

RECOMENDACIÓN UIT-R P.1410-3

Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha en ondas milimétricas que funcionan en una gama de frecuencias de 20-50 GHz aproximadamente

(Cuestión UIT-R 203/3)

(1999-2001-2003-2005)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que para la planificación adecuada de los sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha en ondas milimétricas es necesario disponer de información sobre propagación y de métodos de predicción apropiados;
- b) que las Recomendaciones en vigor para el diseño de enlaces individuales en ondas milimétricas no cubre los aspectos de zona,

recomienda

1 que la información sobre propagación y los métodos de predicción expuestos en el Anexo 1 se utilicen a la hora de diseñar sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha en ondas milimétricas que funcionan en una gama de frecuencias de 20-50 GHz aproximadamente.

Anexo 1

1 Introducción

Existe un interés creciente en la prestación de servicios de banda ancha a través de la red local de acceso a los hogares y a las pequeñas empresas. Las soluciones radioeléctricas en ondas milimétricas son cada vez más valoradas como sistemas de provisión, y ahora el mercado ya dispone de ellas. Se están examinando e introduciendo diversos sistemas, tales como el sistema de distribución multipunto local, el sistema de comunicaciones multipunto local y el sistema punto a multipunto (P-MP). De una manera global, estos sistemas pueden llamarse de acceso inalámbrico de banda ancha (BWA, *broadband wireless access*).

Dada la rapidez con la que evolucionan los sistemas radioeléctricos, se necesitan buenas directrices de diseño con respecto a los asuntos relativos a la propagación de ondas radioeléctricas. En la presente Recomendación se exponen una serie de resultados de propagación de las ondas radioeléctricas milimétricas y se proporcionan algunos métodos de predicción.

2 Cobertura de zona

Cuando se planifica un sistema celular, el operador ha de elegir cuidadosamente la ubicación de la estación de base y su altura con respecto al suelo para poder prestar servicio al número de usuarios deseado dentro de una zona. El tamaño de las células puede variar en función de la topografía y del número de usuarios para el cual se ofrece un servicio de radiocomunicaciones. En este punto se expone un modelo estadístico de bloqueo por edificios basado en una descripción muy simple de los edificios de una zona, y se proporciona orientación fundamentada en cálculos detallados. Se presenta asimismo un modelo de atenuación debida a la vegetación y algunas normas sencillas de diseño.

2.1 Bloqueo producido por edificios

La mejor manera de estimar la probabilidad de bloqueo producido por edificios es la utilización de técnicas de trazado de rayos con datos reales extraídos de bases de datos exhaustivas sobre los edificios y el terreno. En el § 2.1.1 se describen brevemente los requisitos para las técnicas de trazado de rayos. Sin embargo, en muchas zonas no se dispone de bases de datos adecuadas, por lo que se recomienda el modelo estadístico esbozado en el § 2.1.2.

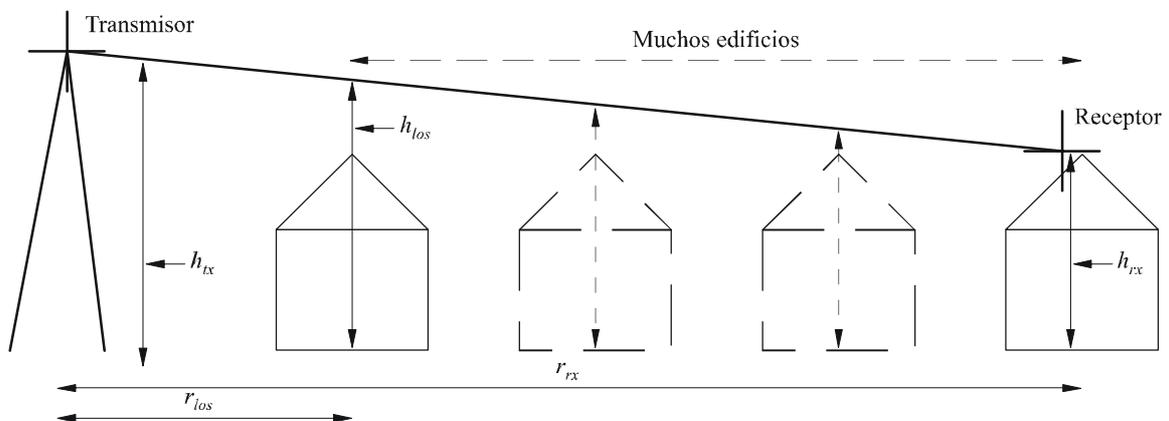
2.1.1 Requisitos de trazado de rayos

Se puede lograr una predicción de cobertura precisa mediante la utilización de técnicas de trazado de rayos en zonas en que se dispone de una base de datos sobre cobertura del terreno. Debido al elevado valor de la frecuencia y a las cortas longitudes de los trayectos que intervienen se pueden realizar aproximaciones ópticas geométricas en línea recta.

Para una aproximación de primer orden con objeto de estimar la cobertura, es suficiente una determinación óptica con visibilidad directa (LoS, *line-of-sight*) del 60% de la apertura de la primera zona de Fresnel para asegurar pérdidas adicionales despreciables (véase la Fig. 1). Las pérdidas por difracción en los casos en que no hay visibilidad directa son muy intensas. La precisión de la base de datos sobre los edificios limitará la precisión de la predicción de los rayos y dicha base de datos debe incluir una representación precisa del terreno y de los edificios a lo largo del trayecto. Para trayectos superiores a 2 km también debe considerarse la curvatura de la Tierra. Para este procedimiento deben considerarse opacos los edificios y la vegetación.

FIGURA 1

Cada edificio debe quedar por debajo del rayo con LoS que une el transmisor y el receptor



Las mediciones de las características de la señal al compararlas con los modelos de trazado de rayos han mostrado un buen ajuste a los valores estadísticos, pero las mediciones han demostrado una variabilidad importante de la señal con la posición y con el tiempo en trayectos donde no hay una clara LoS. Por lo tanto, debido a la precisión limitada de las bases de datos reales de los edificios, no será posible efectuar predicciones sobre la calidad del servicio para trayectos específicos casi con LoS.

La vegetación, en particular los árboles de gran altura y los arbustos, puede causar una importante degradación del servicio y lo ideal sería incluir en la base de datos los datos de la vegetación.

Las mediciones han indicado que, para una prestación del servicio en regiones urbanas/suburbanas típicas, los usuarios afectados por los efectos de la reflexión multitrayecto son mucho más escasos que los que están bloqueados por edificios o vegetación debido a una anchura de haz de la antena estrecha, por consiguiente no es necesario calcular las reflexiones (véase el § 4.2.1).

La base de datos utilizada para evaluar el trazado de rayos puede ser una base de datos detallada orientada al objeto, que incluya la altura del terreno, las características de los distintos edificios incluida la altura del techo y los datos sobre la forma del edificio, representando la vegetación mediante árboles aislados o grupos de árboles. Como alternativa para determinar la LoS, puede utilizarse una base de datos de exploración de las alturas puntuales, tales como la generada a partir de las mediciones efectuadas por los radares de abertura sintética (SAR, *synthetic aperture radar*) a bordo de aeronaves (véase el Cuadro 1).

CUADRO 1

Requisitos mínimos de la base de datos

| Objeto | Formato | Definición horizontal (m) | Definición vertical (m) |
|------------|--|---------------------------|-------------------------|
| Terreno | Cuadrícula de alturas puntuales | 50 | 1 |
| Edificios | Orientado al objeto o imágenes por puntos de alta definición | 1 | 1 |
| Vegetación | | | |

2.1.2 Modelo estadístico

Para una determinada posición del transmisor (Tx) y del receptor (Rx), la probabilidad de que exista un rayo con LoS entre los dos viene dada por la combinación de las probabilidades de que cada edificio que se encuentre en el trayecto de propagación esté por debajo de la altura del rayo que une el transmisor y el receptor en el punto en que el rayo cruza por el edificio. En la Fig. 1 se muestra la geometría de la situación y se definen los términos utilizados en la ecuación (1). En este modelo se parte de la hipótesis de que el terreno es llano o tiene una pendiente uniforme en la zona de interés.

