

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R P.1406-2
(07/2015)

**Aspectos de la propagación relativos a los
servicios móvil terrestre terrenal
y de radiodifusión en las bandas de ondas
métricas y decimétricas**

Serie P
Propagación de las ondas radioeléctricas



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	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, 2016

© UIT 2016

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.1406-2

Aspectos de la propagación relativos a los servicios móvil terrestre terrenal y de radiodifusión en las bandas de ondas métricas y decimétricas

(Cuestión UIT-R 203/3)

(1999-2007-2015)

Cometido

Esta Recomendación contiene información sobre diversos aspectos de la propagación que es probable que afecten a los servicios móvil terrestre terrenal y de radiodifusión. Dichos aspectos deberían tenerse en cuenta al diseñar y planificar esos servicios.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

que es necesario obtener información sobre los aspectos de propagación que probablemente afectarán a los servicios móvil terrestre terrenal y de radiodifusión,

observando

que en la Recomendación UIT-R P.2040 se ofrecen directrices sobre los efectos de las propiedades de los materiales de construcción y las estructuras en la propagación de las ondas radioeléctricas,

recomienda

1 que en el diseño y planificación de tales servicios se debería tener en cuenta la información que figura en el Anexo 1.

Anexo 1**1 Introducción**

Esta Recomendación proporciona información sobre los diversos aspectos de la propagación que probablemente afectarán a los servicios móvil terrestre terrenal y de radiodifusión. Esos aspectos deben tenerse en cuenta en el diseño y planificación de tales servicios.

2 Atenuación debida a la cobertura terrestre

Estas pérdidas probablemente tendrán una gran importancia en el servicio móvil terrestre. Dependerán de la categoría del terreno, de la amplitud del manto de vegetación y de la ubicación, densidad y altura de los edificios. En el Cuadro 1 se resume la aplicabilidad de las diversas Recomendaciones UIT-R disponibles:

CUADRO 1

Recomendaciones que consideran la cobertura terrestre

UIT-R P.	Aplicabilidad
1546	Correcciones por altura de antena
452	Pérdidas de eco
833	Atenuación debida a la vegetación (especialmente los árboles)
1058	Bases de datos del terreno
1146	Correcciones por altura de antena
1812	Vegetación y pérdidas por ecos
1238	Planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores
2040	Efectos de los materiales de construcción y las estructuras

3 Variabilidad de la intensidad de señal**3.1 Consideraciones generales**

La intensidad de la señal recibida variará con el tiempo y el emplazamiento. La señal puede estar constituida por las componentes directa, difractada, reflejada y refractada. La calidad de recepción dependerá de diversos factores tales como entorno de recepción, las derivas de frecuencia, los retardos de tiempo y el tipo de modulación. De forma similar, también pueden recibirse transmisiones no deseadas procedentes de otras fuentes que comparten las mismas frecuencias que la señal deseada o tienen frecuencias adyacentes a la misma. Estas transmisiones también deberán tenerse en cuenta al evaluar la calidad de servicio. Las citadas transmisiones no deseadas pueden estar tan distantes del receptor que será necesario cuantificar el grado de variación temporal creado por las diversas formas de propagación anormal. Ello puede suponer la necesidad de aceptar un cierto riesgo de interferencia durante un porcentaje de tiempo definido en diversos emplazamientos de recepción a fin de permitir el funcionamiento de las redes.

En resumen, la evaluación de la recepción y la definición de la zona de servicio exige analizar las señales deseadas y no deseadas tanto en el dominio del tiempo como en el dominio del espacio, y el grado de correlación entre ellas.

3.2 Regímenes de desvanecimiento

La intensidad de la señal disminuye cuando el receptor se encuentra en una zona de sombra provocada por árboles o edificios o por obstáculos del terreno u otros objetos. En esos casos, la señal llega al receptor tras sufrir una difracción por encima o en torno a estos obstáculos, o una reflexión en otros objetos. Si se conoce el tamaño y la forma de los obstáculos puede intentarse calcular teóricamente las pérdidas adicionales de trayecto que producen. De no ser así, si sólo se dispone de información general sobre el entorno, puede realizarse una estimación de las pérdidas de trayecto a partir de mediciones efectuadas en situaciones similares. En cualquier caso, a una escala suficientemente pequeña, una estimación teórica no será posible y será necesario realizar una estimación basada en mediciones. Tal estimación debe ser de naturaleza estadística. Generalmente consiste en determinar el valor mediano de las pérdidas de trayecto para una zona especificada y en medir su varianza.

La señal puede variar explícitamente con el tiempo debido a las variaciones atmosféricas, pero en distancias inferiores a unos 50 km este tipo de variación es relativamente poco importante y en el

servicio móvil terrestre adquiere más relevancia la variabilidad espacial que se considera como la variabilidad temporal en un receptor que se desplaza.

