

RECOMENDACIÓN UIT-R P.1407-1

Propagación por trayectos múltiples y parametrización de sus características

(Cuestión UIT-R 203/3)

(1999-2003)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) la necesidad de estimar el efecto de la propagación por trayectos múltiples en los servicios que utilizan sistemas digitales;
- b) que es conveniente normalizar la terminología y las expresiones utilizadas para caracterizar la propagación por trayectos múltiples,

recomienda

1 que, para describir de una manera coherente los conceptos relacionados con la propagación por trayectos múltiples, se utilicen los términos y definiciones que figuran en el Anexo 1.

Anexo 1

1 Introducción

En los sistemas radioeléctricos con alturas de antena pequeñas, suele haber múltiples trayectos indirectos entre el transmisor y el receptor debido a la reflexión procedente de los objetos circundantes, además del trayecto directo cuando hay línea de visibilidad directa. Esta propagación por trayectos múltiples es particularmente importante en los medios urbanos donde las paredes de los edificios y las superficies pavimentadas generan intensas reflexiones. Como resultado de ello, la señal recibida está formada por la suma de varios componentes con diversas amplitudes, ángulos de fase y direcciones de llegada.

Puede considerarse que la consiguiente variabilidad espacial de la intensidad de la señal obedece a dos regímenes:

- a) un desvanecimiento rápido, que varía sobre distancias del orden de una longitud de onda, debido principalmente a los cambios en los ángulos de fase de los distintos componentes de la señal;
- b) un desvanecimiento lento, que varía sobre distancias más grandes, debido principalmente a los cambios en la pérdida por apantallamiento producida por los objetos circundantes.

Además, los diversos componentes de la señal pueden sufrir desplazamientos Doppler de distintas magnitudes debido al movimiento de la estación móvil o de objetos reflectantes, como vehículos.

El canal móvil con propagación por trayectos múltiples puede caracterizarse por su respuesta al impulso, que varía a un ritmo que depende de la velocidad del terminal móvil y/o de los objetos dispersantes. En consecuencia, un receptor debe ser capaz de afrontar la distorsión de la señal debida a los ecos del canal, así como las rápidas variaciones en la naturaleza de esta distorsión. A tales características del canal radioeléctrico móvil se les denomina perfiles de retardo de potencia y espectros Doppler y se obtienen mediante mediciones de sondeo del canal en banda ancha.

Las señales transmitidas hacia y desde vehículos en movimiento en medios urbanos o boscosos muestran considerables variaciones en la amplitud debida a la dispersión múltiple. Son corrientes los desvanecimientos de 30 dB o más por debajo del nivel medio. La intensidad de campo instantáneo medida en distancias de unas cuantas decenas de longitudes de onda, presenta una distribución que se aproxima a la de Rayleigh. Los valores medios de esas distribuciones para un sector pequeño varían considerablemente de una zona a otra, según la altura, la densidad y la distribución de colinas, árboles, edificios y otras estructuras.

Las características de propagación por trayectos múltiples son un factor importante para controlar la calidad de las comunicaciones móviles digitales. Físicamente, las características de propagación por trayectos múltiples incluyen el número de trayectos, las amplitudes, la diferencia de longitudes de trayecto (retardo), y el ángulo de llegada. Esto puede caracterizarse por la función transferencia del trayecto de propagación (características amplitud-frecuencia) y la anchura de banda de correlación.

En los § 2 y 3 se definen los parámetros del canal de sector pequeño (o pequeña escala). Las estadísticas de los parámetros de pequeña escala se utilizan posteriormente para producir funciones de distribución acumulativas (FDA). La FDA de media escala abarca un determinado recorrido de medición, que es del orden de decenas o cientos de metros. La combinación de un conjunto de datos para una serie de recorridos de media escala se considera como una caracterización global o de gran escala representativa del entorno estudiado, por ejemplo terrenos montañosos, urbanos, suburbanos, habitaciones grandes de interior, pasillos, etc.

Se ha demostrado que un canal lineal variable con el tiempo puede caracterizarse mediante un filtro transversal lineal. La salida de este filtro proporciona una suma de las versiones de la señal de entrada con retardo y con desplazamiento Doppler. Se representa entonces el canal mediante la función retardo-dispersión-Doppler, denominada a veces función de dispersión. Esta función representa el fenómeno del multitrayecto en tres dimensiones: retardo en exceso, frecuencia Doppler y densidad de potencia. Esta formulación resulta particularmente adecuada para la construcción de un simulador electrónico en forma de filtro transversal dinámico.

2 Parámetros multitrayecto

A continuación se indican los parámetros adecuados para la descripción estadística de los efectos multitrayecto, parámetros que pueden calcularse a partir de perfiles instantáneos del retardo en función de la potencia o de perfiles promediados en unas cuantas longitudes de ondas.

