

RECOMENDACIÓN UIT-R P.680-2

DATOS DE PROPAGACIÓN NECESARIOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN MÓVILES MARÍTIMOS TIERRA-ESPACIO

(Cuestión UIT-R 207/3)

(1990-1992-1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que para la planificación adecuada de los sistemas de telecomunicación móviles marítimos Tierra-espacio es necesario disponer de datos de propagación y métodos de predicción apropiados;
- b) que se recomiendan los métodos de la Recomendación UIT-R P.618 para la planificación de los sistemas de telecomunicación Tierra-espacio;
- c) que es necesario desarrollar aún más los métodos de predicción para la aplicación específica a los sistemas móviles marítimos por satélite con el fin de ofrecer una precisión adecuada para todas las condiciones de explotación;
- d) que, sin embargo, se dispone de métodos que permiten obtener una precisión suficiente para muchas aplicaciones,

recomienda

1 que se adopten los métodos actuales contenidos en el Anexo 1 para la planificación de los sistemas de telecomunicación móviles marítimos Tierra-espacio, además de los métodos indicados en la Recomendación UIT-R P.618.

ANEXO 1

1 Introducción

Las telecomunicaciones por enlaces Tierra-espacio para los sistemas del servicio móvil marítimo por satélite (SMMS) conducen a problemas de propagación que son sustancialmente diferentes de los que se plantean en el servicio fijo por satélite (SFS). Por ejemplo, los efectos de las reflexiones y de la dispersión producidas por la superficie del mar pueden ser muy importantes; en particular cuando se utilizan antenas con anchuras de haz grandes. Además, los sistemas del SMMS pueden trabajar en un ámbito mundial incluyendo trayectos con ángulos de elevación pequeños.

En este Anexo se consideran los datos y modelos específicamente necesarios para caracterizar las degradaciones del trayecto mar-espacio, que comprenden:

- efectos troposféricos, incluida la atenuación debida a la lluvia, la absorción por los gases, la refracción, el centelleo, y la propagación anómala que se produce con ángulos de elevación pequeños;
- efectos ionosféricos, como centelleo y rotación de Faraday;
- efectos de reflexión en la superficie (trayectos múltiples debidos a trayectos secundarios como consecuencia de la reflexión de las ondas radioeléctricas en la superficie del mar);
- efectos del entorno local (movimiento del barco y condiciones del mar);
- efectos de interferencia ocasionados por el desvanecimiento diferencial entre la señal deseada y la señal interferente, ambas afectadas por desvanecimiento multitrayecto.

2 Efectos troposféricos

2.1 Atenuación

Las pérdidas de la señal en la troposfera se deben a los gases atmosféricos, la lluvia, la niebla y las nubes. Excepto para ángulos de elevación bajos, la atenuación troposférica es insignificante en frecuencias inferiores a 1 GHz aproximadamente, y normalmente es reducida en frecuencias de unos 10 GHz. Por encima de 10 GHz, la atenuación puede ser grande durante porcentajes de tiempo considerables en muchos trayectos.

Se dispone de métodos de predicción para estimar la absorción por los gases (véase la Recomendación UIT-R P.676) y la atenuación debida a la lluvia (véase la Recomendación UIT-R P.618). La atenuación a causa de la niebla y de las nubes es generalmente insignificante en frecuencias de hasta 10 GHz.

2.2 Centelleo

Las variaciones irregulares del nivel de la señal recibida y del ángulo de llegada se deben a la turbulencia troposférica y a la propagación por trayectos múltiples atmosféricos. Estos efectos son de mayor magnitud al aumentar la frecuencia y al disminuir el ángulo de elevación del trayecto, salvo que las fluctuaciones del ángulo de llegada debidas a la turbulencia son independientes de la frecuencia. La anchura del haz de la antena influye también en la magnitud de tales centelleos. Se ha observado que estos efectos alcanzan su máximo en el verano. En la Recomendación UIT-R P.618 se ofrece un método de predicción.