Es conveniente dividir la variabilidad espacial en dos regímenes: desvanecimiento rápido debido al multitrayecto, que se produce en la escala de unas pocas longitudes de onda, y desvanecimiento más lento debido a cambios en el apantallamiento. En el análisis de las mediciones ambos pueden separarse de la forma siguiente: debe efectuarse un cierto número de mediciones a intervalos iguales a lo largo de una distancia de unas 40 longitudes de onda determinándose el valor mediano del nivel de señal o de las pérdidas de trayecto para esta distancia. Se necesitan aproximadamente 36 de estas medidas para obtener un valor mediano con una precisión de 1 dB con el 90% de probabilidad. La distancia entre las mediciones debe ser al menos 0,8 longitudes de onda para que las mediciones adyacentes no estén correlacionadas; este criterio se satisface con las condiciones indicadas. Este procedimiento se repite para otros intervalos de distancia de 40 longitudes de onda hasta cubrir la zona de interés. La experiencia ha demostrado que la distribución de estos valores medianos será log-normal y, por consiguiente, su distribución puede caracterizarse por sus valores medios o medianos y por su desviación típica. Ésta es la distribución de las variaciones en la intensidad de señal debidas al apantallamiento, una vez suprimida la variación por multitrayecto.

3.2.1 Apantallamiento

Se han efectuado un cierto número de mediciones para determinar la distribución de la intensidad de la señal debida al apantallamiento. Es importante especificar si la zona de interés es extensa (es decir, todos los trayectos de una longitud determinada en torno al transmisor de base o todos los trayectos de una longitud determinada en una región geográfica) o reducida (es decir, una zona de dimensiones de unos pocos centenares de metros en la que el perfil del trayecto y el entorno general del receptor no sufren modificaciones significativas). La variabilidad de la señal será mayor en una zona extensa que en una zona reducida.

En zonas rurales, para todos los trayectos de una longitud determinada, la desviación típica, σ_L , de la distribución de la variabilidad del emplazamiento puede estimarse mediante:

$$\begin{aligned} \sigma_L &= 6 + 0,69 \left(\frac{\Delta h}{\lambda} \right)^{1/2} - 0,0063 \left(\frac{\Delta h}{\lambda} \right) && \text{dB} && \text{para } \Delta h/\lambda < 3\ 000 \\ \sigma_L &= 25 && \text{dB} && \text{para } \Delta h/\lambda > 3\ 000 \end{aligned} \quad (1)$$

siendo:

Δh : variación en altura interdecilo (m)

λ : longitud de onda (m)

$\lambda = 300/f$

f : frecuencia (MHz).

En zonas urbanas llanas, la desviación típica en una zona amplia puede estimarse mediante:

$$\sigma_L = 5,25 + 0,42 \log(f/100) + 1,01 \log^2(f/100) \quad \text{dB} \quad (2)$$

que es válida entre 100 MHz y 3 000 MHz.

La desviación típica de la variabilidad del emplazamiento en zonas pequeñas es menos conocida. Se considera que depende de la cobertura del terreno pero aún no se ha determinado el tipo de dependencia. Hay cierta evidencia de que la desviación típica disminuye al aumentar la distancia desde el transmisor, pero ello no siempre es así. La fórmula (3) resume aproximadamente algunas mediciones efectuadas en las bandas de ondas decimétricas para distancias de hasta 50 km y para todo tipo de cobertura del terreno y mantiene la dependencia con la frecuencia de la fórmula (2):

$$\sigma_L + 2,7 + 0,42 \log(f/100) + 1,01 \log^2(f/100) \quad \text{dB} \quad (3)$$

La Recomendación UIT-R P.1546 contiene una expresión empírica diferente para este tipo de desvanecimiento debido a sombras.

3.2.2 Desvanecimiento por trayecto múltiple

A una escala de unas pocas longitudes de ondas, la variabilidad de la señal está determinada por los efectos multitrayecto. Cabe prever que habrá, como mínimo, un componente reflejado en tierra, y como consecuencia de ello los efectos multitrayecto siempre se observan en la práctica. Dichos efectos multitrayecto conducen en general a clasificar un canal como de «Rayleigh» o de «Rice».

En el primer caso la señal recibida es la suma de numerosos componentes de desvanecimiento independientes, y puede representarse mediante la distribución de Rayleigh (véase la Recomendación UIT-R P.1057). Éste será el canal típico para un servicio móvil celular de banda estrecha que funcione en un entorno urbano atestado, sin visibilidad directa al transmisor.