El *retardo medio* es la media de los retardos suplementarios ponderados por su potencia y viene dado por el primer momento de la respuesta al impulso.

La *dispersión (valor eficaz) del retardo* es la desviación típica de los retardos en exceso ponderada por su potencia y viene dada por el segundo momento de la respuesta al impulso. Proporciona una medida de la variabilidad del retardo medio.

La *ventana del retardo* es el intervalo de la porción intermedia del perfil de potencia que contiene un cierto porcentaje de la potencia total de esa respuesta al impulso.

El *intervalo de retardo* se define como el intervalo de la respuesta al impulso entre dos valores del retardo suplementario que señalan el primer instante en que la amplitud de la respuesta al impulso rebasa un umbral determinado y el último momento en que es menor que dicho umbral.

La *anchura de banda de correlación* se define como la frecuencia para la cual la función de autocorrelación de la función de transferencia cae por debajo de un determinado umbral.

Como muestra la Fig. 1, la potencia total, P_m , del perfil de retardo de potencia es:

$$P_m = \int_{t_0}^{t_3} P(t) dt \quad (1)$$

donde:

$P(t)$: densidad de potencia de la respuesta al impulso

t : retardo con respecto a la referencia de tiempo

t_0 : instante en el que $P(t)$ rebasa el nivel de corte por primera vez

t_3 : instante en el que $P(t)$ rebasa el nivel de corte por última vez.

El retardo medio, T_D , viene dado por el primer momento de la respuesta al impulso:

$$T_D = \frac{\int_0^{\tau_e} \tau P(\tau) d\tau}{\int_0^{\tau_e} P(\tau) d\tau} - \tau_a \quad (2a)$$

donde:

τ : variable del retardo de tiempo que es igual a $t - t_0$

τ_a : tiempo de llegada de la primera componente del multitrayecto recibida (la primera cresta del perfil)

$$\tau_e = t_3 - t_0$$

La forma discreta de la ecuación (2a) es la siguiente:

$$T_D = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i P(\tau_i)}{\sum_{i=1}^N P(\tau_i)} - \tau_M \quad (2b)$$

donde $i = 1$ y N son, respectivamente, los índices de la primera y la última muestra del perfil de retardo por encima del nivel umbral y M es el índice de la primera componente del multitrayecto recibida (la primera cresta del perfil).

Los retardos pueden determinarse mediante la siguiente relación:

$$t_i (\mu s) = 3,3 r_i \quad \text{km}$$

donde r_i es la suma de las distancias del transmisor al reflector multitrayecto y del reflector al receptor, o es la distancia total del transmisor al receptor para t_{LOS} .

La dispersión (valor eficaz) del retardo, S , viene dada por la raíz cuadrada del segundo momento central, esto es:

$$S = \sqrt{\frac{\int_0^{\tau_e} (\tau - T_D - \tau_a)^2 P(\tau) d\tau}{\int_0^{\tau_e} P(\tau) d\tau}} \quad (3)$$

o, en magnitudes discretas:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\tau_i - T_D - \tau_M)^2 P(\tau_i)}{\sum_{i=1}^N P(\tau_i)}} \quad (4)$$

La ventana de retardo, W_q , es la longitud de la porción central de la respuesta al impulso que contiene un cierto porcentaje, q , de la potencia total:

$$W_q = (t_2 - t_1) \quad (5)$$

donde los límites t_1 y t_2 están definidos mediante:

$$\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt = \frac{q}{100} \int_{t_0}^{t_3} P(t) dt = \frac{q}{100} P_m \quad (6)$$

y la potencia fuera de la ventana se reparte en dos partes iguales $\left(\frac{100-q}{200}\right)P_m$.

Se define el intervalo de retardo, I_{th} , como la diferencia de tiempo entre el instante t_4 en que la amplitud de la respuesta al impulso rebasa por primera vez un umbral determinado P_{th} , y el instante t_5 en el que decae con respecto a ese umbral por última vez:

$$I_{th} = (t_5 - t_4) \quad (7)$$

La transformada de Fourier de la densidad de potencia de la propuesta al impulso da la autocorrelación $C(f)$ de la función de transferencia:

$$C(f) = \int_0^{\tau_e} P(\tau) \exp(-j 2 \pi f \tau) d\tau \quad (8)$$

Para un canal de Rice, la ecuación (8) subestima el valor de la anchura de banda de correlación. Para este tipo de canales es más preciso determinar la anchura de banda de correlación a partir de la función de correlación de frecuencias separadas, que se obtiene de la función de transferencia compleja que varía con el tiempo mediante el cálculo de coeficiente de correlación para diferentes separaciones de frecuencia.