3 Efectos ionosféricos

Los efectos ionosféricos (véase la Recomendación UIT-R P.531) pueden ser importantes, particularmente en frecuencias inferiores a 1 GHz. Para mayor comodidad se calculan en el Cuadro 1 para las frecuencias de 0,1, 0,25, 0,5, 1, 3 y 10 GHz y para los valores máximos del contenido total de electrones.

3.1 Centelleo ionosférico

Las irregularidades en la densidad electrónica de la ionosfera producen un enfoque o desenfoque refractivo de las ondas radioeléctricas y conducen a fluctuaciones de amplitud denominadas centelleos. El centelleo ionosférico es máximo en las proximidades del ecuador geomagnético y mínimo en las regiones de latitud media. Las zonas aurorales son también zonas de gran centelleo. El fuerte centelleo presenta una distribución de Rayleigh en amplitud; el centelleo débil tiene aproximadamente una distribución log-normal. Estas fluctuaciones disminuyen al aumentar la frecuencia y dependen de la geometría del trayecto, la ubicación de la estación, la actividad solar y la hora local. El Cuadro 2 presenta datos sobre la profundidad de desvanecimiento en frecuencias de VHF y UHF en latitudes medias, basados en la información de la Recomendación UIT-R P.531.

Junto con la fluctuación de amplitud existe también una fluctuación de fase. La densidad espectral de la fluctuación de fase es proporcional a $1/f^3$, donde f es la frecuencia de Fourier de la fluctuación. Esta característica espectral es similar a la que aparece en la fluctuación de frecuencia de los osciladores y puede provocar una degradación significativa de las características en un equipo de recepción.

3.2 Rotación de Faraday

Una señal con polarización lineal, que se propaga a través de la ionosfera, sufre una rotación progresiva en el plano de polarización. Los efectos se resumen en el Cuadro 1.

La relación axial de una onda incidente polarizada elípticamente puede aumentar o disminuir en la reflexión (en particular para ángulos pequeños), puesto que la rotación de Faraday varía la orientación del eje principal de polarización de la onda incidente. Esto es debido a la diferencia esperada en el coeficiente de reflexión para componentes horizontal y vertical, en la mayoría de las situaciones de propagación por trayectos múltiples.

La rotación de Faraday puede producir efectos notables en el funcionamiento de los sistemas de banda ancha. En VHF, no se pueden corregir completamente los efectos de rotación diferencial actuando sobre la orientación del eje de la antena cuando se trata de polarización lineal. Con una antena con polarización circular, el efecto se manifiesta en forma de desplazamientos de fase diferenciales de las componentes de la señal en toda la banda. Por lo tanto, las componentes de la señal de frecuencias diferentes pueden probablemente producir una distorsión selectiva en frecuencia y en fase.

CUADRO 1

Efectos máximos estimados* de la ionosfera, para un trayecto unidireccional con un ángulo de elevación de unos 30°**

(derivados de la Recomendación UIT-R P.531)

Efecto	Dependencia de la frecuencia	0,1 GHz	0,25 GHz	0,5 GHz	1 GHz	3 GHz	10 GHz
Rotación de Faraday	$1/f^2$	30 vueltas	4,8 vueltas	1,2 vueltas	108°	12°	1,1°
Retardo de propagación	$1/f^2$	25 μ s	4 μ s	1 μ s	0,25 μ s	0,028 μ s	0,0025 μ s
Refracción	$1/f^2$	< 1°	< 0,16°	< 2,4'	< 0,6'	< 4,2''	< 0,36''
Variación de la dirección de llegada (valor cuadrático medio)	$1/f^2$	20'	3,2'	48''	12''	1,32''	0,12''
Absorción (auroral y/o debida al casquete polar)	$\approx 1/f^2$	5 dB	0,8 dB	0,2 dB	0,05 dB	6×10^{-3} dB	5×10^{-4} dB
Absorción (en latitudes medias)	$1/f^2$	< 1 dB	< 0,16 dB	< 0,04 dB	< 0,01 dB	< 0,001 dB	< 10^{-4} dB
Dispersión	$1/f^3$	0,4 ps/Hz	0,026 ps/Hz	0,0032 ps/Hz	0,0004 ps/Hz	$1,5 \times 10^{-5}$ ps/Hz	4×10^{-7} ps/Hz
Centelleo ⁽¹⁾					> 20 dB cresta a cresta	\approx 10 dB cresta a cresta	\approx 4 dB cresta a cresta

* Esta estimación se basa en un contenido total de electrones de 10^{18} electrones/m², valor elevado que se verifica en bajas latitudes en horas diurnas con alta actividad solar.

