

RECOMENDACIÓN UIT-R P.1238-1

DATOS DE PROPAGACIÓN Y MÉTODOS DE PREDICCIÓN PARA LA PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES DE INTERIORES Y REDES DE RADIOCOMUNICACIONES DE ÁREA LOCAL EN LA GAMA DE FRECUENCIAS DE 900 MHz A 100 GHz

(Cuestión UIT-R 211/3)

(1997-1999)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que se están desarrollando muchas nuevas aplicaciones de comunicaciones personales de corto alcance (distancia de explotación inferior a 1 km), que funcionarán en interiores;
- b) que hay una gran demanda de redes de radiocomunicaciones de área local (RLAN, *radio local area networks*) y de centralitas privadas empresariales inalámbricas (WPBX, *wireless private business exchanges*), como demuestran los productos existentes y la intensa actividad de investigación;
- c) que conviene establecer normas RLAN compatibles con las comunicaciones alámbricas e inalámbricas;
- d) que los sistemas de corto alcance que consumen poca potencia tienen muchas ventajas para el suministro de servicios en los entornos móviles y personales;
- e) que el conocimiento de las características de propagación dentro de los edificios y la interferencia ocasionada por múltiples usuarios en la misma zona es crítico para el diseño eficaz de los sistemas;
- f) que se requieren modelos generales (esto es, independientes de la instalación) y asesoramiento para comenzar a planificar los sistemas y evaluar la interferencia, así como para elaborar modelos determinísticos (para una instalación determinada), con el fin de realizar evaluaciones detalladas,

recomienda

- 1 que se adopte la información y los métodos consignados en el Anexo 1 para evaluar las características de propagación de los sistemas radioeléctricos de interiores entre 900 MHz y 100 GHz.

ANEXO 1

1 Introducción

En el caso de los sistemas radioeléctricos de interiores, la predicción de la propagación difiere en cierta medida de la que se efectúa en relación con los sistemas de exteriores. El objetivo, como sucede en el caso de los sistemas de exteriores, es garantizar una cobertura eficaz de la zona deseada (para garantizar un trayecto fiable, cuando se trata de sistemas punto a punto) y evitar la interferencia tanto dentro del sistema como con otros sistemas. No obstante, en interiores la cobertura depende notablemente de la geometría de los edificios, cuyos límites afectan además a la propagación. Aparte de la reutilización de frecuencias en el mismo piso de un edificio, suele ser necesario reutilizar una frecuencia entre diferentes pisos del mismo edificio, por lo cual hay que considerar una tercera dimensión en las cuestiones de interferencia. Por último, la gama de ondas muy cortas, especialmente cuando se utilizan frecuencias de ondas milimétricas, implica que los pequeños cambios en el entorno inmediato del trayecto radioeléctrico pueden afectar sustancialmente a las características de propagación.

Debido a la complejidad de estos factores, sería necesario un conocimiento detallado del lugar de instalación como por ejemplo, geometría, materiales, mobiliario y normas de utilización previstas, para proyectar concretamente un sistema radioeléctrico en interiores. No obstante, durante la planificación inicial de un sistema hay que estimar el número de estaciones de base necesarias para proporcionar cobertura a estaciones móviles diseminadas dentro de la zona y estimar la interferencia que puede ocasionarse a otros servicios o producirse entre los sistemas. Para esa planificación de sistemas se necesitan modelos que representen en general las características de propagación en ese entorno. Ahora bien, el modelo no debe exigir la aportación de un gran volumen de información por parte del usuario para poder efectuar los cálculos necesarios.

En este Anexo se describen principalmente modelos generales independientes del lugar de instalación y se ofrece información cualitativa sobre los factores que pueden afectar a la propagación en un entorno radioeléctrico en interiores. Siempre que ha sido posible, hemos presentado modelos aplicables a una instalación determinada. En muchos casos, los datos disponibles para elaborar modelos son limitados, tanto en lo que concierne a las frecuencias como a los entornos de prueba; es de esperar que se amplíe la información contenida en este Anexo cuando se disponga de más datos. Asimismo, aunque la precisión de los modelos mejorará con la experiencia que se adquiera de su aplicación, este Anexo contiene la mejor información disponible hasta el momento.

2 Degradación de la propagación y mediciones de calidad de los sistemas radioeléctricos en interiores

Las degradaciones de la propagación en un canal radioeléctrico en interiores se deben principalmente a:

- la reflexión de los objetos (incluidas paredes y suelos) y la difracción en torno a éstos dentro de las salas;
- la pérdida de transmisión a través de paredes, suelos y otros obstáculos;
- la canalización de la energía, especialmente en pasillos a frecuencias elevadas;
- el movimiento de personas y objetos en la sala, lo que puede incluir uno o ambos extremos del enlace radioeléctrico;

y producir degradaciones tales como:

- la pérdida del trayecto – no sólo la pérdida en el espacio libre sino también la pérdida adicional debida a los obstáculos y la transmisión a través de materiales de construcción. La pérdida en el espacio libre se puede reducir mediante la distribución de canales;
- la variación temporal y espacial de la pérdida del trayecto;
- los efectos de los trayectos múltiples de los componentes reflejados y difractados de la onda;
- el desajuste de la polarización ocasionado por la alineación aleatoria del terminal móvil.

