

## RECOMENDACIÓN UIT-R P.1623-1

**Método de predicción de la dinámica de los desvanecimientos en los trayectos Tierra-espacio**

(Cuestión UIT-R 201/3)

(2003-2005)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) que en varios servicios de radiocomunicaciones deben satisfacerse unos objetivos de diseño que requieren información sobre la dinámica de los sucesos de interrupción;
- b) que para evaluar los parámetros relacionados con el riesgo de fallo en proporcionar una cierta calidad y fiabilidad de servicio, debe conocerse la probabilidad de aparición de desvanecimientos de una cierta duración;
- c) que para evaluar los parámetros internos en un bucle de control que aplica técnicas de reducción de los desvanecimientos (FMT, *fade mitigation techniques*) (utilizadas para aumentar la calidad y fiabilidad del servicio), debe conocerse la probabilidad de aparición de una pendiente del desvanecimiento correspondiente a un determinado umbral de atenuación;
- d) que es necesario proporcionar información técnica para calcular las estadísticas de la duración de los desvanecimientos, de los intervalos entre desvanecimientos y de la pendiente de los desvanecimientos,

*recomienda*

- 1 que se utilicen los métodos descritos en el § 2.2 del Anexo 1 para calcular las estadísticas de duración de los desvanecimientos debidos a la combinación de los efectos de la atenuación (gases, nubes y lluvia) y el centelleo en los trayectos Tierra-espacio;
- 2 que se utilicen los métodos descritos en el § 3.2 del Anexo 1 para calcular las estadísticas de la pendiente de los desvanecimientos debidos a la atenuación en los trayectos Tierra-espacio.

## **Anexo 1**

### **1 Introducción**

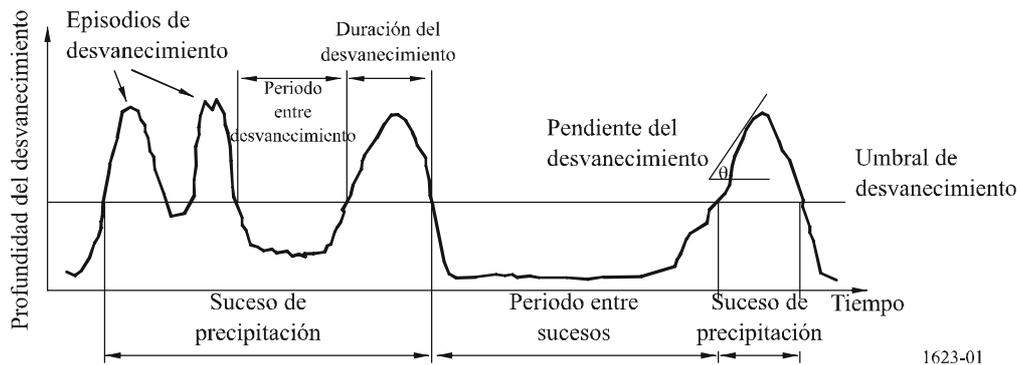
Las características dinámicas de los desvanecimientos debidos a la propagación en la atmósfera revisten una gran importancia en el diseño de muchos sistemas de telecomunicaciones para optimizar la capacidad del sistema y alcanzar los objetivos de calidad y fiabilidad. Las redes fijas que incluyen un segmento espacial y los sistemas que aplican FMT o de compartición de recursos son un ejemplo al respecto.

Pueden definirse varias escalas temporales, y es útil disponer de información sobre las estadísticas de la pendiente de los desvanecimientos, de la duración de los desvanecimientos y de los intervalos entre desvanecimientos para un determinado nivel de atenuación (véase la Fig. 1).

La duración de un desvanecimiento se define como el intervalo de tiempo transcurrido entre dos cruces por encima de un mismo umbral de atenuación, en tanto que el periodo entre desvanecimientos es el intervalo de tiempo transcurrido entre dos cruces por debajo de un mismo umbral de atenuación. La pendiente del desvanecimiento se define como la velocidad de variación de la atenuación en el tiempo.

FIGURA 1

## Caracterización de la dinámica de los sucesos de desvanecimiento



La distinción entre desvanecimientos de duración menor o mayor que 10 s es especialmente interesante en el contexto de los criterios de disponibilidad. El conocimiento de la distribución de la duración de los desvanecimientos en función de la profundidad de los desvanecimientos es también un requisito previo a la aplicación de los conceptos de riesgo en la prestación de servicios de telecomunicaciones.