La altura del rayo en el punto de obstrucción, h_{los} , viene dada por:

$$h_{los} = h_{tx} - \frac{r_{los}(h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}} \quad (1)$$

siendo:

h_{tx} : altura del transmisor con respecto al suelo

h_{rx} : altura del receptor a la distancia, r_{rx}

r_{los} : distancia entre el transmisor y el obstáculo.

Si se parte de que, por término medio, los edificios están espaciados de forma uniforme, puede calcularse el número de edificios que hay entre dos puntos. La probabilidad de que exista un rayo con LoS es:

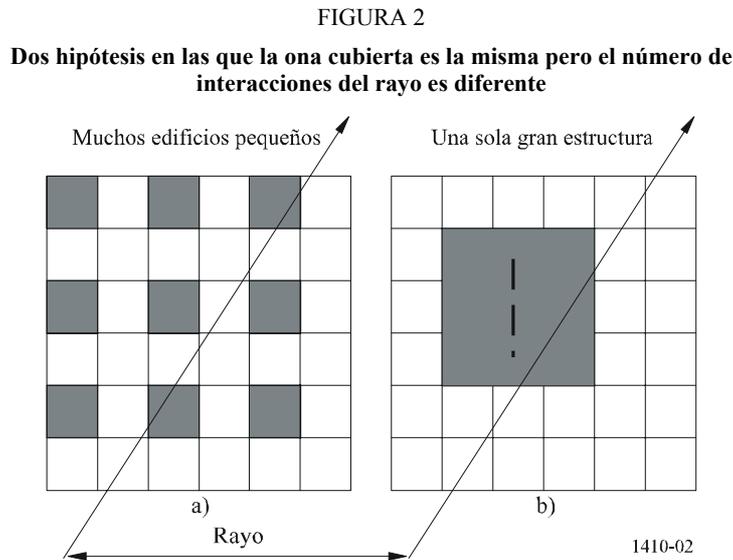
$$P(\text{LoS}) = \prod_{b=1}^{b_r} P(\text{altura_edificio} < h_{\text{los}}) \quad (2)$$

siendo b_r el número de edificios por los que pasa el rayo.

Para este modelo sencillo, se requieren tres parámetros:

- α : relación entre la superficie de tierra cubierta por edificios y la superficie total (adimensional);
- β : número medio de edificios por unidad de superficie (edificios/km²);
- γ : variable que determina la distribución de la altura de los edificios.

Para la distribución de Rayleigh propuesta, la variable γ es igual a la altura más probable de los edificios. El motivo de la distinción entre α y β se ilustra en la Fig. 2. Tanto la Fig. 2a) como la Fig. 2b) tienen la misma superficie de tierra cubierta y, por consiguiente, el mismo valor de α , pero se prevén más interacciones de rayos en la Fig. 2a) que en la Fig. 2b). El parámetro α por sí solo no diferencia a los dos diagramas que se muestran en la Fig. 2. Si los edificios tienen una altura similar tanto en la Fig. 2a) como en la Fig. 2b), la probabilidad de despejamiento de un gran número de edificios pequeños será significativamente menor que si sólo hay un gran edificio.



Para emplazamientos que van de las zonas de edificaciones bajas a las de rascacielos, el valor de α irá de 0,1 a 0,8 y el de β de 750 a 100 respectivamente.

La distribución de probabilidad de Rayleigh, $P(h)$, de la altura, h , define el parámetro γ :

$$P(h) = \frac{h^2}{\gamma^2} e^{-\frac{h^2}{2\gamma^2}} \quad (3)$$

2.1.3 Algoritmo y cálculo

Dados α , β y γ , la cobertura del rayo con LoS se calcula de la siguiente forma:

Un rayo de una longitud de 1 km pasará sobre $\sqrt{\beta}$ edificios si éstos están colocados formando una retícula uniforme. Como la zona cubierta es sólo una fracción de α , el número previsible de edificios sobre los que se pase por km viene dado por:

$$b_1 = \sqrt{\alpha \beta} \tag{4}$$

y para un trayecto de longitud r_{rx} (km), el número de edificios es:

$$b_r = \text{suelo}(r_{rx} b_1) \tag{5}$$

en donde se ha introducido la función de suelo para garantizar la inclusión en la ecuación (2) de un número entero de términos.

Para calcular la probabilidad de que exista un rayo con LoS en cada gama r_{rx} :

Paso 1: Calcular el número de edificios, b_r , entre los puntos Tx y Rx utilizando la ecuación (5).

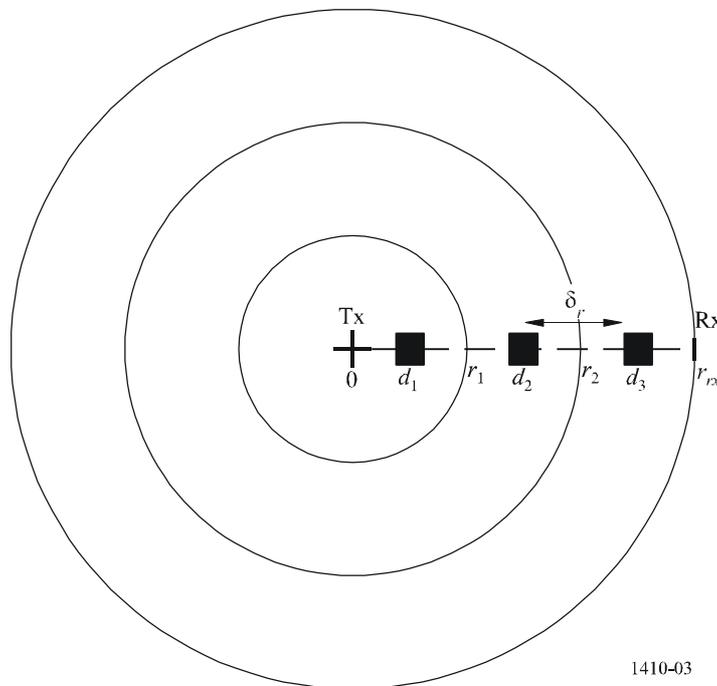
Paso 2: Se supone que los edificios están espaciados de forma regular entre los puntos Tx y Rx, y las distancias entre los edificios vienen dadas por:

$$d_i = (i + 1/2) \delta_r \quad i \in \{0, 1, \dots, (b_r - 1)\} \tag{6}$$

siendo $\delta_r = r_{rx}/b_r$ la separación entre los edificios.

FIGURE 3

Situación de los edificios con respecto al Receptor (Rx), a una distancia, r_{rx} del Transmisor (Tx)



Paso 3: Para cada d_i , la altura, h_i , de un edificio que pudiera obstruir el rayo con LoS se obtiene sustituyendo d_i en la ecuación (1).

$$h_i = h_{tx} - \frac{d_i(h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}} \quad (7)$$

Paso 4: La probabilidad, P_i , de que un edificio sea más pequeño que la altura, h_i , viene dada por:

$$P_i = \int_0^{h_i} P(h) dh \quad (8)$$

$$= 1 - e^{-h_i^2 / 2\gamma^2}$$

Paso 5: La probabilidad, $P_{los,i}$, de que haya una línea de LoS en la posición d_i viene dada por:

$$P_{los,i} = \prod_{j=0}^i P_j \quad j \in \{0, \dots, i\} \quad (9)$$

Paso 6: La cobertura acumulada se obtiene ponderando cada valor de $P_{los,i}$ con los factores W_i , que dependen de la distancia desde el transmisor. Se tiene en cuenta el número de edificios en un anillo que es más amplio cuanto mayor es la distancia:

$$W_i = 2i + 1 \quad (10)$$

Paso 7: El sumatorio de las probabilidades ponderadas de edificios, normalizado por la zona del anillo acumulativo y multiplicado por la densidad de los edificios da la cobertura necesaria para una célula con radio r_{rx} :

$$CP_{r_{rx}} = \frac{\sum_{i=0}^{b_r-1} P_{los,i} W_i}{b_r^2} \quad (11)$$

Existen ciertas limitaciones a esta simulación, así como una serie de formas de ampliar el modelo:

- En el modelo no se ha tenido en cuenta ninguna variación del terreno. Es evidente que incluso la existencia de variaciones en algunos metros solamente pueden tener repercusiones significativas. La combinación de las propiedades estadísticas del modelo con unos datos aproximados sobre el terreno, añadiendo una desviación media de la altura del bloqueo en cada punto comprobado del modelo, ampliaría las capacidades de predicción del mismo.
- La densidad de edificios y la altura de los mismos varían enormemente de una región a otra, por lo que las predicciones en una determinada dirección deben ser diferentes de las de otra. Si se toman los valores medidos de las distribuciones de altura de los edificios, es evidente que éstos no se ajustan perfectamente al diagrama estadístico simple. Subdividir los datos en regiones más pequeñas y asignar a cada región un conjunto de parámetros propio ayudaría en gran medida a solucionar este problema.
- En realidad, los receptores están situados en los tejados de los edificios, por lo que la distribución de las alturas de los receptores es la misma que la de los puntos de altura de los edificios. En el modelo se supone que los receptores están a una altura constante con respecto al suelo. Una alternativa sería obtener las alturas de los receptores a partir de la distribución de los edificios; esto dependería también de las regiones.

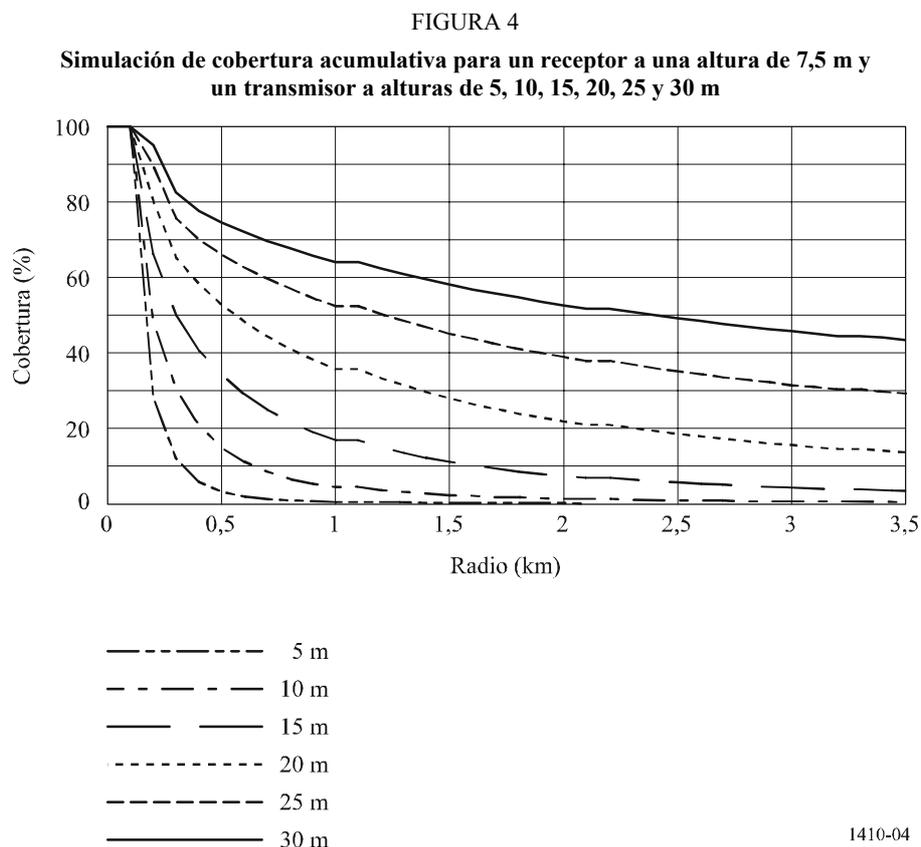
- El método derivado del algoritmo utilizado proporciona buenas estimaciones de cobertura cuando ésta se compara con los resultados del trazado de rayos basado en bases de datos reales, véase el § 2.1.4. Se ha comprobado que la distribución de Rayleigh de la altura de los edificios ha proporcionado resultados precisos para algunas muestras de datos realizadas en una zona limitada, por ejemplo, una ciudad pequeña. Además, para obtener los resultados de cobertura que se muestran en el § 2.1.4, el método se ha utilizado conjuntamente con el modelo de ubicación de edificios y el modelo de despejamiento de trayecto tal como se describe en el procedimiento paso a paso.

2.1.4 Ejemplos de predicciones de cobertura

El modelo de Rayleigh se aplicó a la distribución acumulativa de alturas de tejados de una zona de edificaciones bajas del Reino Unido (Malvern). Para este conjunto de datos, los parámetros medios del modelo respecto al centro de la ciudad eran:

$$\alpha = 0,11; \quad \beta = 750; \quad \gamma = 7,63$$

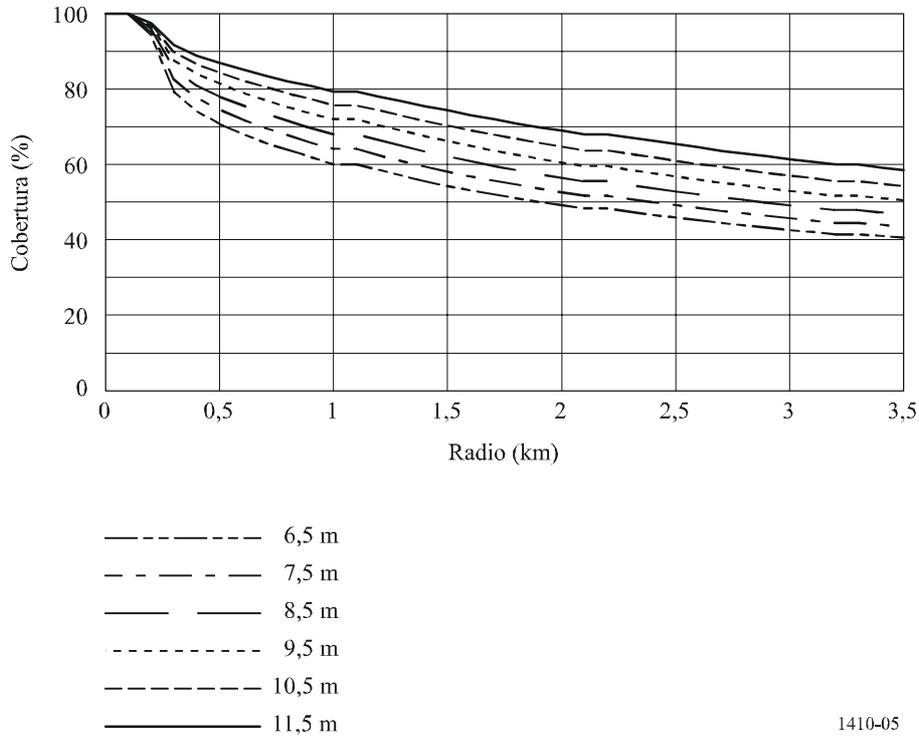
En las Figs. 4 y 5 se muestran los resultados obtenidos a partir del modelo. La Fig. 4 muestra la cobertura en función de la altura del transmisor, y la Fig. 5 en función de la altura del receptor.