Los servicios de comunicaciones inalámbricas de interiores pueden caracterizarse por los siguientes aspectos:

- velocidad de datos alta/media/baja;
- zona de cobertura de cada estación de base (por ejemplo, habitación, piso, edificio);
- móvil/portátil/fijo;
- en tiempo real/casi real/no en tiempo real;
- topología de la red (por ejemplo, punto a punto, punto a multipunto, de cada punto a cada punto).

Conviene determinar las características de propagación de canal más adecuadas para describir su calidad con respecto a diferentes aplicaciones como, por ejemplo, los servicios de comunicación vocal, transferencia de datos a diferentes velocidades y vídeo. En el Cuadro 1 se indican las características más significativas de servicios típicos.

CUADRO 1

Servicios típicos y degradaciones de la propagación

| Servicio | Características | Degradaciones perjudiciales de la propagación |
|---------------------------------|--|--|
| Red de área local inalámbrica | Alta velocidad de datos, una o varias habitaciones, portátil, no en tiempo real, punto a multipunto o de cada punto a cada punto | Pérdida de trayecto-distribución temporal y espacial Retardo de propagación por trayectos múltiples Relación de intensidades en el modo deseado y en el no deseado |
| WPBX | Velocidad de datos media, múltiples habitaciones, uno o múltiples pisos, en tiempo real, móvil, punto a multipunto | Pérdida de trayecto – distribución temporal y espacial |
| Radiobúsqueda en interiores | Baja velocidad de datos, múltiples pisos, no en tiempo real, móvil, punto a multipunto | Pérdida de trayecto – distribución temporal y espacial |
| Vídeo inalámbrico en interiores | Alta velocidad de datos, múltiples habitaciones, en tiempo real, móvil o portátil, punto a multipunto | Pérdida de trayecto – distribución temporal y espacial Retardo de propagación por trayectos múltiples |

3 Modelos de pérdida de trayecto

La utilización del presente modelo de pérdida de transmisión en interiores supone que la estación de base y el terminal portátil están situados en el mismo edificio. La pérdida de trayecto radioeléctrico entre la estación básica y la móvil/portátil en interiores puede estimarse aplicando modelos generales o específicos para cada instalación.

3.1 Modelos generales en cuanto al lugar de instalación

Los modelos que se describen en este punto se consideran generales en cuanto al lugar de instalación, ya que requieren poca información sobre el trayecto o el lugar de instalación. La pérdida de trayecto radioeléctrico en interiores se caracteriza por una pérdida de trayecto media y las estadísticas asociadas de desvanecimiento debido a sombras. Existen varios modelos de pérdida de trayecto en interiores que tienen en cuenta la atenuación de la señal a través de múltiples paredes y/o pisos. En el modelo descrito en este punto se considera la pérdida a través de varios pisos, a fin de tener presentes características tales como la reutilización de frecuencias entre distintos pisos. Los coeficientes de pérdida de potencia debida a la distancia que se indican a continuación tienen en cuenta implícitamente la transmisión a través de paredes así como a través de obstáculos y por encima de éstos, así como otros factores de pérdidas que pueden manifestarse en un solo piso de un edificio. Los modelos para instalaciones específicas podrían ofrecer la posibilidad de incorporar explícitamente la pérdida debida a cada pared, en lugar de incluirla en el modelo basado en la distancia.

El modelo básico se presenta como sigue:

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + N \log_{10} d + L_f(n) - 28 \quad \text{dB} \quad (1)$$

donde:

N : coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia

f : frecuencia (MHz)

d : distancia de separación (m) entre la estación de base y el terminal portátil (siendo $d > 1$ m)

L_f : factor de pérdida de penetración en el suelo (dB)

n : número de pisos entre la estación de base y el terminal portátil ($n \geq 1$).

En los Cuadros 2 y 3 se indican los parámetros típicos basados en el resultado de algunas medidas que se han realizado. Al final de este punto se especifican adicionalmente directrices generales.

CUADRO 2

Coefficientes de pérdida de potencia, N , para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores

| Frecuencia | Edificio residencial | Edificio de oficinas | Edificio comercial |
|-----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| 900 MHz | – | 33 | 20 |
| 1,2-1,3 GHz | – | 32 | 22 |
| 1,8-2,0 GHz | 28 | 30 | 22 |
| 4 GHz | – | 28 | 22 |
| 5,2 GHz | – | 31 | – |
| 60 GHz ⁽¹⁾ | – | 22 | 17 |

⁽¹⁾ Para llegar al valor de 60 GHz se parte de la hipótesis de la propagación dentro de una sola sala o espacio y no se tiene en cuenta en modo alguno la transmisión a través de las paredes. La absorción gaseosa en torno a los 60 GHz es significativa para distancias superiores a unos 100 m, lo que puede afectar a las distancias de reutilización de frecuencias (véase la Recomendación UIT-R P.676).

