

Recomendación UIT-R P.525-5

(11/2024)

Serie P: Propagación de las ondas radioeléctricas

Cálculo de la atenuación en el espacio libre

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 https://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, 2024

RECOMENDACIÓN UIT-R P.525-5

Cálculo de la atenuación en el espacio libre

(1978-1982-1994-2016-2019-2024)

Cometido

En la presente Recomendación se facilitan métodos para calcular la atenuación en el espacio libre.

Palabras clave

Atenuación, enlaces de telecomunicaciones, espacio libre

Recomendaciones de la UIT conexas

Recomendación UIT-R P.341

Recomendación UIT-R P.368

NOTA – En todos los casos, debe utilizarse la última edición de la Recomendación en vigor.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

que la propagación en el espacio libre es una referencia fundamental en ingeniería radioeléctrica,

recomienda

que se utilicen los métodos que figuran en el Anexo para el cálculo de la atenuación en el espacio libre.

Anexo**1 Introducción**

A los efectos de las radiocomunicaciones, el espacio libre se define como un vacío perfecto que puede considerarse infinito en todas las direcciones. En ese sentido, la propagación en el espacio libre es la propagación de una onda radioeléctrica radiada en el espacio libre¹.

Como en otros textos se suele tomar como referencia la propagación en el espacio libre, en este anexo se presentan las fórmulas pertinentes.

¹ El vocabulario electrotécnico (electropedia) de la Organización Internacional de Normalización recoge una definición más general:

Propagación en el espacio libre: propagación de una onda electromagnética en un medio dieléctrico ideal homogéneo que puede considerarse infinito en todas las direcciones.

NOTA – Para la propagación en el espacio libre, la magnitud de cada vector del campo electromagnético en cualquier dirección dada a partir de la fuente es proporcionalmente inversa a la distancia desde la fuente más allá de una distancia apropiada determinada por el tamaño de la fuente y la longitud de onda.

2 Fórmulas fundamentales para enlaces de telecomunicación

La propagación en el espacio libre puede calcularse de diversas maneras, cada una de las cuales se adapta a un tipo particular de servicio.

2.1 Enlaces punto a zona

En el caso de un solo transmisor que dé servicio a varios receptores distribuidos al azar (radiodifusión, servicio móvil), se calcula el campo eléctrico en un punto situado a una cierta distancia del transmisor mediante la relación siguiente:

$$e = \frac{\sqrt{30p}}{d} \quad (1)$$

donde:

- e : intensidad de campo eficaz (V/m) (véase la Nota 1)
- p : potencia isotrópica radiada equivalente (p.i.r.e.) del transmisor en la dirección del punto considerado (W) (véase la Nota 2)
- d : distancia del transmisor al punto considerado (m).

Se sustituye a menudo la ecuación (1) por la ecuación (2), en la que se emplean unidades prácticas:

$$e_{\text{mV/m}} = 173 \frac{\sqrt{p_{\text{kW}}}}{d_{\text{km}}} \quad (2)$$

donde:

- $e_{\text{mV/m}}$: r.m.s. de intensidad de campo (mV/m)
- p_{kW} : potencia isotrópica radiada equivalente (p.i.r.e.) del transmisor en la dirección del punto en cuestión (kW)
- d_{km} : distancia desde el transmisor hasta el punto en cuestión (km).

Para las antenas que funcionan en condiciones de propagación en el espacio libre, la fuerza electromotriz puede obtenerse multiplicando e por d en la ecuación (1), y su dimensión corresponde a la de una tensión.

NOTA 1 – Si la onda es de polarización elíptica y no rectilínea, y se designan por e_x y e_y los componentes del campo eléctrico que siguen dos ejes ortogonales, el primer miembro de la ecuación (1) debe sustituirse por $\sqrt{e_x^2 + e_y^2}$. Sólo puede deducirse e_x y e_y si se conoce la relación de elipticidad. En el caso de una polarización circular se debería sustituir e por $e\sqrt{2}$.

NOTA 2 – En el caso de antenas situadas en la superficie del suelo (típicamente con frecuencias relativamente bajas) con polarización vertical, sólo se considera en general la radiación en el semiespacio superior. Cuando se asume que el suelo es plano y perfectamente conductor, la densidad de flujo de potencia para una determinada potencia radiada se duplica, en comparación con una antena en el espacio libre. (Alternativamente, al considerar potencias de campo, la potencia de campo se incrementa de manera similar en 3 dB). Debe tenerse en cuenta este hecho para determinar la potencia radiada (lo que ya se incluye en la Recomendación UIT-R P.368 y en el Anexo 3 a la Recomendación UIT-R P.341).