El canal de Rice está asociado a la situación en la cual uno de los componentes de la señal recibida, como el asociado al trayecto de visibilidad directa con el transmisor, tiene una potencia que permanece constante en la escala temporal del desvanecimiento multitrayecto. En este caso, el desvanecimiento general de la señal puede modelarse mediante la distribución de Nakagami-Rice (véase la Recomendación UIT-R P.1057). A menudo esta distribución se formula sobre la base del parámetro K (el «factor Rice»), el cual se define como la relación entre la potencia en la parte constante de la señal y la potencia en la parte aleatoria. Para $K = 0$, la distribución empieza a ser de Rayleigh.

3.3 Reflexiones locales

Las ondas radioeléctricas que llegan a un receptor móvil pueden sufrir reflexiones en la superficie y en objetos cercanos tales como edificios, árboles y vehículos. La onda reflejada en la superficie es coherente con la onda directa y provoca variaciones en la señal recibida al modificarse la altura de la antena del receptor. Sin embargo, las ondas reflejadas por objetos cercanos pueden tener amplitudes y fases aleatorias.

La interferencia constructiva y destructiva entre las ondas directas y las diversas ondas reflejadas crean un patrón de interferencia en el cual la distancia entre los mínimos es al menos media longitud de onda.

En zonas urbanas o boscosas, se producen muchas ondas reflejadas y la intensidad de campo instantánea medida a la distancia de unas pocas decenas de longitud de onda sigue aproximadamente una distribución de Rayleigh.

El patrón de interferencia da lugar a un desvanecimiento rápido en un receptor desplazándose y las reflexiones provocadas por vehículos en desplazamiento pueden causar desvanecimientos incluso en un receptor estacionario.

Son comunes valores del desvanecimiento de 30 dB o más por debajo del nivel medio.

Las reflexiones locales también pueden tener el efecto beneficioso de cubrir zonas de sombra profunda hasta un cierto grado.

3.4 Correlación de la señal

La correlación de la potencia recibida media procedente de distintas fuentes es importante para evaluar la relación portadora/interferencia, C/I .

Siendo C la potencia de la portadora deseada (dB) con un valor medio C_m y una desviación típica σ_C e I la potencia (dB) procedente de una fuente interferente con un valor medio I_m y una desviación típica σ_I . El valor medio de la relación C/I , $(C/I)_m$, puede calcularse mediante:

$$(C/I)_m = C_m - I_m \quad \text{dB} \quad (4)$$

que es independiente de la correlación.

La desviación típica, $\sigma_{C/I}$, de la relación C/I es:

$$\sigma_{C/I} = \sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_I^2 - 2\rho\sigma_C\sigma_I} \quad (5)$$

siendo ρ el coeficiente de correlación. Si $\sigma = \sigma_I = \sigma_C$, la ecuación (5) se simplifica de la forma siguiente:

$$\sigma_{C/I} = \sigma\sqrt{2(1-\rho)} \quad (6)$$

Los coeficientes de correlación obtenidos a partir de los conjuntos de muestras de los datos sobre potencia recibida indican que en el caso de recepciones procedentes de sentidos opuestos no hay una correlación significativa evidente. Cuando la diferencia en el ángulo de llegada en el móvil es pequeña, existe una correlación significativa. Los valores típicos de ρ en el caso de fuentes situadas en el mismo emplazamiento son de 0,8 a 0,9 en zonas de cultivo y con densa arboleda. Si se trata de zonas metropolitanas la correlación es generalmente inferior (ρ toma un valor comprendido entre 0,4 y 0,8). Normalmente, las correlaciones en zonas montañosas son muy bajas. Sin embargo, en situaciones excepcionales se han observado valores de $\rho > 0,8$ incluso en zonas montañosas.

4 Dispersión del retardo

Muchos tipos de sistemas de radiocomunicaciones, particularmente los que utilizan técnicas digitales, son sensibles a la propagación multitrayecto introducida en la señal por las características del trayecto. Tras la llegada de la señal directa, la aparición de un cierto número de señales reflejadas provoca este fenómeno. Basándose en las amplitudes y en los retardos de tiempo de estas señales, puede obtenerse una respuesta de canal al impulso a partir de dicha respuesta de canal al impulso pueden deducirse varios parámetros que describen el canal de propagación (véase la Recomendación UIT-R P.1407).

Uno de los parámetros importantes es el valor eficaz de la dispersión del retardo, S , que figura en las ecuaciones (3) y (4) de la Recomendación UIT-R P.1407. Una medida útil del grado de dispersión en el tiempo es la dispersión del retardo multitrayecto, T_m , siendo:

$$T_m = 2 S \quad (7)$$

La mayor o menor utilidad de los parámetros indicados anteriormente a la hora de predecir el comportamiento del sistema depende del esquema de modulación en particular utilizado.