CUADRO 3

Factores de pérdida de penetración en el suelo, L_f (dB), siendo n el número de pisos penetrados, para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores ($n \geq 1$)

| Frecuencia | Edificio residencial | Edificio de oficinas | Edificio comercial |
|-------------|----------------------|--|--------------------|
| 900 MHz | – | 9 (1 piso) 19 (2 pisos) 24 (3 pisos) | – |
| 1,8-2,0 GHz | $4n$ | $15 + 4(n - 1)$ | $6 + 3(n - 1)$ |
| 5,2 GHz | – | 16 (1 piso) | – |

En las diferentes bandas de frecuencia en que no se disponga de un coeficiente de pérdida de potencia aplicable a los edificios residenciales, puede utilizarse el correspondiente a los edificios de oficinas.

Hay que señalar que puede haber un límite al aislamiento previsto a través de varios pisos. La señal puede pasar por otros trayectos externos para completar el enlace con un pérdida total inferior a la pérdida de penetración a través de un gran número de pisos.

Las estadísticas de desvanecimiento debido a sombras en interiores son log-normales y los valores de desviación típica (dB) figuran en el Cuadro 4, únicamente para la banda 1,8-2,0 GHz.

CUADRO 4

Estadísticas de desvanecimiento debido a sombras, desviación típica (dB) para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores

| Frecuencia (GHz) | Edificio residencial | Edificio de oficinas | Edificio comercial |
|------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| 1,8-2,0 | 8 | 10 | 10 |
| 5,2 | – | 12 | – |

Aunque las mediciones se han realizado en condiciones diferentes, lo cual dificulta las comparaciones directas, y sólo se han comunicado resultados sobre un número limitado de bandas de frecuencias, se pueden sacar unas cuantas conclusiones generales, especialmente en el caso de la banda 900-2 000 MHz.

- En los trayectos con un componente de visibilidad directa predomina la pérdida en el espacio libre y estos trayectos tienen un coeficiente de aproximadamente 20 de pérdida de potencia debida a la distancia.
- Las grandes salas abiertas tienen también un coeficiente de aproximadamente 20 de pérdida de potencia debida a la distancia; ello puede deberse a un importante componente de visibilidad directa en la mayoría de las zonas de la sala. A este respecto, pueden citarse los grandes almacenes, estadios deportivos y fábricas y oficinas sin separaciones interiores.
- En los pasillos se registra una pérdida de trayecto inferior a la que se produce en espacio libre, con un coeficiente típico de aproximadamente 18 de pérdida de potencia debida a la distancia. Las tiendas de alimentación con largas estanterías lineales presentan la pérdida característica de los pasillos.
- La propagación en torno a obstáculos y a través de paredes contribuye considerablemente a la pérdida que puede producirse al poder elevarse hasta un valor del orden de 40 el coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia en un entorno típico. A este respecto pueden citarse los espacios entre salas en edificios de oficinas con separaciones interiores.
- En el caso de largos trayectos sin obstrucciones, puede producirse el primer umbral de zona de Fresnel. A esa distancia, el coeficiente de pérdida de potencia debida a la distancia puede pasar de 20 a 40 aproximadamente.
- No siempre se observa o explica claramente la reducción del coeficiente de pérdida de trayecto con el aumento de la frecuencia para un entorno de oficina (Cuadro 2). Por otro lado, al aumentar la frecuencia, aumenta la pérdida debida a los obstáculos (por ejemplo, paredes, mobiliario), y las señales difractadas contribuyen menos a la potencia recibida; además, la zona de Fresnel está menos obstruida a frecuencias superiores, lo que produce una pérdida menor. La pérdida de trayecto real depende de estos mecanismos opuestos.

3.2 Modelos específicos en cuanto al lugar de instalación

Para estimar la pérdida de trayecto o la intensidad de campo, también conviene utilizar modelos específicos en cuanto al lugar de instalación. Se dispone de modelos para predecir la intensidad de campo en interiores basados en la teoría uniforme de la difracción y técnicas de trazado de rayos. Para calcular la intensidad de campo en interiores se necesita información detallada sobre la estructura del edificio. Estos modelos combinan elementos empíricos con el método electromagnético teórico de la teoría uniforme de la difracción. El método tiene en cuenta los rayos directos, con una sola reflexión y una sola difracción, y puede ampliarse a múltiples difracciones o múltiples reflexiones, así como a combinaciones de rayos difractados y reflejados. Al incluir los rayos reflejados y difractados, la precisión de la predicción de la pérdida de trayecto aumenta considerablemente.