Con el modelo se obtienen predicciones con la misma configuración básica y el mismo nivel de cobertura global que los resultados de las simulaciones detalladas de trazado de rayos. La utilidad del modelo consiste en que permite generar predicciones de cobertura basadas en tres parámetros únicamente, los cuales pueden calcularse para cualquier emplazamiento urbano con muy poca información sobre la zona. A medida que se disponga de más datos tridimensionales deberá ser posible generar cuadros de parámetros para diferentes ciudades/zonas urbanas que puedan utilizarse como referencia para la estimación de la cobertura en un lugar desconocido. El modelo no sólo

puede utilizarse para calcular la cobertura de una única célula, sino que pueden combinarse los resultados de un gran número de células para calcular la cobertura de redes extensas teniendo en cuenta los efectos de la diversidad.

FIGURA 5
Simulación de cobertura acumulativa para un transmisor a una altura de 30 m y un receptor a alturas de 6,5, 7,5, 8,5, 9,5, 10,5 y 11,5 m



1410-05

2.1.5 Ampliación de la cobertura utilizando dos o más estaciones base

Una arquitectura de células que permita a los receptores elegir entre varias estaciones base amplía significativamente la cobertura. Por ejemplo, los cálculos de trazado de rayos mostraron que en el caso de antenas transmisoras de 30 m de altura, la cobertura de una célula de 2 km pasaba de ser del 44% con una única estación de base al 80% con dos estaciones y a un 90% con cuatro estaciones, aun cuando las estaciones de base no se habían elegido especialmente por tener una buena visibilidad.

Asumiendo que las probabilidades de trayectos LoS hasta las distintas estaciones base de interés son estadísticamente independientes, puede calcularse la probabilidad de que exista al menos un trayecto. En primer lugar, debe calcularse cada $P_{los,i}$ a partir de la ecuación (9). La probabilidad de que haya al menos un trayecto visible cuando hay m posibles estaciones base, viene dada por:

$$P_{los,i} = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - P_{los,i,k}) \quad (12)$$

La cobertura obtenida cuando se utilizan dos o más estaciones base puede estimarse sustituyendo $P_{los,i}$ en la ecuación (9) del procedimiento del § 2.1.3 por la ecuación (12). Obsérvese que para cada k deben seguirse los Pasos 1 a 5, en los que r_{rx} es la distancia a cada estación base.

2.2 Atenuación debida a la vegetación

La existencia de árboles que bloqueen puede limitar drásticamente el número de hogares a los que pueda proporcionarse un servicio. Por consiguiente, es muy importante disponer de un modelo fiable para simular los efectos y el grado de atenuación debida a la vegetación, ya que si los receptores se encuentran cerca del transmisor, el margen del sistema puede ser tan pequeño que la intensidad de la señal que se propague a través de un solo árbol sea insuficiente para prestar un servicio.

Los estudios de trazado de rayos realizados en seis ciudades del Reino Unido utilizando las bases de datos que contienen todos los edificios y árboles existentes mostraron que hasta el 5% de los edificios en un radio de 1 000 m desde una estación de base central estaban obstruidos por la vegetación. La estación de base estaba ubicada encima del edificio más alto de la zona, generalmente a 30-40 m por encima del nivel del suelo y se consideraba que un edificio no estaba bloqueado si era posible establecer un trayecto de visibilidad directa hacia cualquier punto de prueba de dicho edificio. Los puntos de prueba del edificio se situaron siguiendo una cuadrícula regular de 1 m en el punto más alto de la huella de cada edificio. En un radio superior a unos 1 200 m, el porcentaje de bloqueo debido a la vegetación no varió, siempre y cuando se mantuviese la altura de la estación de base. En radios más amplios, debido a la curvatura de la Tierra, las causas dominantes del bloqueo eran otros edificios y la orografía del terreno. En zonas suburbanas, el bloqueo debido a la vegetación fue del 25% aproximadamente.

Las mediciones se realizaron a 42 GHz para determinar la importancia de la atenuación debida a «vegetación local». La atenuación media fue la esperada de acuerdo con la Recomendación UIT-R P.833, pero se constató la existencia de efectos de trayectos múltiples importantes, que causaban nulos profundos de la señal; dichos efectos variaban en el tiempo y según el movimiento de la vegetación con el viento. Se comprobó que podía realizarse una descorrelación adecuada de estos nulos por trayectos múltiples utilizando dos antenas con una separación aproximada de 60 cm o más. Las separaciones inferiores mostraron una mayor correlación y las separaciones más grandes una pequeña mejora de la descorrelación de la atenuación, lo que sugiere que con una configuración con diversidad en el espacio de dos antenas se puede lograr el funcionamiento de los servicios en estas situaciones. Un experimento a 42 GHz utilizando dos antenas separadas de 62 cm demostró una importante variabilidad entre ellas, así como una posible mejora por diversidad. Una medición a largo plazo de la propagación a través de árboles con hojas demostró que puede obtenerse normalmente una ganancia por diversidad de 10 dB.

La atenuación causada por árboles es importante en el caso de longitudes de onda milimétricas. La tasa de atenuación depende del tipo de árboles, las condiciones de humedad y la geometría del trayecto, pero, a título orientativo, puede tomarse una tasa de 4 a 5 dB/m (aunque la atenuación alcanza un máximo valor determinado, normalmente 20-40 dB). Se recomienda la utilización del modelo que figura en la Recomendación UIT-R P.833 para determinar la importancia de la atenuación debida a la vegetación.

2.3 Consideraciones de carácter general

Se han observado algunas tendencias generales considerando varias bases de datos de Europa del Norte. El trazado de rayos se ha utilizado para calcular la cobertura (en base al nivel de bloqueo producido por los edificios y la vegetación entre la estación de base y las instalaciones del usuario) en función de la altura de las antenas transmisora y receptora, la ventaja de contar con varios servidores y la magnitud del bloqueo por vegetación. Las observaciones más importantes son como sigue:

- La cobertura puede depender en gran medida del lugar, especialmente si se dan determinadas características topográficas o se produce un bloqueo por edificios excepcional en la zona del transmisor. Sin embargo, investigaciones efectuadas en diferentes lugares

urbanos/suburbanos dieron unas cifras de cobertura del 40-60% para una célula de 2 km a partir de un transmisor con un mástil de 30 m.

- La cobertura aumenta del 1 al 2% por cada metro de altura del mástil de la estación de base.
- La cobertura aumenta del 3 al 4% por cada metro de altura del mástil de las instalaciones del usuario.
- Una arquitectura de células que permita a los receptores elegir entre varias estaciones de base aumenta significativamente la cobertura. Por ejemplo, en el caso de una antena transmisora de 30 m de alto, la cobertura en una célula de 2 km aumenta del 44% con una sola estación de base al 80% con dos estaciones y al 90% con cuatro estaciones, aun cuando las estaciones de base no se hayan elegido especialmente por tener una buena visibilidad.

3 Efectos de las precipitaciones en el nivel de disponibilidad del servicio

Una vez que se ha visto que un determinado usuario tiene una línea de LoS hasta la estación de base con un margen adecuado de sistema de espacio abierto, es necesario calcular el porcentaje de tiempo en que el servicio podrá prestarse teniendo en cuenta los efectos de las precipitaciones.

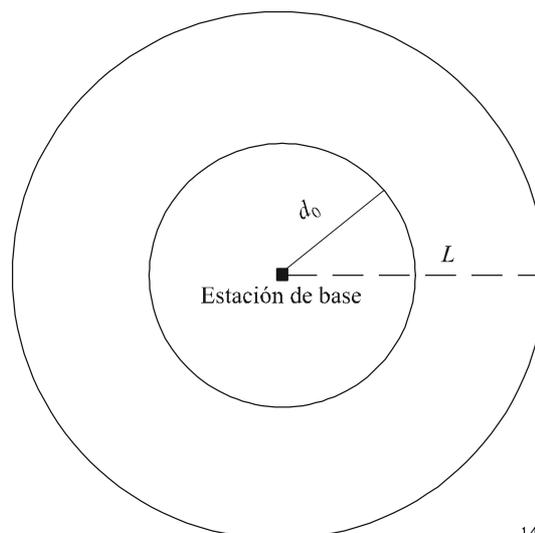
Para cualquier enlace en la zona de servicio de las estaciones de base, la disponibilidad en condiciones de precipitación puede calcularse utilizando los métodos de la Recomendación UIT-R P.530.