4.1 Influencia sobre el comportamiento del sistema

Dependiendo de la relación entre la dispersión del retardo y la duración de símbolo varios fenómenos son responsables de la proporción de bits erróneos. Las señales multitrayecto provocan una rápida variación de fase en espacio y frecuencia. Para esquemas de modulación que utilicen algún tipo de modulación angular (por ejemplo, modulación por desplazamiento de fase diferencial (MDPD)) estas variaciones de fase son las responsables de los errores irreducibles, que permanecen incluso para valores elevados de las relaciones señal/ruido. Mientras la dispersión del retardo sea menor que la duración de símbolo, los errores irreducibles dependen más de la dispersión del retardo que de la forma exacta de la respuesta al impulso. Sin embargo, si la dispersión del retardo

supera la duración de símbolo aparece la interferencia entre símbolos, que depende en mayor medida de la forma de la respuesta de canal al impulso.

4.2 Señales retardadas debido a dispersores locales

En zonas con una distribución uniforme de dispersores locales se observan a menudo señales con retardos cortos. Tales señales aparecen típicamente en zonas urbanas o suburbanas donde no existen situaciones de visibilidad directa con grandes reflectores a mayores distancias (montañas, colinas). La distribución uniforme de las señales dispersas normalmente da lugar a respuestas al impulso homogéneas (véase también la Recomendación UIT-R P.1238). Además de la parte homogénea de la respuesta al impulso, a veces aparecen ecos intensos causados por edificios de gran tamaño lo que da lugar a una respuesta al impulso no homogénea. Además, también se observa dicho tipo de respuesta al impulso en las intersecciones de las calles.

El valor eficaz típico de las dispersiones del retardo en zonas urbanas y suburbanas se encuentra en la gama de 0,8 μ s a 3 μ s. En el caso de sistemas de transmisión de datos a alta velocidad puede que sea necesario un conocimiento más preciso de la respuesta al impulso. Los correspondientes cálculos detallados de intensidad de señal para las señales multitrayectos hacen uso de técnicas de trazado de rayos o lanzamiento de rayos, junto con la aplicación de datos sobre edificios de alta resolución.

4.3 Señales retardadas debido a dispersores distantes de gran tamaño

Las señales con retardos elevados aparecen normalmente en zonas llanas cercanas a montañas, tales como las llanuras o los valles. Este efecto es particularmente evidente cuando se trata de una zona llana de gran extensión que se encuentra adyacente a una sola cadena montañosa, lo que disminuye los posibles efectos reductores de otras cadenas montañosas. Se han observado valores típicos del retardo de hasta unos 25 μ s.

La intensidad de la señal directa debe calcularse por el método aproximado indicado en la Recomendación UIT-R P.1144 dentro de los límites de validez definidos en dicha Recomendación. La intensidad de las señales reflejadas puede calcularse a partir de la fórmula (8):

$$P_{rs} = \frac{P_t G_t G_r}{32\pi^3} \left(\frac{\lambda}{r_1 r_2} \right)^2 \Gamma A \cos \theta_1 \cos \theta_2 \quad (8)$$

siendo:

- P_{rs} : potencia de la señal recibida
- P_t : potencia de salida del transmisor
- G_t : ganancia efectiva de la antena del transmisor (incluidas las pérdidas de la línea y por filtrado)
- G_r : ganancia efectiva de la antena del receptor (incluidas las pérdidas de la línea y por filtrado)
- λ : longitud de onda expresada en las mismas unidades que r_1 y r_2
- r_1, r_2 : distancias desde el plano de dispersión (superficie de la montaña) al transmisor y al receptor
- Γ : reflectividad del plano de dispersión
- A : superficie del plano de dispersión expresada en las mismas unidades al cuadrado que r_1 y r_2
- θ_1, θ_2 : ángulos agudos entre la normal al plano de dispersión y los rayos dirigidos al transmisor y al receptor.

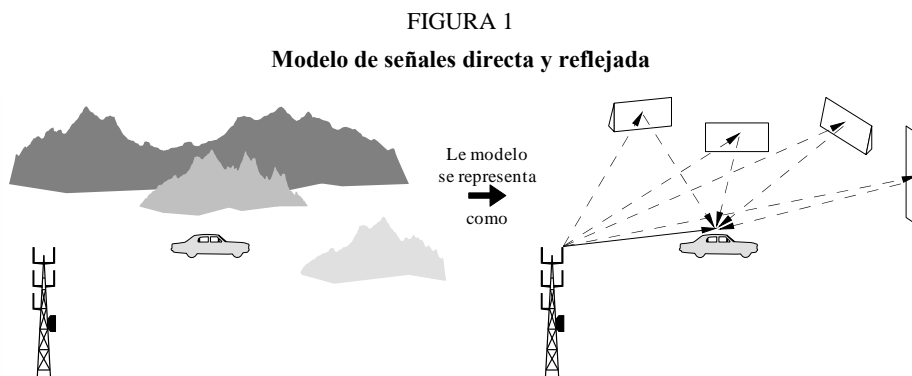
La fórmula (8) no considera el ángulo vertical pero debe ser suficientemente precisa para su aplicación a móviles terrestres. Cabe señalar igualmente que esta fórmula será menos precisa en presencia de propagación por conductos u otros fenómenos de refracción. En casos extremos puede que no sea aplicable en absoluto debido a que un reflector, que normalmente debería considerarse, ya no se encuentra dentro del radio de visibilidad directa o, por el contrario, a que la vertiente de una montaña que normalmente se encuentra fuera del radio de visibilidad directa entra en dicho radio.