2.2 Relaciones entre las características de una onda plana

Existen, además, relaciones entre las características de una onda plana (o de una onda asimilable a la onda plana) en un punto:

$$s = \frac{e^2}{120\pi} = \frac{30p}{120\pi d^2} = p \times \frac{1}{4\pi d^2} \quad (3)$$

donde:

- s : densidad del flujo de potencia (W/m²)
- e : intensidad de campo eficaz (V/m)
- p : potencia isotrópica radiada equivalente (p.i.r.e.) del transmisor en la dirección del punto en cuestión (W).

2.3 Enlaces punto a punto

Para los enlaces punto a punto entre antenas isotrópicas, es preciso considerar la potencia a la salida de la antena isotrópica receptora, p_r , en el punto en cuestión:

$$p_r = s \times a = \frac{p}{4\pi d^2} \times \frac{\lambda^2}{4\pi}, \quad (4)$$

donde:

- a : apertura efectiva de una antena isotrópica receptora (m²).

Una vez introducida la atenuación en el espacio libre entre antenas isotrópicas, denominada también pérdida básica de transmisión en el espacio libre (símbolos: L_{bf} o A_{bf}), ese valor puede calcularse de la manera siguiente (véase la Recomendación UIT-R P.341):

$$L_{bf} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{4\pi d^2} \times \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad \text{dB} \quad (5)$$

donde:

- L_{bf} : pérdida básica de transmisión en el espacio libre (dB)
- d : distancia
- λ : longitud de onda
- d y λ se expresan en las mismas unidades.

La ecuación (5) puede también escribirse en función de la frecuencia en vez de la longitud de onda:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d \quad \text{dB} \quad (6)$$

donde:

- f : frecuencia (MHz)
- d : distancia (km).

3 Pérdida básica de transmisión en el espacio libre en los sistemas de radar (símbolos: L_{br} o A_{br})

Los sistemas de radar constituyen un caso especial en cuanto que su señal sufre una pérdida al propagarse, tanto desde el transmisor hasta el blanco como desde éste hasta el receptor. En el caso de los radares dotados de una antena común para la transmisión y la recepción, la pérdida básica de transmisión en el espacio libre, L_{br} , puede expresarse como sigue:

$$L_{br} = 103,4 + 20 \log_{10} f + 40 \log_{10} d - 10 \log_{10} \sigma \quad \text{dB} \quad (7)$$

donde:

- σ : sección transversal del blanco del radar (m²)
- d : distancia del radar al blanco (km)
- f : frecuencia del sistema (MHz).

La sección transversal del blanco del radar para un objeto es la relación entre la potencia total dispersada isotrópicamente equivalente y la densidad de potencia incidente.

4 Fórmulas de conversión

Sobre la base de la propagación en el espacio libre, se pueden utilizar las fórmulas de conversión siguientes:

Intensidad de campo para una onda dada transmitida isotrópicamente:

$$E = P_t - 20 \log_{10} d + 74,8 \quad (8)$$

Potencia disponible recibida a través de una antena receptora isotrópica con adaptación conjugada para una determinada intensidad de campo:

$$P_r = E - 20 \log_{10} f - 167,2 \quad (9)$$

Pérdida de transmisión básica en el espacio libre para una potencia e intensidad de campo dadas transmitidas isotrópicamente:

$$L_{bf} = P_t - E + 20 \log_{10} f + 167,2 \quad \text{dB} \quad (10)$$

Densidad de flujo de potencia para una intensidad de campo dada:

$$S = E - 145,8 \quad (11)$$

donde:

P_t : potencia transmitida isotrópicamente (dB(W))

P_r : potencia disponible recibida a través de una antena con adaptación conjugada (dB(W))

E : intensidad de campo eléctrico (dB(μV/m))

f : frecuencia (GHz)

d : longitud del trayecto radioeléctrico (km)

L_{bf} : pérdida básica de transmisión en el espacio libre (dB)

S : densidad del flujo de potencia (dB(W/m²)).

Téngase presente que se pueden utilizar las ecuaciones (8) y (10) para derivar la ecuación (6).