Además, es esencial disponer de información sobre la pendiente del desvanecimiento prevista para calcular la mínima velocidad de seguimiento necesaria de un sistema de mitigación de desvanecimientos.

## 2 Duración de los desvanecimientos y de los intervalos entre desvanecimientos

### 2.1 Necesidad de información sobre la duración de los desvanecimientos

La duración de los desvanecimientos es un parámetro importante que se ha de tener en cuenta en el diseño de sistemas por varias razones:

- interrupción e indisponibilidad del sistema: las estadísticas de duración de los desvanecimientos proporcionan información sobre el número y duración de las interrupciones y la indisponibilidad del sistema debido a la propagación por un determinado enlace o servicio;
- compartición de los recursos del sistema: desde el punto de vista del operador es importante tener una idea de la duración estadística de un suceso para asignar los recursos a otros usuarios;
- FMT: la duración de los desvanecimientos es importante a fin de definir la duración estadística para que el sistema permanezca en una configuración de compensación antes de volver a su modo nominal;
- codificación y modulación del sistema: la duración de los desvanecimientos es un elemento fundamental para seleccionar los códigos de corrección de errores en recepción sin canal de retorno y los mejores esquemas de modulación; en el canal de propagación de los sistemas de comunicación por satélite no se producen errores independientes sino bloques de errores. La duración del desvanecimiento repercute directamente en la selección del esquema de codificación (tamaño y palabra de codificación en códigos de bloque, entrelazado en códigos concatenados, etc.).

## 2.2 Método de predicción de la duración del desvanecimiento

La duración de los desvanecimientos se puede describir mediante dos funciones de distribución acumulativa diferentes:

- 1  $P(d > D|a > A)$ , la probabilidad de aparición de desvanecimientos de duración  $d$  mayor que  $D$  (s) suponiendo que la atenuación  $a$  sea mayor que  $A$  (dB). Esta probabilidad puede calcularse a partir de la relación entre el número de desvanecimientos de duración mayor que  $D$  y el número total de desvanecimientos observados, suponiendo que se ha superado el umbral  $A$ .
- 2  $F(d > D|a > A)$ , la probabilidad acumulativa de rebasamiento o, lo que es lo mismo, la fracción total (entre 0 y 1) del tiempo de desvanecimiento correspondiente a desvanecimientos de duración  $d$  mayor que  $D$  (s), suponiendo que la atenuación  $a$  sea mayor que  $A$  (dB). Esta probabilidad puede calcularse a partir de la relación entre el tiempo de desvanecimiento total debido a desvanecimientos de duración mayor que  $D$  cuando se rebasa el umbral  $A$  y el tiempo total de rebasamiento del umbral.

Dado un periodo de referencia, el número de desvanecimientos de duración mayor que  $D$  se calcula multiplicando la probabilidad de aparición  $P(d > D|a > A)$  por el número total de desvanecimientos que rebasan el umbral,  $N_{tot}(A)$ . De igual manera, el tiempo total de rebasamiento debido a fenómenos de desvanecimiento de duración mayor que  $D$  se calcula multiplicando la fracción de tiempo  $F(d > D|a > A)$  por el tiempo total de rebasamiento del umbral,  $T_{tot}(A)$ .

El modelo de dos segmentos que aquí se describe está formado por una función de distribución log normal para desvanecimientos de larga duración y una función potencial para desvanecimientos de corta duración. El límite entre desvanecimientos de corta y larga duración viene dado por la duración umbral  $D$ , calculada en el modelo. El modelo potencial es aplicable a desvanecimientos de duración mayor que 1 s. Los de menor duración no contribuyen significativamente al tiempo de interrupción total.

A continuación se presenta el cálculo de los parámetros necesarios para el modelo y por último se define el modelo de dos segmentos para las dos funciones de distribución, a saber, la probabilidad de aparición  $P$  y la probabilidad de rebasamiento (o de fracción de tiempo)  $F$ .

Se prevé que el modelo servirá para duraciones mayores que 1 s.