Para mayor sencillez y facilidad de cálculo, se considera que cada cadena montañosa constituye un solo plano de dispersión con la misma orientación acimutal que la de la cresta de la cadena. La superficie, A , es el área de la parte de la cadena montañosa que se encuentra en el interior de las anchuras de haz a potencia mitad de las antenas del transmisor y el receptor y cuyo trayecto hasta cualquiera de las antenas no presenta ningún obstáculo. Los parámetros r_1 y r_2 , θ_1 y θ_2 se calculan a partir del centro de la parte antes indicada de la cadena montañosa.

Si una parte de una cadena montañosa reflectante se encuentra apantallada con respecto a la estación transmisora o a la estación receptora por una cadena montañosa más próxima de manera que la superficie reflectora de la cadena más alejada se encuentre separada en secciones, el cálculo se realiza considerando las partes no apantalladas como cadenas montañosas distintas. Este concepto se representa en la Fig. 1.

Se ha observado que la reflectividad, Γ , tiene valores entre 0,001 y 0,2 (–30 dB y –7 dB). En el caso de montañas con árboles, no es probable que la reflectividad rebase el valor de 0,05 (–13 dB). Para montañas peladas, no es probable que la reflectividad sobrepase el valor de 0,2 (–7 dB).

Las pérdidas de eco aplicadas al cálculo de la señal directa deben aplicarse también al cálculo de la señal reflejada.



5 Efectos de la antena

5.1 Efectos de polarización

5.1.1 Fenómenos de despolarización en el entorno móvil terrestre

En el entorno móvil terrestre toda la energía transmitida, o parte de ella, puede perder la polarización original debido a la difracción y la reflexión de las ondas radioeléctricas. Conviene tener en cuenta este efecto de despolarización utilizando el factor de discriminación por polarización cruzada (XPD) definido en la Recomendación UIT-R P.310.

Las mediciones de XPD a 900 MHz demuestran que:

- XPD depende poco de la distancia;

- el valor medio de XPD en áreas urbanas y residenciales oscila entre 5 dB y 8 dB y en zonas abiertas es superior a 10 dB;
- la correlación media entre la polarización vertical y horizontal es 0.

XPD aumenta al disminuir la frecuencia, hasta un valor de unos 18 dB a 35 MHz.

XPD presenta una distribución log-normal con una desviación típica que depende en cierta medida de la frecuencia. El valor medio de la diferencia entre los valores del 10% y del 90% (en la gama de frecuencias comprendida entre 30 y 1 000 MHz) es de unos 15 dB. Se ha observado que el hecho de que la polarización original sea vertical u horizontal no tiene apenas influencia en estos valores.

Se han encontrado dos tipos de variación en el tiempo del efecto de despolarización. El primero consiste en una variación lenta producida por la modificación de las propiedades eléctricas de la superficie causada por las condiciones meteorológicas. Este efecto es más pronunciado en las frecuencias más bajas. El segundo se debe al movimiento de los árboles que produce un fenómeno de desvanecimiento por despolarización que puede alcanzar varios decibelios en amplitud para velocidades del viento bajas.

5.1.2 Diversidad de polarización

Debido al volumen considerable de dispersión que se produce en zonas urbanas y residenciales, y los consiguientes bajos valores de XPD, la diversidad de polarización puede ser una técnica útil para mejorar la recepción. La opción más básica sería la utilización de dos polarizaciones lineales ortogonales en la estación de base.

Como una alternativa a la diversidad, puede emplearse la polarización circular en la estación de base y la polarización lineal en el terminal móvil, lo cual produce una desadaptación de polarización de 3 dB pero pueden aprovecharse las ventajas de la despolarización debida a la dispersión y lograrse un nivel de señal recibida más constante en el entorno móvil.