4 Modelos de dispersión del retardo

4.1 Trayectos múltiples

El canal radioeléctrico de propagación móvil/portátil varía con el tiempo, la frecuencia y el desplazamiento espacial. Incluso en situación estática en que el transmisor y el receptor están fijos, el canal puede ser dinámico ya que puede haber dispersores y reflectores en movimiento. La expresión trayectos múltiples se justifica por el hecho de que, debido a la reflexión, la difracción y la dispersión, las ondas radioeléctricas pueden viajar por muchos trayectos de un transmisor a un receptor. Hay asociado con cada uno de esos trayectos un retardo proporcional a la longitud de los mismos. (Se puede obtener una estimación muy aproximada del retardo máximo que cabe esperar en un determinado entorno, tomando simplemente las dimensiones de una sala y sabiendo que el tiempo (ns) que tarda un impulso radioeléctrico en recorrer la distancia d (m) es de aproximadamente $3,3 d$.) Estas señales retardadas, cada una de ellas con una amplitud asociada, forman un filtro lineal cuyas características varían con el tiempo.

4.2 Respuesta a los impulsos

El objetivo de la preparación de modelos de canales es ofrecer representaciones matemáticas precisas de la propagación radioeléctrica para utilizarlas en simulaciones de enlaces y sistemas radioeléctricos con el fin de elaborar modelos de instalación de sistemas. Como el canal radioeléctrico es lineal, queda descrito íntegramente por su respuesta a los impulsos. Una vez conocida la respuesta a los impulsos, puede determinarse la respuesta del canal radioeléctrico a cualquier elemento de entrada. En esto se basa la simulación de la calidad de funcionamiento de los enlaces.

La respuesta a los impulsos se representa normalmente como densidad de potencia en función del exceso de retardo, con respecto a la primera señal detectable. Esta función suele denominarse perfil de retardo de potencia y se ejemplifica en la Fig. 1 de la Recomendación UIT-R P.1407, aunque la escala de tiempo de los canales en interiores debe medirse en nanosegundos y no en microsegundos. Esta Recomendación también contiene definiciones de varios parámetros que caracterizan los perfiles de respuesta a los impulsos.

La respuesta de un canal a los impulsos varía con la posición del receptor y puede hacerlo también con el tiempo. En consecuencia, se mide y considera normalmente como una media de perfiles medidos en una longitud de onda para reducir los efectos del ruido, o en varias longitudes de onda para determinar un promedio espacial. Es importante definir claramente de qué media se habla e indicar cómo se ha calculado esa media. El procedimiento de promediación recomendado consiste en preparar un modelo estadístico de la siguiente forma: para cada estimación de la respuesta a los impulsos (perfil de retardo de potencia), hay que precisar los tiempos antes y después del retardo medio, T_D , (véase la Recomendación UIT-R P.1407, por encima del cual la densidad de potencia no excede valores específicos (-10, -15, -20, -25, -30 dB) con respecto a la densidad de potencia máxima. El modelo queda constituido por el valor mediano y, si se desea, por el percentilo del 90% de las distribuciones de estos tiempos.

4.3 Dispersión cuadrática media del retardo

Como se ha indicado anteriormente, los perfiles del retardo de potencia suelen caracterizarse por uno o varios parámetros. Estos parámetros deberían calcularse a partir de perfiles promediados en un área cuyas dimensiones son equivalentes a varias longitudes de onda (aunque el parámetro dispersión cuadrática media del retardo se halla algunas veces a partir de ciertos perfiles y los valores resultantes se promedian, pero en general el resultado no es el mismo que el que arroja un perfil promediado). Habría que comunicar un umbral de exclusión de ruido o criterio de aceptación, de, por ejemplo, 30 dB por debajo del valor máximo del perfil, junto con la dispersión del retardo resultante, que depende de este umbral.

Aunque la dispersión cuadrática media del retardo se utiliza con gran frecuencia, no siempre define adecuadamente el perfil del retardo. En entornos de trayectos múltiples en los cuales la dispersión del retardo sobrepasa la duración de los símbolos, la proporción de bits erróneos para la modulación con desplazamiento de fase depende no tanto de la

dispersión cuadrática media del retardo como de la relación entre la potencia recibida de la onda deseada y la de la no deseada. Esto es particularmente evidente en el caso de sistemas de alta velocidad de símbolos, pero también se registra incluso a velocidades de símbolos bajas en que hay una fuerte señal dominante entre los componentes de trayectos múltiples (desvanecimiento de Rice).

Con todo, si se parte de un perfil de disminución exponencial, basta para expresar la dispersión cuadrática media del retardo en lugar del perfil de retardo de potencia. En este caso, la respuesta a los impulsos puede reconstruirse aproximadamente de la siguiente forma:

$$h(t) = \begin{cases} e^{-t/S} & \text{para } 0 \leq t \leq t_{\text{máx}} \\ 0 & \text{en otros casos} \end{cases} \quad (2)$$

donde:

S : dispersión cuadrática media del retardo

$t_{\text{máx}}$: retardo máximo

y $t_{\text{máx}} \gg S$.