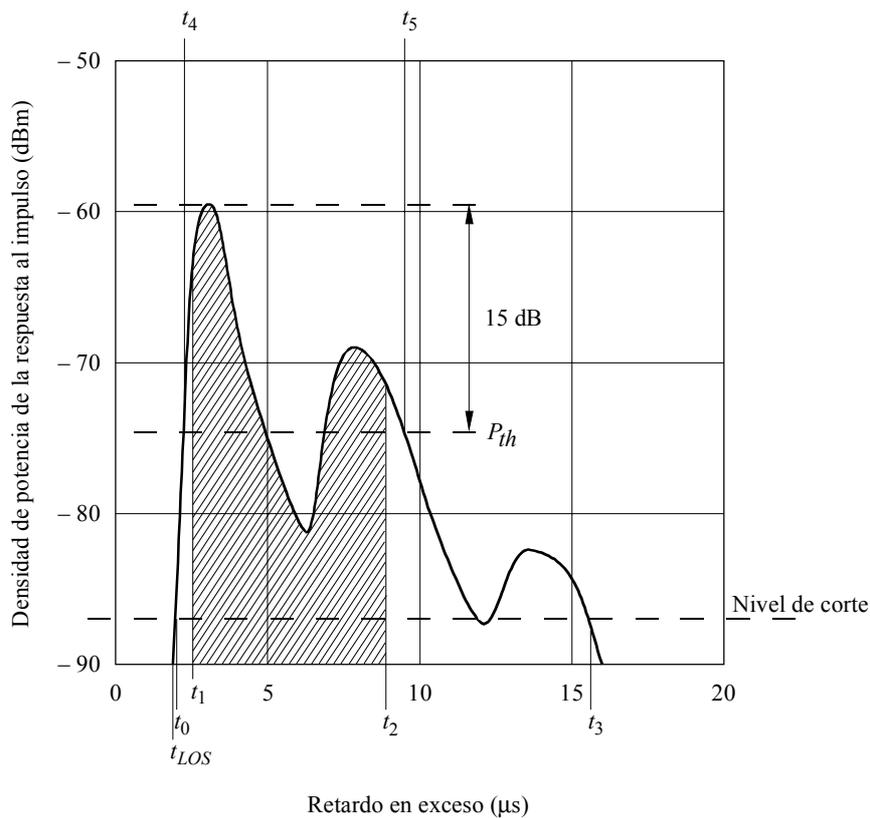
La anchura de banda de correlación, B_x , se define como la frecuencia para la cual $|C(f)|$ es igual a $x\%$ de $C(f=0)$.

Para el análisis de los datos se recomienda utilizar ventanas de retardo correspondientes al 50%, 75% y 90% de la potencia, intervalos de retardo para los umbrales de 9 dB, 12 dB y 15 dB por debajo del valor de cresta y anchuras de banda de correlación para un 50% y un 90% de correlación.

Debe subrayarse que pueden ser muy importantes los efectos del ruido y de las señales espurias sobre el sistema (desde la etapa de RF al tratamiento de los datos). Por consiguiente es importante determinar con exactitud el umbral del ruido y/o señales no esenciales en el sistema, para poder establecer un margen de seguridad en la parte superior de ese nivel de corte. Se recomienda el empleo de un margen de seguridad de 3 dB y con el fin de asegurar la integridad de los resultados, se recomienda, asimismo, utilizar como criterio de aceptación una relación mínima de cresta/señal no esencial de, por ejemplo, 15 dB (excluyendo el margen de seguridad de 3 dB) antes de incluir estadísticamente un impulso de respuesta.

La Fig. 1 muestra un ejemplo de utilización de alguno de estos términos.

FIGURA 1
Ejemplo de un perfil de retardo promediado de la potencia



La zona rayada representa la ventana de retardo, W_{90} , que contiene el 90% de la potencia recibida. El intervalo de retardo, I_{15} , que contiene la señal entre el nivel «15 dB por debajo del valor de cresta» se extiende entre t_4 y t_5 .

3 Parámetros de la dirección de llegada

Sea $P(\theta)$ la potencia recibida (W) en la dirección θ , donde θ se mide en radianes desde la dirección de la señal principal (suponiendo que es estacionaria durante la medición). El valor eficaz de la dispersión angular σ_θ en la dirección de llegada se define del modo siguiente:

$$\sigma_\theta = \sqrt{\frac{1}{P_0} \int_{-\pi}^{\pi} (\theta - \bar{\theta})^2 P(\theta) d\theta} \quad (9)$$

donde:

$$P_0 = \int_{-\pi}^{\pi} P(\theta) d\theta \quad (10)$$

y

$$\bar{\theta} = \frac{1}{P_0} \int_{-\pi}^{\pi} \theta P(\theta) d\theta \quad (11)$$

donde todas las integrales se calculan para valores mayores que el nivel de ruido de la medición.