5.2 Ganancia de altura: base y móvil

La ganancia de altura hace referencia a un cambio en la intensidad de señal recibida al hacerlo la altura de la antena. Aunque normalmente dicha intensidad aumenta con la altura (ganancia de altura positiva), también puede disminuir con la misma (ganancia de altura negativa). En ausencia de eco local, la señal directa puede interactuar con un rayo procedente del mismo transmisor reflejado en la superficie. La variación de intensidad de campo resultante, en dirección vertical, es una serie de máximos y mínimos pues la geometría del trayecto provoca que ambas señales se encuentren sucesivamente en fase y desfasadas.

En la práctica, especialmente en el caso de los receptores móviles, los ecos y otras señales reflejadas tienden a minimizar este efecto de los dos rayos y por encima de 200 MHz puede despreciarse en la mayoría de las situaciones. En su lugar, se observa normalmente que una elevación de la altura de la antena simplemente disminuye las pérdidas efectivas por eco, lo que da lugar a que la señal recibida aumente con la altura. Como la altura de la antena está relacionada con las pérdidas de eco de esta forma, este tipo de ganancia puede clasificarse según el tipo de ocupación del suelo descrito en la Recomendación UIT-R P.370. En otros métodos de previsión, especialmente los que utilizan una base de datos del terreno, la altura de antena frecuentemente se relaciona de forma directa con el cálculo de las pérdidas de eco.

En las estaciones de base que funcionan en frecuencias por debajo de 200 MHz y están situadas en zonas abiertas, pueden aparecer a veces los efectos de los 2 rayos de forma que sea necesario reubicar la antena para evitar una ganancia de altura negativa. Tal efecto es difícil de predecir con precisión puesto que exige un conocimiento detallado del perfil del terreno en el punto de reflexión. Por encima de 200 MHz, y debido al valor más reducido de la longitud de onda, este problema

concreto tiende a desaparecer y en las bandas de ondas decimétricas y frecuencias superiores puede ignorarse.

5.3 Correlación/diversidad espacial

La diversidad espacial es un método práctico para antenas con correlaciones cruzadas de hasta aproximadamente 0,7. Por regla general, ello hace que la recepción por diversidad en portátiles y móviles sea casi imposible. En el caso de la estación de base, sin embargo, es posible utilizar un cierto número de técnicas para reducir la correlación cruzada entre antenas. Las dos técnicas más prácticas son la separación vertical y horizontal.

Para disminuir la correlación cruzada a un valor de 0,7 o inferior, las antenas con separación vertical deben distanciarse aproximadamente unas 17 longitudes de onda o más. La separación horizontal puede ser más eficaz dependiendo de las orientaciones relativas del plano de las antenas con respecto a la dirección de movimiento del móvil. Si el plano vertical que pasa a través de las antenas es perpendicular a la dirección de movimiento de los móviles, la correlación será aproximadamente la misma que en el caso de separación vertical. Con una orientación óptima, las antenas horizontales pueden tener una separación tan reducida como 8 longitudes de onda. Debe tenerse en cuenta que las orientaciones casi óptimas sólo pueden mantenerse en casos especiales tales como sistemas que utilizan antenas por sectores.

5.4 Ganancia obtenible en antenas móviles montadas en vehículos

Como las estaciones móviles montadas en vehículos normalmente funcionan en un entorno multitrayecto, no es sorprendente que la ganancia de la antena móvil no coincida en la mayoría de los casos con la estimada según el diagrama de radiación. De forma adicional, incluso en condiciones de visibilidad directa y sin multitrayecto, el ángulo de llegada vertical no es necesariamente horizontal. De hecho, existen casos reales en que dicho ángulo de llegada vertical puede rebasar los 10°. En este último caso, el citado ángulo podría encontrarse fácilmente en un nulo o en un lóbulo secundario en vez de en el lóbulo principal del diagrama de radiación vertical de la antena móvil.

Diversas pruebas de mediciones sobre antenas móviles de ganancias de 3 dB y 5 dB con respecto a un monopolo vertical de $\lambda/4$ en situaciones prácticas han demostrado que los valores de ganancia reales raramente coinciden con los valores medidos en el diagrama de la antena. En situaciones multitrayecto, o en situaciones despejadas con ángulos de llegada elevados ($>2^\circ$), la ganancia práctica de cada antena es de aproximadamente 1,5 dB con respecto al monopolo vertical de $\lambda/4$ para una gama de distancias de hasta unos 55 km. En situaciones despejadas con ángulos de elevación bajos, puede obtenerse la ganancia plena.

