^{\tau'_T/\text{sen}\theta}\right) \approx \frac{4,3429}{\text{sen}\theta}\tau'_T \qquad \text{dB} \tag{16}$$