3.1 Cobertura de zona simultánea

Dado que la lluvia no es uniforme en las dos dimensiones horizontales, el modelo unidimensional de la Recomendación UIT-R P.530 para lluvia no uniforme en el caso de enlaces punto a punto no puede aplicarse a situaciones punto a zona. Esta disimilitud bidimensional puede tenerse en cuenta aplicando una distribución media de la intensidad de lluvia en la célula que se investiga. Con una célula de alimentación central y radio L , la ilustración de la Fig. 6 indica la zona equivalente, determinada por el radio d_0 , cubierta durante el porcentaje de tiempo elegido.

FIGURA 6

Diagrama de la célula de alimentación central en el que se muestra el radio de la zona de cobertura equivalente en condiciones de lluvia



1410-06

Se ha elaborado un procedimiento para predecir la cobertura de zona basado en mediciones con radar de la intensidad de lluvia del Reino Unido en un periodo de dos años.

Para una célula *de alimentación central* con radio L (km) y un margen de desvanecimiento del sistema F (dB) en el borde:

Paso 1: Obtener la intensidad de lluvia media de la zona, $R_a(p)$, superado durante el $p\%$ del tiempo utilizando una red de pluviómetros y un radar de lluvia o modelos analíticos de fuertes aguaceros. En el Cuadro 2 se da un ejemplo de ese parámetro para datos obtenidos mediante radar en el Reino Unido. Con respecto a la intensidad de lluvia en un punto, se puede observar que la intensidad de lluvia media de la zona se reduce muy poco con un nivel de superación del 0,1%, en torno a un tercio con un nivel del 0,01% y en torno a la mitad con un nivel del 0,001% en una zona circular de 2,5 km de radio.

Paso 2: Encontrar la distancia de corte, d_0 , durante el $p\%$ de un año medio resolviendo la ecuación (13) para d numéricamente.

$$k R_a^\alpha(p) d \left(1,5 + \left(1,1 (2d^{-0,04} - 2,25) \right) \log(R_a(p)) \right) + 20 \log(d/L) = F \quad (13)$$

siendo k y α parámetros que determinan la atenuación específica debida a la lluvia a la que se refiere la Recomendación UIT-R P.838. La fórmula $(1,5 + 1,1 (2d^{-0,04} - 2,25)) \log(R_a(p))$ representa el factor de reducción de trayecto aplicable para los cálculos de la zona.

Paso 3: Para la distancia de corte, $d_0 \propto (L, p, F)$, la cobertura de zona de esta célula es:

$$C(L, p, F) = 100 \left(\frac{d_0}{L} \right)^2 \quad \% \quad (14)$$

En el Cuadro 2 se da un ejemplo de intensidad de lluvia media en una zona obtenido de observaciones por medio de radar en el Reino Unido. La intensidad de lluvia en un punto y los valores medios de la zona se han obtenido a partir de los datos del radar. Cabe señalar que el valor de los índices medios de zona es menor cuanto mayor es la zona promediada. En la Fig. 7 se muestran los resultados del procedimiento para dos células de alimentación central de 2,5 y 5 km de radio y para dos sistemas, que utilizan polarización vertical en 42 GHz, con un margen de atenuación debida a la lluvia de 10 y 15 dB en el borde de la célula. Aquí se supone también que la ganancia de la antena transmisora es igual para todos los usuarios. En los cálculos se ha tenido en cuenta la pérdida en espacio libre.

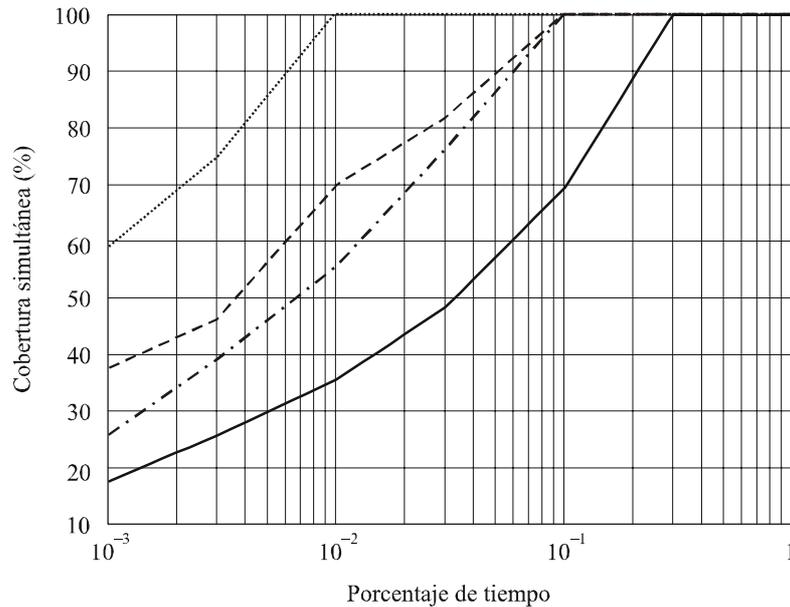
CUADRO 2

Intensidad de lluvia media en un punto y en una zona, obtenidas a partir de datos de radar correspondientes a dos años en el Reino Unido

| Porcentaje de tiempo | Intensidad de lluvia en un punto, R (mm/h) | Intensidad de lluvia media, R (mm/h) | |
|----------------------|--|--|--------------|
| | | Radio = 2,5 km | Radio = 5 km |
| 0,001 | 65,6 | 36,0 | 33,0 |
| 0,003 | 46,2 | 29,0 | 23,4 |
| 0,01 | 29,9 | 19,4 | 17,1 |
| 0,03 | 18,1 | 16,3 | 12,6 |
| 0,1 | 9,8 | 9,5 | 8,5 |
| 0,3 | 5,0 | 4,9 | 4,8 |
| 1 | 2,0 | 2,1 | 2,1 |

FIGURA 7

Aplicación del procedimiento (utilizando los datos sobre intensidad de lluvia del Cuadro 2)



| | Radio de la célula (km) | Margen (dB) |
|-------------|-------------------------|-------------|
| ----- | 2,5 | 10 |
| | 2,5 | 15 |
| ———— | 5 | 10 |
| - . - . - . | 5 | 15 |

1410-07

3.2 Mejora por diversidad de rutas

La precipitación varía considerablemente en el tiempo y en el espacio tanto vertical como horizontalmente. En la presente simulación se ha reflejado esta variabilidad para un único enlace entre dos terminales, por ejemplo, utilizando una longitud de trayecto adecuada. Supóngase que un usuario puede conectarse a dos o más estaciones de base en cualquier momento. Lo que sigue describe hasta qué punto puede ampliarse la disponibilidad del servicio si se instala un sistema semejante.

Se parte de una red en estrella de nodo común formada por dos transmisores y un receptor con longitudes de trayecto iguales, y cuya separación angular va de 0° a 360°.