** Los efectos ionosféricos por encima de 10 GHz son despreciables.

(1) Valores observados cerca del ecuador geomagnético durante las primeras horas de la noche (hora local) en el equinoccio en condiciones de máximo número de manchas solares.

CUADRO 2

Distribución de la intensidad de los desvanecimientos debidos al centello ionosférico (dB)

Porcentaje de tiempo (%)	Frecuencia (GHz)			
	0,1	0,2	0,5	1
1,0	5,9	1,5	0,2	0,1
0,5	9,3	2,3	0,4	0,1
0,2	16,6	4,2	0,7	0,2
0,1	25,0	6,2	1,0	0,3

4 Desvanecimiento debido a la reflexión en el mar

4.1 Profundidad del desvanecimiento

El siguiente método sencillo proporciona una estimación aproximada de la potencia de la señal propagada por trayectos múltiples o de la profundidad del desvanecimiento, adecuada para muchas aplicaciones en ingeniería.

Condiciones aplicables:

Gama de frecuencias: 0,8-8 GHz

Ángulo de elevación: $5^\circ \leq \theta_i \leq 20^\circ$

donde $G(\theta)$ es el diagrama de radiación del lóbulo principal de la antena y viene dado por la expresión:

$$G(\theta) = -4 \times 10^{-4} (10^{G_m/10} - 1) \theta^2 \quad \text{dBi} \quad (1)$$

donde:

G_m : valor de la ganancia máxima de antena (dBi)

θ : ángulo medido a partir de la dirección de puntería (grados).

Polarización: circular

Estado del mar: olas de altura entre 1 y 3 m (componente incoherente totalmente desarrollada).

Paso 1: Hallar la ganancia relativa de la antena, G , en la dirección del punto especular de reflexión. La ganancia de antena relativa viene dada por la ecuación (1) de forma aproximada, donde $\theta = 2 \theta_i$ (grados).

Paso 2: Aplicar fórmulas de Fresnel para calcular el coeficiente de reflexión del mar con polarización circular, R_C :

$$R_C = \frac{R_H + R_V}{2} \quad (\text{polarización circular}) \quad (2a)$$

donde:

$$R_H = \frac{\text{sen } \theta_i - \sqrt{\eta - \cos^2 \theta_i}}{\text{sen } \theta_i + \sqrt{\eta - \cos^2 \theta_i}} \quad (\text{polarización horizontal}) \quad (2b)$$

$$R_V = \frac{\text{sen } \theta_i - \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta_i)/\eta^2}}{\text{sen } \theta_i + \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta_i)/\eta^2}} \quad (\text{polarización vertical}) \quad (2c)$$

y $\eta = \epsilon_r(f) - j 60 \lambda \sigma(f)$

donde:

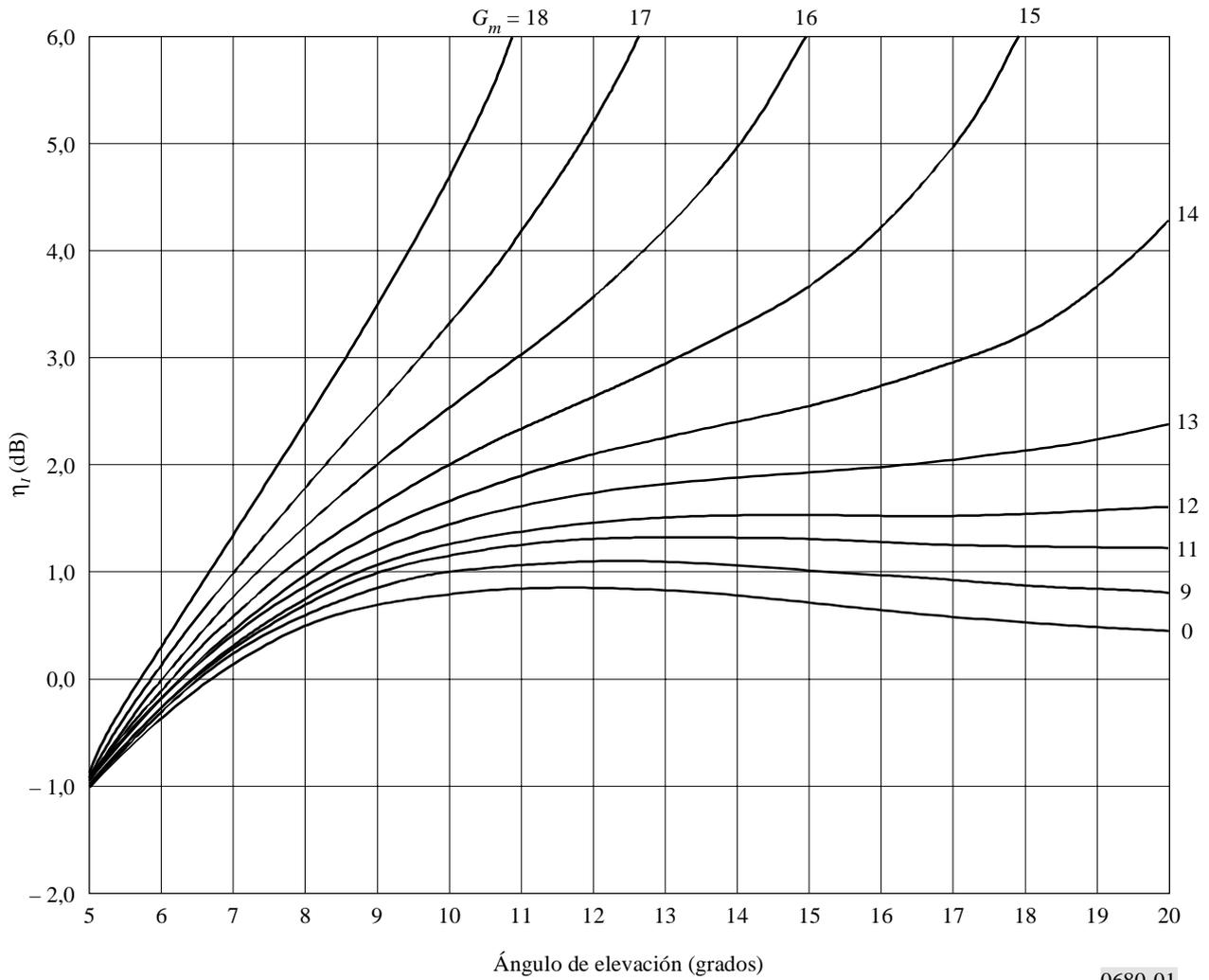
$\epsilon_r(f)$: permitividad relativa de la superficie, a la frecuencia f (según la Recomendación UIT-R P.527)

$\sigma(f)$: conductividad (S/m) de la superficie, a la frecuencia f (según la Recomendación UIT-R P.527)

λ : longitud de onda en el espacio libre (m).

Paso 3: Hallar el coeficiente difuso normalizado (relación entre el componente difuso de reflexión y el coeficiente de reflexión para un estado del mar en calma), η_f (dB), a partir de la Fig. 1.

FIGURA 1
 Valor medio de los coeficientes difusos normalizados en la banda 0,8-8 GHz



0680-01

Paso 4: La potencia incoherente media de las ondas reflejadas en el mar con respecto a la onda directa, P_r , se expresa mediante la ecuación:

$$P_r = G + R + \eta_I \quad \text{dB} \quad (3)$$

donde:

$$R = 20 \log |R_C| \quad \text{dB} \quad (3a)$$

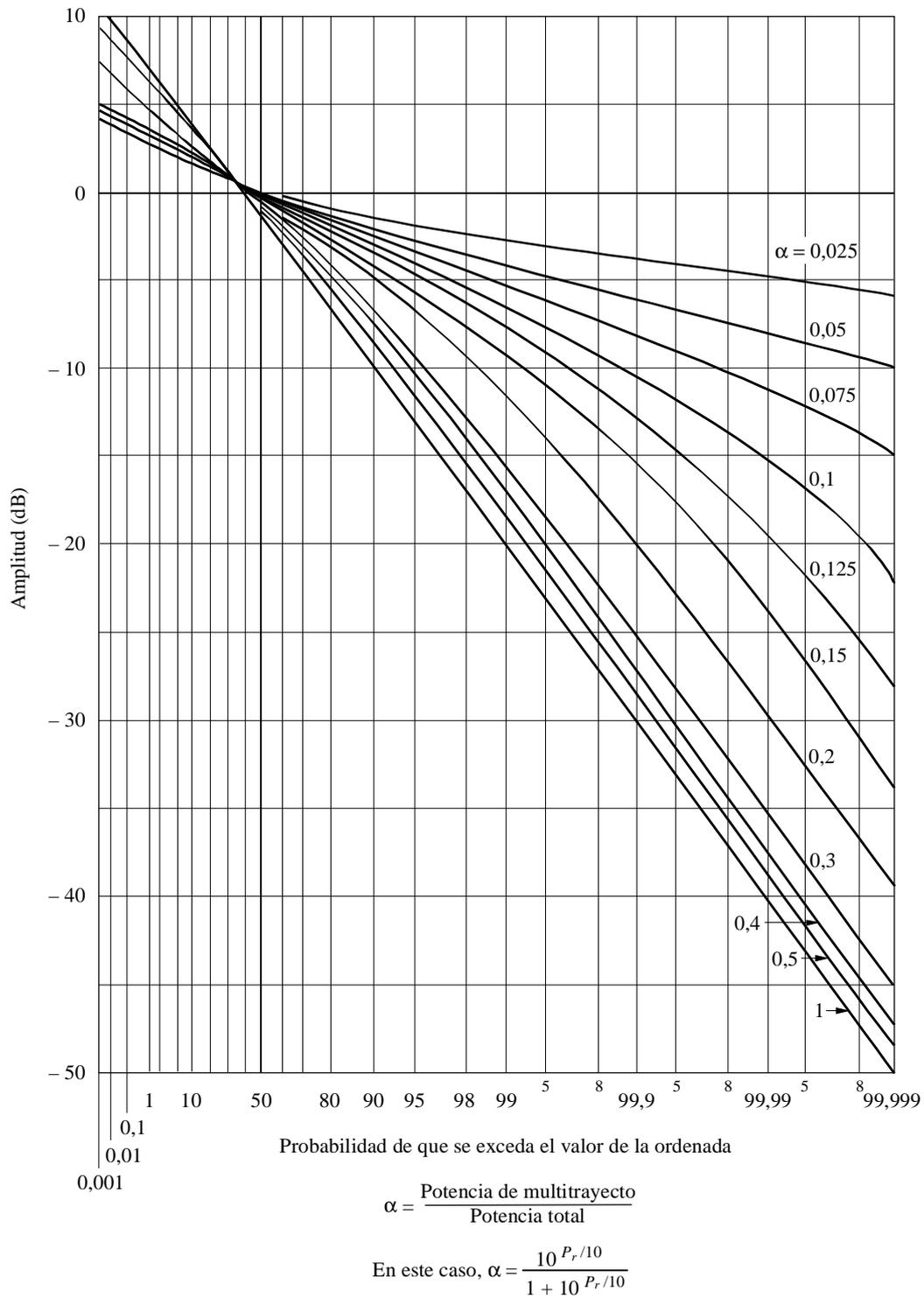
con R_C obtenido de la ecuación (2).

Paso 5: Suponiendo la distribución de Nakagami-Rice, se calcula la profundidad del desvanecimiento aplicando la expresión:

$$A + 10 \log \left(1 + 10^{P_r/10} \right) \quad (4)$$

donde A es la amplitud (dB), leída en el eje de ordenadas de la Fig. 2.