Los parámetros necesarios para el modelo son los siguientes:

- $f$ : frecuencia (GHz): 10-50 GHz  
 $\varphi$ : ángulo de elevación (grados): 5°-60°  
 $A$ : umbral de atenuación (dB).

Los pasos para calcular la distribución de la duración de los desvanecimientos son los siguientes:

*Paso 1:* Calcular la duración media  $D_0$  de la distribución log normal de la fracción del tiempo de desvanecimiento debido a desvanecimientos de larga duración, suponiendo que la atenuación es mayor que  $A$ :

$$D_0 = 80 \varphi^{-0,4} f^{1,4} A^{-0,39} \quad \text{s} \quad (1)$$

*Paso 2:* Calcular la desviación típica  $\sigma$  de la distribución log normal de la fracción de tiempo de desvanecimiento debido a desvanecimientos de larga duración:

$$\sigma = 1,85 f^{-0,05} A^{-0,027} \quad (2)$$

*Paso 3:* Calcular el exponente  $\gamma$  de la distribución potencial de la fracción del tiempo de desvanecimiento debido a desvanecimientos de corta duración:

$$\gamma = 0,055 f^{0,65} A^{-0,003} \quad (3)$$

*Paso 4:* Calcular el límite entre las duraciones de desvanecimiento cortas y largas,  $D_t$ :

$$D_t = D_0 e^{p_1 \sigma^2 + p_2 \sigma - 0,39} \quad \text{s} \quad (4)$$

donde:

$$p_1 = 0,885\gamma - 0,814 \quad (5)$$

$$p_2 = -1,05\gamma^2 + 2,23\gamma - 1,61 \quad (6)$$

*Paso 5:* Calcular la duración media  $D_2$  de la distribución log normal de la probabilidad de aparición de fenómenos de desvanecimiento de larga duración:

$$D_2 = D_0 \cdot e^{-\sigma^2} \quad \text{s} \quad (7)$$

*Paso 6:* Calcular la fracción de tiempo  $k$  debido a desvanecimientos de duración inferior a  $D_t$ :

$$k = \left[ 1 + \frac{\sqrt{D_0 D_2} (1 - \gamma) Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)}{D_t \gamma Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)} \right]^{-1} \quad (8)$$

donde:

$Q$ : función de distribución acumulativa típica para un variable con distribución normal:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (9)$$

*Paso 7:* Calcular la probabilidad de aparición de fenómenos de desvanecimiento de duración  $d$  mayor que  $D$ , suponiendo que la atenuación  $a$  sea mayor que  $A$ :

$$\text{Para } 1 \leq D \leq D_t \quad P(d > D | a > A) = D^{-\gamma} \quad (10)$$

$$\text{Para } D > D_t \quad P(d > D | a > A) = D_t^{-\gamma} \cdot \frac{Q\left(\frac{\ln(D) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)}{Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)} \quad (11)$$

*Paso 8:* Calcular la probabilidad de rebasamiento acumulativa; es decir, la fracción total del tiempo de desvanecimiento debido a desvanecimientos de duración  $d$  mayor que  $D$ :

$$\text{Para } 1 \leq D \leq D_t \quad F(d > D | a > A) = \left[ 1 - k \left( \frac{D}{D_t} \right)^{1-\gamma} \right] \quad (12)$$

$$\text{Para } D > D_t \quad F(d > D | a > A) = (1 - k) \cdot \frac{Q\left(\frac{\ln(D) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)}{Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)} \quad (13)$$

*Paso 9:* Cuando sea necesario, se puede calcular el número total de desvanecimientos de duración  $d$  mayor que  $D$  para un determinado umbral  $A$ , mediante la expresión:

$$N(D, A) = P(d > D | a > A) \times N_{tot}(A) \quad (14)$$

De igual manera, el tiempo de desvanecimiento total debido a desvanecimientos de duración  $d$  mayor que  $D$  correspondiente al umbral  $A$  es:

$$T(d > D | a > A) = F(d > D | a > A) \times T_{tot}(A) \quad \text{s} \quad (15)$$

para el periodo de referencia de interés, donde  $T_{tot}(A)$  es el tiempo total durante el cual se rebasa el umbral  $A$  y  $N_{tot}(A)$  es el número total de desvanecimientos de duración mayor que la mínima, de 1 s. Estos parámetros pueden obtenerse del modo siguiente:

$T_{tot}(A)$  se determina a partir de los datos locales. Si no se dispone de estadísticas de larga duración, se puede hacer una estimación como se describe en la Recomendación UIT-R P.618. El procedimiento consiste en calcular la función de distribución acumulativa de la atenuación total, determinando el porcentaje de tiempo durante el cual se supera el umbral de atenuación  $A$  en cuestión y seguidamente el tiempo de rebasamiento total  $T_{tot}(A)$  para el periodo de referencia considerado.