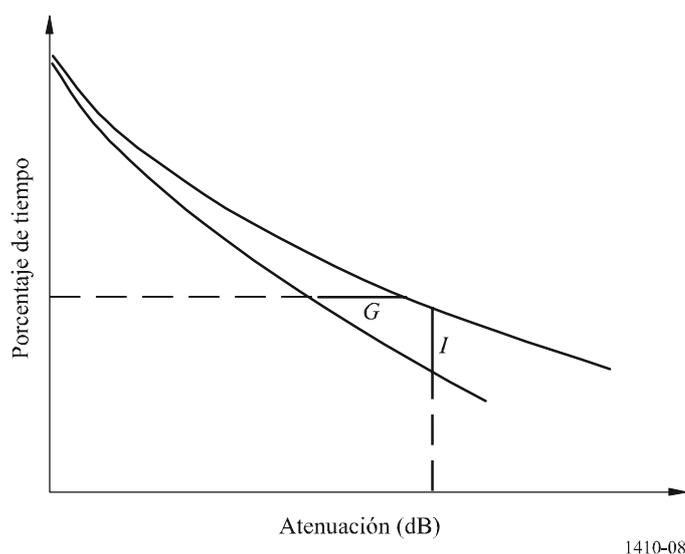
Dado que la lluvia no es uniforme horizontalmente, las estadísticas de atenuación para un único trayecto y para los dos trayectos de diversidad son diferentes. En la Fig. 8 se muestran estadísticas típicas de atenuación en un trayecto no protegido y en los trayectos de combinación de la diversidad. La mejora debida a la separación angular, que puede expresarse como la mejora por diversidad, $I(A)$, o ganancia de diversidad, $G(A)$, se define de la siguiente manera:

$$I(A) = \frac{P(A)}{P_d(A)} \tag{15}$$

$$G(A) = A(t) - A_d(t) \tag{16}$$

siendo $P_d(A)$ el porcentaje de tiempo en el trayecto de combinación de la diversidad con una profundidad de desvanecimiento superior a A , y $P(A)$ el porcentaje de tiempo en el trayecto no protegido. De igual forma, $A_d(t)$ es la profundidad del desvanecimiento en el trayecto de combinación de la diversidad que se produce durante el porcentaje de tiempo t , y $A(t)$, en el trayecto no protegido.

FIGURA 8
Ejemplo de estadísticas de atenuación con diversidad de ángulos de trayecto



1410-08

La ganancia por diversidad, G , se calcula de la siguiente manera:

Paso 1: Se establece el ángulo θ entre dos trayectos de longitudes $d_{m\acute{a}x}$ y $d_{m\acute{i}n}$.

Paso 2: Se calcula G_{sym} .

$$G_{sym} = a_g d_{m\acute{a}x}^{b_g}$$

como función de $d_{m\acute{a}x}$ y utilizando los coeficientes a_g y b_g del Cuadro 3 para los distintos porcentajes de disponibilidad del enlace.

CUADRO 3

Valores de los coeficientes para distintas disponibilidades del enlace

| Disponibilidad (%) | a_g | b_g |
|--------------------|-------|-------|
| 99 | 0,123 | 1,366 |
| 99,5 | 0,218 | 1,308 |
| 99,7 | 0,342 | 1,259 |
| 99,9 | 0,648 | 1,173 |
| 99,95 | 0,810 | 1,165 |
| 99,97 | 1,132 | 1,169 |
| 99,99 | 2,041 | 1,077 |

Paso 3: Se determina el factor a de simetría del trayecto a partir de la siguiente fórmula:

$$a = c \left(\frac{d_{\max}}{d_{\min}} \right)^{-d} \quad (17)$$

cuyos coeficientes c y d se muestran en el Cuadro 4.

CUADRO 4

Valores de los coeficientes c y d para distintas disponibilidades del enlace

| Disponibilidad (%) | c | d |
|--------------------|-------|-------|
| 99 | 0,907 | 2,852 |
| 99,5 | 0,946 | 2,976 |
| 99,7 | 0,969 | 2,761 |
| 99,9 | 0,971 | 2,821 |
| 99,95 | 0,930 | 2,347 |
| 99,97 | 0,905 | 2,316 |
| 99,99 | 1,000 | 2,270 |

Para trayectos de igual longitud, $a = 1$.

Paso 4: La ganancia por diversidad, G , a la disponibilidad deseada es:

$$G = G_{sym} \text{asen} \left(\frac{\theta}{2} \right)^x \quad \text{dB}$$

donde x se obtiene mediante la ecuación:

$$x = 0,87 \ln \left(\frac{d_{\max}}{d_{\min}} \right) + 0,55 \quad \text{para } 1 \leq (d_{\max}/d_{\min}) \leq 2$$

La mejora por diversidad, I , se calcula aplicando los siguientes pasos:

Paso 1: Se establece el ángulo θ entre dos trayectos d_{\max} y d_{\min} .

Paso 2: Se calcula I_{sym} mediante la siguiente fórmula:

$$I_{sym} = 10^{(a_i L^{b_i})} - 1$$

a_i y b_i pueden obtenerse del Cuadro 5 donde aparece la atenuación rebasada para distintos porcentajes de tiempo.

CUADRO 5

Valores de los coeficientes para distintas profundidades de exceso de desvanecimiento en función del porcentaje de tiempo *A*

| Tiempo (%) | <i>a_i</i> | <i>b_i</i> |
|------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 0,082 | 0,491 |
| 0,5 | 0,114 | 0,431 |
| 0,3 | 0,106 | 0,535 |
| 0,1 | 0,155 | 0,559 |
| 0,05 | 0,196 | 0,566 |
| 0,03 | 0,324 | 0,406 |

Paso 3: Se determina el factor *a* de asimetría del trayecto a partir de la siguiente fórmula:

$$a = c \left(\frac{d_{m\acute{a}x}}{d_{m\acute{i}n}} \right)^{-d} \tag{18}$$

los coeficientes *c* y *d* son los que se enumeran en el Cuadro 6.

CUADRO 6

Valores de los coeficientes *c* y *d* para distintas profundidades de exceso de desvanecimiento en un porcentaje de tiempo especificado

| Tiempo (%) | <i>c</i> | <i>d</i> |
|------------|----------|----------|
| 1 | 0,851 | 2,355 |
| 0,5 | 0,961 | 2,493 |
| 0,3 | 0,882 | 2,288 |
| 0,1 | 0,768 | 2,631 |
| 0,05 | 0,762 | 2,198 |
| 0,03 | 0,858 | 2,427 |

Para trayectos iguales, *a* = 1.

Paso 4: La mejora por diversidad, *I*, con la atenuación deseada es:

$$I = 1 + I_{sym} \operatorname{asen} \left(\frac{\theta}{2} \right)^x$$

donde *x* se obtiene de la siguiente ecuación:

$$x = 0,61 \ln \left(\frac{d_{m\acute{a}x}}{d_{m\acute{i}n}} \right) + 0,84 \text{ para } 1 \leq (d_{m\acute{a}x}/d_{m\acute{i}n}) \leq 2$$

Cabe señalar que estos métodos se han elaborado a partir de las intensidades de lluvia observadas por radar en el Reino Unido.

4 Distorsión en el canal de propagación

En este punto se analizan los efectos instantáneos de la dinámica de la vegetación y del multitrayecto causado por los edificios y por el terreno en el canal de propagación. Dada la actual escasez de datos, se proporcionan los resultados de las mediciones de que se dispone para que sirvan de orientación. En la Recomendación UIT-R P.833 aparece información sobre la variabilidad de la señal, la desviación típica y la propagación a través de vegetación en movimiento.