La utilización de la dispersión cuadrática media del retardo como parámetro de salida del modelo tiene la ventaja de que ese modelo puede expresarse simplemente en forma de cuadro. En el Cuadro 5 se indican una serie de parámetros característicos de dispersión del retardo, estimados a partir de perfiles de retardo promediados para tres entornos en interiores. Estos valores se basan en mediciones realizadas a 1 900 MHz y 5,2 GHz, con antenas omnidireccionales. (Hay pocos indicios de que estos parámetros dependan mucho de la frecuencia cuando se utilizan antenas omnidireccionales. Para otros diagramas de antena, véanse las consideraciones del § 5.) En el Cuadro 5, la columna B contiene valores medianos que se registran con frecuencia, la columna A contiene valores inferiores pero no extremos que también se registran a menudo, mientras que la columna C contiene valores muy elevados que se obtienen rara vez. Los valores que figuran en el Cuadro representan las dimensiones más grandes que pueden tener las salas en cada entorno.

CUADRO 5

Parámetros de dispersión cuadrática media del retardo

| Frecuencia | Entorno | A (ns) | B (ns) | C (ns) |
|------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 900 MHz | Edificios residenciales, interiores | 20 | 70 | 150 |
| 1 900 MHz | Oficinas, interiores | 35 | 100 | 460 |
| 1 900 MHz | Edificios comerciales, interiores | 55 | 150 | 500 |
| 5,2 GHz | Oficinas, interiores | 45 | 75 | 150 |

Dentro de un determinado edificio la dispersión del retardo tiende a aumentar con la distancia entre las antenas y, por tanto, con la pérdida del trayecto. El aumento de la distancia entre las antenas trae consigo una mayor probabilidad de que se obstruya el trayecto y de que la señal recibida consista únicamente en trayectos dispersados.

4.4 Modelos estadísticos

En los modelos estadísticos se resumen los resultados de un gran número de mediciones de forma tal que puedan utilizarse para la simulación de transmisiones. Así, por ejemplo, estas simulaciones pueden efectuarse recurriendo a un modelo de canal discreto de dispersión realmente estacionaria sin correlación (WSSUS, *wide-sense stationary uncorrelated scattering*). Una forma de hacerlo es reemplazar el gran número de trayectos dispersados que pueden existir en un canal real por sólo unos pocos, N , componentes de trayectos múltiples en el modelo. A continuación, la superposición de componentes de trayectos múltiples indeterminados que llegan con ángulos diferentes y retardos próximos al retardo, τ_n , del n -ésimo componente de trayectos múltiples del modelo, se representa por medio de un modelo gaussiano complejo $g_n(t)$ variable con el tiempo. La respuesta de impulsos $h(t)$ viene dada por:

$$h(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{p_n} g_n(t) \delta(t - \tau_n) \quad (3)$$

donde p_n es la potencia recibida del n -ésimo componente de trayectos múltiples del modelo. Los modelos estadísticos de este tipo requieren parámetros adecuados para cada componente.

4.5 Modelos para una instalación determinada

Aunque los modelos estadísticos permiten obtener directrices de planificación, los modelos determinísticos (o para una instalación determinada) son muy útiles para los diseñadores de sistemas. Existen varias técnicas determinísticas para modelar la propagación. En el caso de aplicaciones en interiores, se ha estudiado especialmente la técnica de dominio temporal con diferencias finitas y la técnica de óptica geométrica. Esta última es más eficaz a efectos de cálculo que el dominio temporal con diferencias finitas.

Hay dos enfoques básicos de la técnica de óptica geométrica, a saber, el de imagen y el de lanzamiento de rayos. En el de imagen se utilizan las imágenes del receptor con respecto a todas las superficies reflectantes del entorno. Se calculan las coordenadas de todas las imágenes y, a continuación, se trazan rayos hacia dichas imágenes.

El lanzamiento de rayos consiste en lanzar cierto número de rayos de manera uniforme en el espacio en torno a la antena del transmisor. Los rayos son seguidos hasta que alcanzan el receptor o su amplitud se reduce por debajo de un límite especificado. Comparado con el enfoque de imagen, el de lanzamiento de rayos es más flexible, ya que los rayos difractados y dispersados pueden examinarse junto con las reflexiones especulares. Asimismo, la técnica de partición de rayos o el método de variación, permite ahorrar tiempo de cálculo, cuando se mantiene una resolución adecuada. El enfoque de lanzamiento de rayos es una técnica apropiada para predecir en una zona la respuesta de un canal a los impulsos, mientras que el enfoque de imagen se adecua a la predicción punto a punto.