6 Efectos diversos

6.1 Pérdidas por entrada en edificios

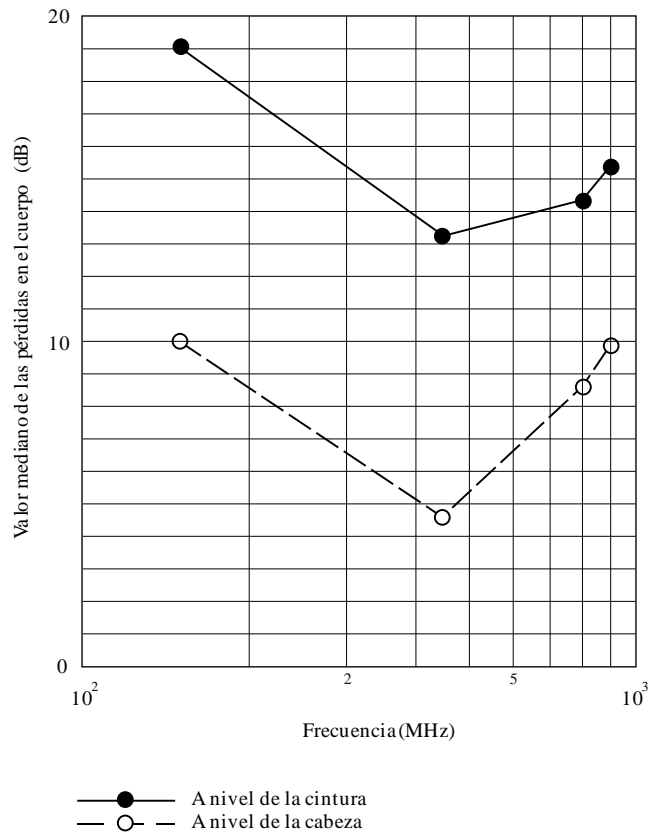
Las pérdidas de propagación que se producen en un edificio pueden variar considerablemente según el tipo de edificación y los materiales de construcción. La frecuencia de la señal y su ángulo de incidencia también son parámetros muy significativos. En consecuencia, los valores de dichas pérdidas pueden variar entre unos pocos y varias decenas de decibelios.

En la Recomendación UIT-R P.2040 se da información sobre las pérdidas que sufren las señales radioeléctricas al entrar en edificios o salir de ellos. Una vez dentro del edificio pueden aparecer otras pérdidas a causa de los materiales de construcción empleados y del contenido interior, y esas pérdidas se consideran en la Recomendación UIT-R P.1238.

6.2 Pérdidas en el cuerpo

La presencia del cuerpo humano en el campo eléctrico que rodea a un transceptor portátil, a un teléfono celular o a un receptor de radiomensajería puede degradar el comportamiento efectivo de la antena; cuanto más próxima esté la antena al cuerpo mayor será la degradación. Este efecto también depende de la frecuencia, como se ilustra en la Fig. 2 basada en un estudio detallado realizado recientemente sobre transceptores portátiles funcionando en cuatro frecuencias normalmente utilizadas.

FIGURA 2
Pérdidas en el cuerpo típicas – Transceptor portátil



P.1406-2

No es posible referirse exclusivamente a «pérdidas en el cuerpo» cuando se trata de receptores de radiomensajería puesto que las antenas de dichos dispositivos se encuentran integradas en la propia unidad. Por dicha razón, la sensibilidad de estos receptores se especifica normalmente en términos de intensidad de campo (generalmente, $\mu\text{V}/\text{m}$). Sin embargo, conviene conocer la ganancia de antena proporcionada por una antena incorporada típica cuando el dispositivo de radiomensajería se lleva a la altura de la cadera. En el Cuadro 2 aparecen estos valores para un dispositivo en particular funcionando y para tres frecuencias distintas.

CUADRO 2

Ganancia del receptor de radiomensajería

Frecuencia (MHz)	Ganancia de antena (dB)
160	-25
460	-22
930	-19

7 Propagación guiada

Una propagación puede considerarse «guiada» siempre que el frente de onda no sea libre para propagarse en las tres dimensiones. Como ejemplos pueden indicarse la propagación troposférica por conductos y la tecnología de transmisión en línea, particularmente los guíaondas.

En el § 7.1 se estudia la propagación a lo largo de túneles, que debe considerarse cuando una señal de radiocomunicaciones se introduce en cualquier extremo del túnel o es emitida por una antena en el interior del mismo. El § 7.2 trata de un tema muy relacionado como el de los alimentadores con fugas.

7.1 Propagación en túneles

Los sistemas de radiocomunicaciones son necesarios normalmente en túneles de carreteras y de ferrocarriles para los servicios de radiodifusión y de telefonía móvil y en las minas u otras estructuras subterráneas a efectos de seguridad y de explotación.