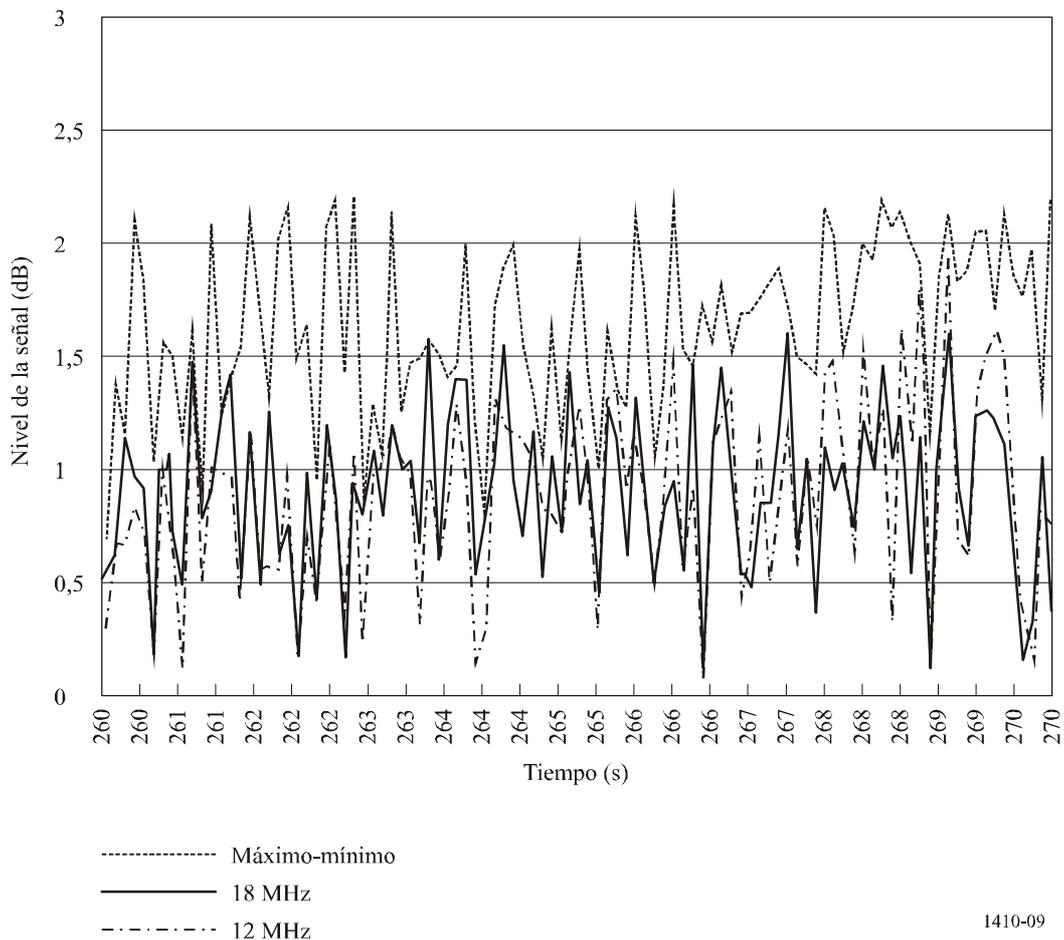
4.1 Atenuación causada por la vegetación a determinadas frecuencias

Se han realizado mediciones con un banco de filtros en una transmisión de anchura de banda de 34 MHz para investigar la posibilidad de que se produzcan desvanecimientos en el canal en función de la frecuencia. El banco de filtros consistió en ocho canales de una anchura de banda de 1,6 MHz (-3 dB) separados por 3 MHz situados en medio del canal.

La medición se realizó detrás de un abedul a una distancia de 15 m. El intervalo de muestreo fue de 100 ms. Como durante el periodo de medición no hubo viento, se simuló atando cuerdas al árbol. En la Fig. 9 se muestra una comparación del nivel de la señal de los canales en condiciones muy ventosas. El pequeño nivel de variación que se observa entre los canales sugiere que el desvanecimiento en función de la frecuencia no es un fenómeno importante. La variación en el tiempo del nivel de la señal podría deberse por consiguiente a una variación de la obstrucción, o de la densidad de ramas y hojas entre el receptor y el transmisor, o, deberse al multitrayecto cuando las diferencias en el tiempo de propagación son muy pequeñas.

FIGURA 9

Comparación del nivel de la señal de los canales en condiciones muy ventosas



Para seguir corroborando las observaciones, se llevó a cabo un experimento utilizando un combinador de máxima potencia (MPC, *maximum power combiner*) y dos antenas individuales con una separación de 72 cm. Un Grupo de Expertos de imágenes en movimiento (MPEG-2) realizó una transmisión de prueba de televisión a 42 GHz, utilizando el formato radiodifusión de vídeo digital por satélite (DVB-S, *satellite digital video broadcasting*), de modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (MPD-4), velocidad 1/2 (FEC). Las señales de cada antena, así como las señales combinadas a través del combinador de máxima potencia se introdujeron en tres adaptadores multimedios DVB-S y monitores de vídeo. La geometría se configuró de manera que ambas antenas recibían señales a través de ramas en movimiento. Los dos sistemas DVB-S con una sola antena sufrieron una pérdida periódica de paquetes. La tasa de pérdida de paquetes era excesiva para que el decodificador pudiese corregirla, lo que causó una frecuente pérdida de vídeo. Inversamente, la señal con combinación de máxima potencia sufrió una pérdida de paquetes mucho menor, por lo que el decodificador MPEG-2 fue capaz de compensar esta pérdida y el vídeo permaneció estable.

4.2 Multitrayecto producido por reflexión

4.2.1 Resultados del trazado de rayos

Las simulaciones de trazado de rayos han mostrado que el problema del multitrayecto parece ser leve en las condiciones en las que el sistema deberá funcionar. La pequeñísima anchura del haz de la antena receptora provoca una fuerte atenuación de la mayoría de las señales de multitrayecto. Únicamente los rayos rasantes muy superficiales procedentes de los tejados cercanos y del suelo llegan al receptor con una magnitud apreciable. Consecuencia de ello es que los valores de dispersión de los tiempos de propagación que se dan en las simulaciones son muy bajos.

Los rayos difractados no se han tenido en cuenta en las simulaciones de trazado de rayos, pero en trabajos anteriores se vio que había muy pocas posiciones desde las que se podía hacer uso de rayos difractados, y en consecuencia, hay pocos lugares en los que los rayos difractados puedan ser una fuente importante de interferencia.

Los ejemplos de cálculos por trazado de rayos de la dispersión de los tiempos de propagación en los emplazamientos del receptor, realizados a partir de una amplia base de datos (de Oxford, en el Reino Unido) muestran valores extremadamente pequeños, debido a los ínfimos niveles de multitrayecto. El valor eficaz de la dispersión de los tiempos de propagación estaba en torno a 0,01 ns, lo que corresponde aproximadamente a una anchura de banda de coherencia de 15 GHz. Ello no debería causar problemas a un sistema de acceso radioeléctrico de banda ancha. Es improbable que el verdadero valor eficaz de la dispersión de los tiempos de propagación tenga un valor tan bajo como ése en la realidad, debido a los rayos difractados mencionados más arriba, pero tomar una anchura de banda de coherencia de hasta 5 GHz puede todavía considerarse realista. La desviación típica del valor eficaz de la dispersión de los tiempos de propagación está en torno a 0,01 ns.