En los modelos determinísticos se hacen, por regla general, hipótesis sobre los efectos de los materiales de construcción a las frecuencias de que se trate (véase el § 7 relativo a las propiedades de los materiales de construcción). En un modelo para una instalación determinada debería tenerse en cuenta la geometría del entorno, así como la reflexión, la difracción y la transmisión a través de las paredes. La respuesta a los impulsos en un determinado punto viene dada por la siguiente fórmula:

$$h(t) = \sum_{n=1}^N \left[\left(\prod_{u=1}^{M_m} \Gamma_{nu} \times \prod_{v=1}^{M_{pn}} P_{nv} \right) \frac{1}{r_n} \cdot e^{-j\omega \tau_n} \cdot \delta(t - \tau_n) \right] \quad (4)$$

donde:

$h(t)$: respuesta de impulso

N : número de rayos incidentes

M_m : número de reflexiones del rayo n

M_{pn} : número de penetraciones del rayo n

Γ_{nu} : coeficiente de reflexión del rayo n contra la u -ésima pared

P_{nv} : coeficiente de penetración del rayo n por la v -ésima pared

r_n : longitud del trayecto del rayo n

τ_n : retardo del rayo n .

Los rayos reflejados por las paredes y otras superficies, o que penetran a través de las mismas, se calculan recurriendo a las ecuaciones de Fresnel. En el § 7 se indican los valores medidos de la permitividad de ciertos materiales de construcción.

Además de los rayos que son reflejados o que penetran descritos en la ecuación (4), habría que incluir también los rayos difractados y dispersados para modelar adecuadamente las señales recibidas. Este caso se da sobre todo en corredores con esquinas y otras situaciones similares de propagación. Es posible aplicar la teoría uniforme de la difracción para calcular los rayos difractados.

5 Efectos de la polarización y diagrama de radiación de la antena

En interiores no sólo hay un trayecto directo sino también trayectos reflejados y difractados entre el transmisor y el receptor. Las características de reflexión de los materiales de construcción dependen de la polarización, el ángulo de incidencia y la permitividad compleja de los materiales, como se representa en la fórmula de reflexión de Fresnel. Los ángulos de incidencia de los componentes de trayectos múltiples se distribuyen en función de las anchuras de banda de la antena, las estructuras del edificio y el emplazamiento del transmisor y el receptor. En consecuencia, la polarización y el diagrama efectivo de radiación de antena pueden afectar significativamente las características de propagación en interiores.

5.1 Visibilidad directa

Es bien sabido que en los canales con visibilidad directa las antenas direccionales reducen la dispersión cuadrática media del retardo en comparación con las antenas omnidireccionales, y que la polarización circular también la reduce con respecto a la polarización lineal. De ahí que en este caso una antena de polarización circular direccional represente un medio eficaz para reducir la dispersión del retardo.

El principal motivo de que la dispersión dependa de la polarización es que, cuando la señal de polarización circular incide en una superficie reflejante con un ángulo de incidencia inferior al ángulo de Brewster, se invierte el sentido de polarización de la señal de polarización circular reflejada. La inversión de la señal de polarización circular en cada reflexión significa que los componentes de trayectos múltiples que llegan después de una reflexión están polarizados ortogonalmente con respecto al componente de visibilidad directa, lo cual elimina una parte considerable de la interferencia por trayectos múltiples. Este efecto es independiente de la frecuencia como se ha predicho teóricamente y ha quedado demostrado en una serie de experimentos sobre propagación en interiores en la gama de 1,3 GHz a 60 GHz, y se aplica tanto en interiores como en exteriores. Como todos los materiales de construcción actuales tienen ángulos de Brewster superiores a 45°, los trayectos múltiples debidos a reflexiones puntuales (esto es, la fuente principal de componentes de trayectos múltiples) se suprimen, de hecho, en la mayoría de las salas, con independencia de la estructura interior y los materiales de la misma. Las posibles excepciones están constituidas por entornos en que ángulos de incidencia muy grandes predominan en los trayectos múltiples, por ejemplo en largos vestíbulos. Las variaciones de la dispersión cuadrática media del retardo en un enlace en movimiento se reducen asimismo al utilizar antenas de polarización circular.

Como los componentes de la propagación por trayectos múltiples tienen ángulos de incidencia diferentes, los componentes que quedan fuera de la anchura del haz de las antenas se filtran espacialmente si se utilizan antenas direccionales, a fin de reducir la dispersión del retardo. La medición de la propagación y las simulaciones de trazado de rayos efectuadas a 60 GHz en interiores, con una antena de transmisión omnidireccional y cuatro tipos diferentes de antenas receptoras (omnidireccional, de haz ancho, de bocina normal y de haz estrecho) dirigidas hacia la antena transmisora, revelan que la supresión de los componentes del retardo es más eficaz con anchuras de haz estrechas. En el Cuadro 6 se dan varios ejemplos de cómo depende de la directividad de la antena la dispersión cuadrática media estática del retardo no excedida en el percentilo del 90% y obtenida con simulaciones de trazado de rayos a 60 GHz en una oficina vacía. Hay que señalar que la reducción de la dispersión cuadrática media del retardo no siempre es deseable, ya que puede entrañar un aumento de las gamas dinámicas del desvanecimiento de las señales de banda ancha, como resultado de la ausencia inherente de diversidad de frecuencias. Asimismo, hay que señalar que ciertos planes de transmisión se benefician de los efectos de los trayectos múltiples.