Una vez obtenido  $T_{tot}(A)$ , puede calcularse  $N_{tot}(A)$  mediante la expresión:

$$N_{tot}(A) = T_{tot}(A) \cdot \frac{k}{\gamma} \cdot \frac{1-\gamma}{D_t^{1-\gamma}} \quad (16)$$

El método anterior se aplicó a la base de datos de duración del desvanecimiento de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones, para frecuencias entre 11 y 50 GHz y para ángulos de elevación entre 6° y 60°. La media aritmética del error logarítmico (relación entre la duración del desvanecimiento calculada y medida para un mismo nivel de probabilidad) se estimó en el 30% para desvanecimientos de duración inferior a 10 s y entre el -25% y el -80% para los de duración mayor que 10 s. En lo que respecta a la desviación típica, se estimó una variación entre el 80% y el 150%, lo que demuestra el carácter altamente variable de este parámetro.

### 2.3 Periodo entre desvanecimientos

Además de las estadísticas de duración de los desvanecimientos, también es útil caracterizar el tiempo transcurrido entre dos desvanecimientos, denominado intervalo entre desvanecimientos. Una vez que el nivel de la señal recibida ha caído por debajo del umbral después de un suceso de interrupción, es esencial para el operador conocer estadísticamente el tiempo que transcurre antes de que se produzca otro suceso de interrupción.

Los resultados experimentales indican que las estadísticas de los intervalos entre desvanecimientos pueden tener una distribución log normal. Sin embargo, se prevé que los intervalos entre desvanecimientos de corta duración causados por el centelleo troposférico sigan una ley potencial, al igual que las estadísticas de duración de desvanecimiento de corta duración.

### 3 Pendiente de los desvanecimientos

#### 3.1 Necesidad de información sobre la pendiente de los desvanecimientos

Es importante poder cuantificar la pendiente de los desvanecimientos en los sistemas de comunicaciones por satélite que aplican técnicas de reducción del desvanecimiento. Su conocimiento es útil para diseñar un bucle de control que pueda seguir las variaciones de la señal o para mejorar la predicción a corto plazo de las condiciones de propagación. En ambos casos, la información importante es la pendiente de la componente de la señal que varía lentamente, lo cual implica filtrar el centelleo y las variaciones rápidas de la atenuación debida a la lluvia.

#### 3.2 Método de predicción de la pendiente de los desvanecimientos

La distribución de probabilidad de la pendiente de los desvanecimientos es función de los parámetros climáticos, de la distribución del tamaño de las gotas y, por tanto, del tipo de lluvia. La velocidad del viento horizontal, perpendicular al trayecto, es otro parámetro climático a tener en cuenta pues determina la velocidad a la cual el perfil de lluvia horizontal atraviesa el trayecto de propagación. También es probable que la pendiente de desvanecimiento prevista para un determinado nivel de atenuación disminuya al aumentar la longitud del trayecto, debido al efecto suavizante que produce la suma de las diferentes contribuciones de lluvia, y por tanto, aumente con el ángulo de elevación en los trayectos Tierra-espacio.

Además, la medición de la pendiente del desvanecimiento se ve afectada por parámetros dinámicos, o constantes de tiempo, del sistema receptor. Los receptores con mayor tiempo de integración reducen la variación instantánea del desvanecimiento y lo distribuyen a lo largo de un periodo de tiempo más dilatado.

La distribución de la pendiente del desvanecimiento calculada es función del nivel de atenuación  $A(t)$  y de la duración del intervalo  $\Delta t$ . Además, la distribución depende de la frecuencia de corte a 3 dB del filtro de paso bajo que se utiliza para eliminar de la señal el centelleo troposférico y las variaciones rápidas de la atenuación debida a la lluvia. Los resultados experimentales demuestran que una frecuencia de corte a 3 dB de 0,02 Hz es suficiente para filtrar adecuadamente el centelleo y las variaciones rápidas de la atenuación debida a la lluvia. Si no se filtran, la señal presentará mayores fluctuaciones y el modelo sólo servirá para predecir los desvanecimientos correspondientes a la atenuación debida a la lluvia. En este caso, la frecuencia de corte necesaria es igual a la frecuencia de muestreo.