La propagación en el interior de un túnel con un cierto grado de regularidad puede interpretarse acudiendo a la teoría de los guíaondas. Dependiendo de la frecuencia, las ondas radioeléctricas se desplazarán a lo largo de la longitud del túnel en los modos transversal-eléctrico (TE) o transversal-magnético (TM), en los cuales los componentes eléctrico o magnético, respectivamente, son únicamente transversales al eje del túnel. Cada uno de estos modos tiene una frecuencia crítica por debajo de la cual no se producirá la propagación. Por encima de la frecuencia crítica cada modo se propaga con sus propios coeficientes de propagación y fase. El modo con la frecuencia más baja define la frecuencia de corte del guíaondas, por debajo de la cual no es posible la propagación. En el caso de un guíaondas rectangular, la frecuencia de corte es equivalente a una longitud de onda que mide dos veces la anchura del lado mayor. En el caso de un túnel irregular, una aproximación útil consiste en considerar que la longitud de onda es igual a la circunferencia de la sección transversal del túnel.

En túneles de transporte o habitables normales, los servicios de radiocomunicaciones en las bandas de ondas métricas se producirán normalmente por encima de la frecuencia de corte y en las bandas de ondas decimétricas muy por encima de dicha frecuencia.

En frecuencias muy por encima de la de corte, la propagación en un túnel también puede interpretarse con ayuda de la teoría de rayos, que suele ser la más apropiada cuando la longitud de onda resulta muy pequeña en comparación con la sección transversal del túnel. En un túnel cuyas paredes son lisas en comparación con la longitud de onda, la propagación se realizará mediante reflexiones en las superficies interiores con ángulos de incidencia rasante, para los cuales la mayoría de los materiales presentan unos coeficientes de reflexión elevados. Debido a la amplia variedad de trayectos reflejados posibles, el resultado tiene características de multitrayecto con desvanecimiento de Rayleigh o de Rice.

Las obstrucciones en un túnel provocarán que las ondas radioeléctricas que se encuentren muy por encima de la frecuencia de corte sean dispersadas, en general, con ángulos elevados con lo cual se interrumpirá el proceso de reflexiones por incidencia rasante. Aparecerán pérdidas por difracción inmediatamente después de una obstrucción debido al apantallamiento.

Las proporciones de atenuación específica aplicables a la propagación en túneles varían ampliamente y resultan particularmente afectadas por las irregularidades y los cambios en la dirección del túnel y las obstrucciones, incluido el tráfico. En un túnel de carretera típico unas cifras de atenuación en la gama de 0,1 a 1 dB/m pueden considerarse normales pero también pueden aparecer frecuentemente valores fuera de esta gama. Debido a la coexistencia de modos múltiples por encima de la frecuencia crítica, las proporciones de atenuación pueden aumentar o disminuir al aumentar la frecuencia, dependiendo de las circunstancias.

7.2 Alimentadores con fugas

Los alimentadores con fugas se utilizan generalmente para superar los obstáculos a la propagación en el interior de un túnel y a menudo constituyen el único medio práctico para prestar servicios por debajo de la frecuencia de corte, tales como la radiodifusión en onda media.

Si los servicios de radiocomunicaciones que van a soportarse se cursan por cable coaxial montado a lo largo de la longitud del túnel, y algo separado de sus paredes, y el conductor exterior presenta aberturas, parte de la energía se perderá a través de dicho conductor exterior en forma de onda del tipo electromagnética transversal entre el coaxial exterior y las paredes del túnel. Este proceso se denomina conversión de modo. Las irregularidades en el sistema cable coaxial/túnel, incluidos los soportes del alimentador, provocarán también la conversión de modo. Para controlar este fenómeno algunos sistemas utilizan secciones de alimentador sin pérdidas intercaladas con dispositivos discretos de conversión de modo.

El diseño de sistemas de alimentadores con fuga está especializado. Un problema práctico consiste en que las elevadas pérdidas de acoplamiento que se producen entre el alimentador con fugas y los terminales móviles cuando el alimentador va montado próximo a las paredes laterales del túnel, y por consideraciones prácticas normalmente no deben montarse lejos de dichas paredes laterales.

8 Variaciones temporales

La intensidad de campo recibida variará con el tiempo, además de hacerlo con el emplazamiento y la naturaleza del terreno.

En el Cuadro 3 figura la desviación típica de la variabilidad en el tiempo, σ_t .

CUADRO 3

Desviación típica σ_t

Banda	d (km)	σ_t (dB)			
		50	100	150	175
Ondas métricas	Tierra y mar	3	7	9	11
Ondas decimétricas	Tierra	2	5	7	
	Mar	9	14	20	

Bajo ciertas condiciones radiometeorológicas, puede aparecer el fenómeno de propagación por conductos que provoca un aumento considerable de la señal, con el consiguiente incremento de probabilidad de interferencia (véase la Recomendación UIT-R P.452). Estos efectos son intermitentes y a corto plazo.