CUADRO 6

Ejemplo de dependencia de la dispersión cuadrática media del retardo con respecto a la directividad de la antena

| Frecuencia (GHz) | Antena de transmisión | Anchura de haz de la antena de recepción (grados) | Dispersión cuadrática media estática del retardo (percentilo del 90%) (ns) | Dimensión de la sala (m) | Observaciones |
|------------------|-----------------------|---|--|--------------------------|------------------|
| 60 | Omnidireccional | Omnidireccional | 17 | 13,5 × 7,8 | Trazado de rayos |
| | | 60 | 16 | Oficina vacía | |
| | | 10 | 5 | | |
| | | 5 | 1 | | |

5.2 Trayecto obstruido

Cuando el trayecto directo está obstruido, puede ser más complicado determinar la dependencia de la dispersión del retardo con respecto a la polarización y la directividad de la antena que en un trayecto de visibilidad directa. Se dispone de varios resultados de experimentos con trayectos obstruidos pero el resultado obtenido en un experimento a 2,4 GHz indica que la dependencia de la dispersión del retardo con respecto a la polarización y la directividad de la antena en el trayecto obstruido es muy diferente de la correspondiente a un trayecto de visibilidad directa. Por ejemplo, una antena omnidireccional polarizada horizontalmente en el transmisor y una antena receptora de polarización circular direccional arrojan las dispersiones cuadráticas medias del retardo más reducidas y el exceso de retardo máximo más bajo en el trayecto obstruido.

5.3 Orientación del terminal móvil

En los sistemas radioeléctricos portátiles los factores más importantes de la propagación son generalmente la reflexión y la dispersión de la señal. La energía suele dispersarse de la polarización transmitida a polarizaciones ortogonales. En esas condiciones, el acoplamiento de polarización cruzada aumenta la probabilidad de obtener niveles de recepción adecuados en aparatos de radio portátiles orientados aleatoriamente. Las mediciones del acoplamiento de polarización cruzada efectuadas a 816 MHz indican un alto nivel de acoplamiento.

6 Efectos de la ubicación del transmisor y el receptor

Se han hecho sólo unas pocas investigaciones experimentales y teóricas sobre los efectos de la ubicación del transmisor y el receptor sobre las características de propagación en interiores. Sin embargo, en general puede decirse que la estación de base debe situarse lo más alto posible cerca del techo de la sala para alcanzar trayectos de visibilidad directa lo más lejos posible. Tratándose de terminales portátiles, es evidente que la posición del terminal de usuario dependerá del movimiento del usuario más que de las limitaciones inherentes del diseño del sistema. Sin embargo, en el caso de los terminales portátiles se sugiere que la antena esté situada a una altura suficiente para garantizar visibilidad directa con la estación de base, siempre que sea posible. Asimismo, la elección del emplazamiento de la estación es un factor muy importante de los parámetros de configuración del sistema como, por ejemplo, los arreglos de diversidad espacial, la configuración de la zona, etc.

7 Efectos de los materiales de construcción, los acabados y el mobiliario

Las características de propagación en interiores se ven afectadas por la reflexión en los materiales de construcción y la transmisión a través de éstos. Las características de reflexión y transmisión de esos materiales dependen de la permitividad compleja de los mismos. Huelga decir que en los modelos de predicción de la propagación para una ubicación determinada es preciso introducir como datos básicos la permitividad compleja de los materiales de construcción y la estructura del edificio.

En el Cuadro 7 se consignan las permitividades complejas de los materiales de construcción típicos, obtenidas por experimentación a 1, 57,5, 78,5 y 95,9 GHz. Estas permitividades revelan diferencias apreciables entre un material y otro, pero dependen poco de la frecuencia en la gama de frecuencias de 60-100 GHz, excepto en el caso del suelo cuya permitividad varía en un 10%. En bandas de ondas milimétricas, los acabados de superficie tales como la pintura pueden considerarse como una de las capas dieléctricas. Conocida la permitividad, las características de reflexión y transmisión de las diversas capas dieléctricas representadas por estos materiales se evalúan teóricamente basándose en la fórmula de transmisión y reflexión de Fresnel.