En el modelo, la pendiente del desvanecimiento  $\zeta$  en un determinado instante se define a partir de los datos filtrados:

$$\zeta(t) = \frac{A\left(t + \frac{1}{2} \Delta t\right) - A\left(t - \frac{1}{2} \Delta t\right)}{\Delta t} \quad \text{dB/s} \quad (17)$$

El modelo es válido para las siguientes gamas de parámetros:

- frecuencias entre 10 y 30 GHz
- ángulos de elevación entre 10° y 50°.

Los parámetros necesarios para el modelo son los siguientes:

$A$ : nivel de atenuación (dB): 0-20 dB

$f_B$ : frecuencia de corte a 3 dB del filtro de paso bajo (Hz): 0,001-1 Hz

$\Delta t$ : duración del intervalo de tiempo sobre el que se calcula la pendiente del desvanecimiento: 2-200 s.

Los pasos para calcular la distribución de la pendiente de los desvanecimientos son los siguientes:

*Paso 1:* Se calcula la función  $F$  que define la dependencia con la duración del intervalo de tiempo  $\Delta t$  y con la frecuencia de corte a 3 dB del filtro de paso bajo  $f_B$ :

$$F(f_B, \Delta t) = \sqrt{\frac{2\pi^2}{\left(1/f_B^b + (2\Delta t)^b\right)^{1/b}}} \quad (18)$$

con  $b = 2,3$ .

*Paso 2:* Se calcula la desviación típica  $\sigma_\zeta$  de la pendiente del desvanecimiento condicional para un determinado nivel de atenuación:

$$\sigma_\zeta = s F(f_B, \Delta t) A \quad \text{dB/s} \quad (19)$$

siendo  $s$  un parámetro que depende del clima y del ángulo de elevación; el valor medio general en Europa y Estados Unidos de América, para ángulos de elevación entre  $10^\circ$  y  $50^\circ$ , es  $s = 0,01$ .

*Paso 3a:* Se calcula la probabilidad condicional  $p(\zeta|A)$  (función densidad de probabilidad) de que la pendiente del desvanecimiento sea igual a  $\zeta$  para un determinado valor de la atenuación,  $A$ :

$$p(\zeta|A) = \frac{2}{\pi\sigma_\zeta (1 + (\zeta/\sigma_\zeta)^2)^2} \quad (20)$$

*Paso 3b:* Cuando sea necesario, se calcula la probabilidad condicional  $P(\zeta|A)$  (función distribución acumulativa complementaria) de sobrepasar la pendiente del desvanecimiento para un determinado valor de la atenuación,  $A$ :

$$P(\zeta|A) = \frac{1}{2} - \frac{(\zeta/\sigma_\zeta)}{\pi(1 + (\zeta/\sigma_\zeta)^2)} - \frac{\text{arctg}(\zeta/\sigma_\zeta)}{\pi} \quad (21)$$

o se calcula la probabilidad condicional  $P(|\zeta| | A)$  de sobrepasar el valor absoluto de la pendiente del desvanecimiento  $\zeta$  para un determinado valor de la atenuación,  $A$ :

$$P(|\zeta| | A) = \int_{-\infty}^{-\zeta} p(x|A) dx + \int_{\zeta}^{\infty} p(x|A) dx = 1 - \frac{2(|\zeta|/\sigma_\zeta)}{\pi(1 + (|\zeta|/\sigma_\zeta)^2)} - \frac{2 \text{arctg}(|\zeta|/\sigma_\zeta)}{\pi} \quad (22)$$

El modelo de la ecuación (22) se comprobó con datos entre 12,5 GHz y 50 GHz. Los resultados muestran un buen ajuste con la curva de la distribución acumulativa de la pendiente de los desvanecimientos y con su variación con el umbral de atenuación  $A$ , la duración del intervalo  $\Delta t$  y la frecuencia de corte a 3 dB del filtro paso bajo,  $f_B$ .