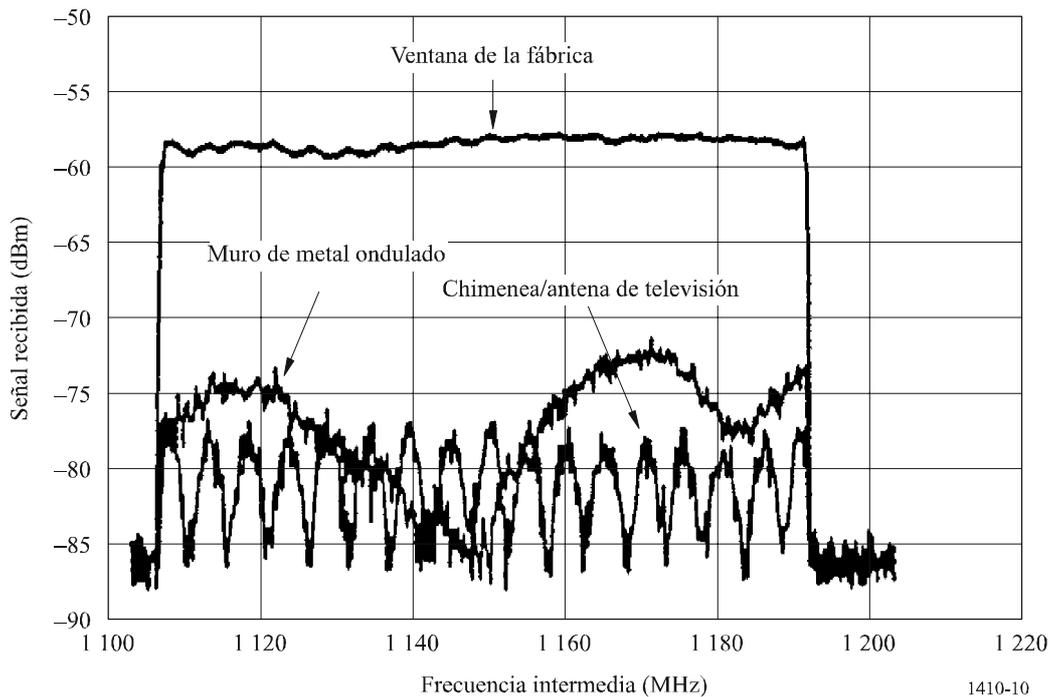
4.2.2 Resultados de las mediciones

La reflexión causada por edificios puede considerarse tanto una posibilidad de rellenar una zona de sombra como un multitrayecto perjudicial. Algunas observaciones utilizando un barrido de frecuencias de 80 MHz mostraron que puede obtenerse un aumento del 9% del número de lugares que reciben una señal adecuada incluyendo señales reflejadas. Sin embargo, debe señalarse que existen varios problemas cuando se utilizan señales reflejadas para proporcionar un servicio. En primer lugar, la señal debe ser estable, lo que significa que la incidencia de la señal en el objeto de reflexión debe ser un trayecto con LoS. Si una parte del trayecto pasa a través de vegetación o de un trayecto y hay probabilidades de que se bloquee por movimiento de tráfico, la señal resultante será variable en el tiempo. En segundo lugar, el propio objeto reflectante debe ser permanente y estable.

La extensión y la desigualdad de la superficie del edificio reflectante influyen en gran medida en la respuesta en función de la frecuencia del canal. En la Fig. 10 se muestra la respuesta del canal medida ante tres señales reflejadas diferentes: una procedente de la ventana de una fábrica, la otra de la chimenea de una casa en una hilera (con una antena de televisión Yagi) y otra del muro de metal ondulado de un gran edificio comercial. Se señala que en el caso de este último edificio, el muro ondulado producía una reflexión extendida en ángulo más que una simple reflexión especular. La distancia de los lugares hasta el transmisor era de 1,34 km, 1,57 km y 616 m respectivamente.

FIGURA 10

Respuesta en función de la frecuencia en casos de reflexión medida en tres ubicaciones diferentes

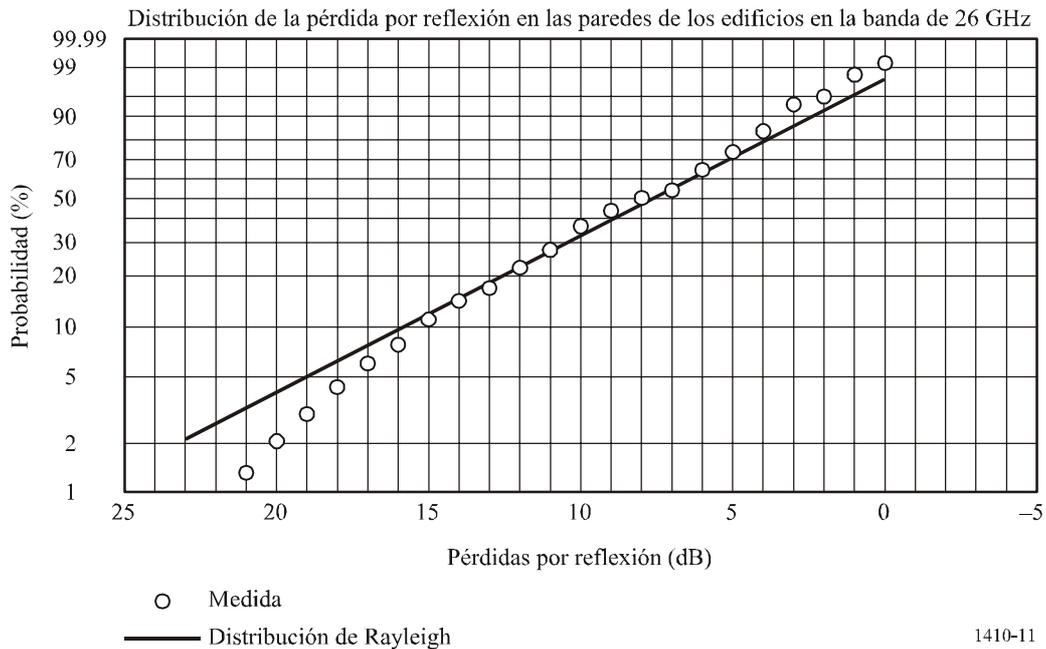


Puede verse que la ventana de la fábrica provocaba una respuesta en función de la frecuencia razonablemente uniforme, ya que se comporta como un espejo uniforme con un solo elemento reflectante. Sin embargo, el muro de metal y la chimenea muestran una ondulación clara, correspondiente a las diferencias en la longitud del trayecto (en el supuesto de un modelo de dos rayos) de 6 m y 60 m respectivamente. En el caso de la reflexión por la chimenea, esta gran longitud del trayecto puede deberse a la combinación de la reflexión en otro objeto situado a unos 30 m o detrás de la chimenea. En el caso del muro ondulado, la diferencia de 6 m de la longitud del trayecto se produce a partir de diferentes partes del propio muro, ya que las señales las puede reflejar todo el edificio, no sólo la pequeña zona reflectante.

Medidas de barrido de frecuencias utilizando una señal en 26 GHz con polarización vertical y ángulos de reflexión entre $87,5^\circ$ y 89° (es decir, casi normales a la superficie de la pared) mostraron una atenuación media de 7,5 dB. El transmisor y el receptor estaban colocados. La distancia a las paredes oscilaba entre 37 m y 402 m. Se utilizaron cuatro edificios en los que las paredes eran de cristal, azulejos y metal, con irregularidades que oscilaban entre 3 cm y 75 cm. Nótese que el vector de campo eléctrico era paralelo a las paredes. En la Fig. 11 se muestra la distribución acumulativa de las pérdidas por reflexión.

FIGURA 11

Distribución acumulativa de la pérdida por reflexión en la pared de los edificios medida a 26 GHz



5 Interferencia

Los sistemas radioeléctricos celulares están diseñados de forma que exista un equilibrio entre el patrón de reutilización de frecuencias y la relación portadora/interferencia, *C/I*. Sería necesario una relación *C/I* mínima para que un determinado sistema funcione de forma satisfactoria, es decir, de acuerdo con un nivel de rendimiento especificado.

Dada la *C/I* mínima requerida, resulta fácil elaborar un patrón de reutilización de frecuencias regular que satisfaga los requisitos. Sin embargo, deben tenerse en cuenta las características del terreno y además se ha de elegir con cuidado un emplazamiento verdaderamente adecuado de la estación de base para lograr la calidad de funcionamiento deseada del sistema de acceso radioeléctrico.

En la mayoría de los casos sólo resultarán afectados algunos usuarios debido a la estrechez del haz de sus antenas de terminal. La anchura de los haces es del orden de 2° a 3°. En el caso de los usuarios que puedan resultar afectados, cabe aplicar los modelos de las Recomendaciones UIT-R P.452 y UIT-R P.530 para calcular el porcentaje de tiempo en el que las señales perjudiciales mejoradas sin LoS y con LoS, respectivamente, se produce a partir de la estación de base interferente. Sin embargo, no se dispone de datos por encima de 37 GHz para sustentar los valores predichos.

Se realizó una estimación del problema de la interferencia utilizando los datos de 111 emplazamientos analizados en una campaña de medición de cobertura de zona del Reino Unido. Se consideró un segundo transmisor como una fuente potencial de interferencia. En todo el conjunto de datos, sólo una posición mostraba una señal procedente del transmisor no deseado por encima del umbral de ruido dentro de la anchura del haz de la antena que apuntaba al transmisor deseado, e incluso en ese caso, la relación entre la señal deseada y la no deseada era de 15 dB. Ello parecería confirmar el hecho de que la interferencia intercelular probablemente tenga poca importancia debido a la estrechez de la anchura del haz de las antenas de recepción.