CUADRO 7

Permitividad compleja de los materiales de construcción para interiores

| | 1 GHz | 57,5 GHz | 78,5 GHz | 95,9 GHz |
|--|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Hormigón | 7,0 - j0,85 | 6,50 - j0,43 | – | 6,20 - j0,34 |
| Hormigón ligero | 2,0 - j0,50 | – | – | – |
| Revestimiento de suelos (resina sintética) | – | 3,91 - j0,33 | 3,64 - j0,37 | 3,16 - j0,39 |
| Revestimiento de yeso | – | 2,25 - j0,03 | 2,37 - j0,10 | 2,25 - j0,06 |
| Revestimiento de techos (lana mineral) | 1,2 - j0,01 | 1,59 - j0,01 | 1,56 - j0,02 | 1,56 - j0,04 |
| Vidrio | 7,0 - j0,10 | 6,81 - j0,17 | – | – |
| Fibra de vidrio | 1,2 - j0,10 | – | – | – |

A partir de la permitividad compleja η , el coeficiente de reflexión viene dado por:

$$R_N = \frac{\sin \theta - \sqrt{\eta - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{\eta - \cos^2 \theta}} \quad (\text{Vector E normal al plano de reflexión}) \quad (5a)$$

$$R_P = \frac{\sin \theta - \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta) / \eta^2}}{\sin \theta + \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta) / \eta^2}} \quad (\text{Vector E paralelo al plano de reflexión}) \quad (5b)$$

$$R_C = \frac{R_N + R_P}{2} \quad (\text{Polarización circular}) \quad (5c)$$

donde el plano de reflexión es el plano en que se encuentran los rayos incidente y reflejado, y θ es el ángulo entre el rayo incidente y el plano de la superficie reflejante.

Las reflexiones especulares de los materiales del suelo tales como entarimado de suelo y placas de hormigón se reducen considerablemente en las bandas de ondas milimétricas cuando los materiales se recubren con alfombras de superficie rugosa. Pueden obtenerse disminuciones similares poniendo cortinas en las ventanas. En consecuencia, cabe esperar que los efectos propios de los materiales cobren importancia a medida que aumenta la frecuencia.

Además de las estructuras esenciales del edificio, el mobiliario y otros accesorios pueden afectar también significativamente a las características de propagación en interiores. Pueden considerarse como obstrucciones y se consideran en el modelo de pérdida de trayecto del § 3.

8 Efecto de los movimientos de los objetos en una sala

El movimiento de personas y objetos en una sala ocasiona variaciones temporales de las características de propagación en interiores. Sin embargo, estas variaciones son muy lentas en comparación con la velocidad de datos utilizada normalmente y, en consecuencia, pueden considerarse prácticamente como una variable aleatoria independiente del tiempo. Aparte de las personas situadas a proximidad de las antenas o en el trayecto directo, el movimiento de las personas en las oficinas y otros lugares dentro y fuera del edificio tienen un efecto desdeñable en las características de propagación.

Las mediciones efectuadas con ambos terminales del enlace en posición fija indican que el desvanecimiento se produce en ráfagas (los datos estadísticos recogidos tienen un carácter marcadamente no estacionario), y se debe bien a la perturbación de las señales de trayectos múltiples en las zonas que rodean a un determinado enlace, o al ensombrecimiento provocado por el paso de personas a través del enlace.

Las mediciones realizadas a 1,7 GHz indican que una persona que se introduce en el trayecto de una señal de visibilidad directa ocasiona una disminución de 6 a 8 dB del nivel de potencia recibida, y que el valor K de la distribución de Nakagami-Rice se reduce considerablemente. En condiciones sin visibilidad directa, el movimiento de personas cerca de las antenas no afecta apreciablemente al canal.

En el caso de un terminal portátil, la proximidad de la cabeza y el cuerpo del usuario afecta al nivel de la señal recibida. A 900 MHz y con una antena dipolo, las mediciones revelan que la intensidad de la señal recibida se reduce de 4 a 7 dB cuando el terminal se mantiene a nivel de la cintura, y de 1 a 2 dB cuando el terminal se mantiene a la altura de la cabeza del usuario, con respecto a la intensidad de la señal recibida cuando la antena está situada a varias longitudes de onda del cuerpo.

Cuando la altura de la antena es inferior a 1 m aproximadamente, por ejemplo, en el caso de una aplicación característica de ordenador portátil o de mesa, el trayecto de visibilidad directa puede verse ensombrecido por personas que se desplazan en la vecindad del terminal del usuario. Para estas aplicaciones de datos revisten interés tanto la profundidad como la duración de los desvanecimientos. Las mediciones efectuadas a 37 GHz en un entorno de oficina interior han demostrado que con frecuencia se observan desvanecimientos de 10 a 15 dB. La duración de estos desvanecimientos debidos al ensombrecimiento producido por los cuerpos de personas que se mueven continuamente de manera aleatoria a través del trayecto con visibilidad directa sigue una distribución logarítmico-normal, en virtud de la cual la desviación media y normalizada dependen de la profundidad del desvanecimiento. Para esas mediciones, a una profundidad de desvanecimiento de 10 dB, la duración media fue de 0,11 s y la desviación normalizada de 0,47 s. A una profundidad de desvanecimiento de 15 dB, la duración media fue de 0,05 s y la desviación normalizada de 0,15 s.