FIGURA 2

Distribución de Nakagami-Rice para una potencia total constante con el parámetro, α 

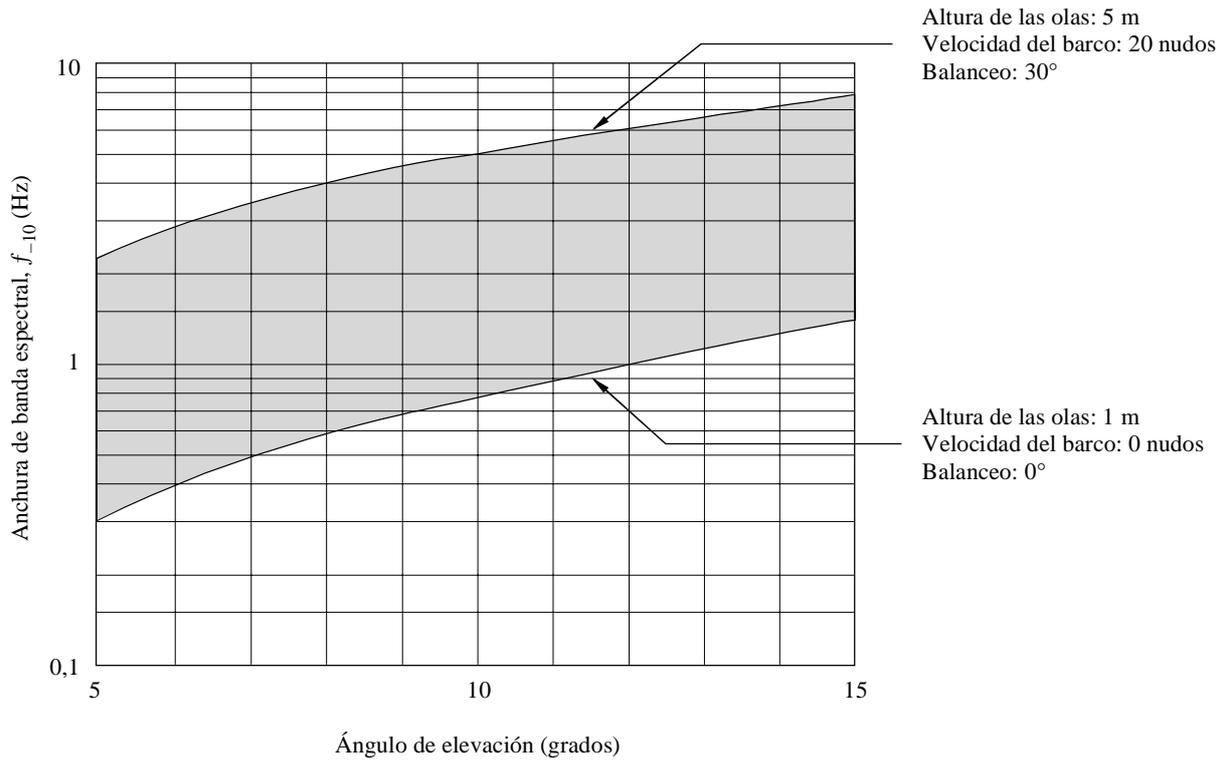
0680-02

4.2 Espectro de frecuencia y estadísticas de la duración de los desvanecimientos

En general, la anchura de banda espectral aumenta al hacerla la altura de las olas, el ángulo de elevación, la velocidad del barco y el movimiento relativo de la antena a bordo del mismo (balanceo/cabeceo). La forma espectral depende poco de la polarización de la antena, y la dependencia de la ganancia de la antena es reducida en el caso de ganancias inferiores a unos 10 dB.

La anchura de banda espectral a -10 dB, f_{-10} , es la anchura de banda en la cual la densidad de potencia disminuye a -10 dB con respecto a la densidad de potencia de cresta. La Fig. 3 muestra la gama probable de anchura de banda espectral a -10 dB del desvanecimiento debido a la propagación por trayectos múltiples en la banda de $1,5$ GHz obtenida por el modelo de desvanecimiento teórico en función del ángulo de elevación en las condiciones usuales de las comunicaciones marítimas por satélite (altura significativa de las olas de 1 a 5 m, velocidad del barco de 0 a 20 nudos y balanceo de 0 a 30°).

FIGURA 3
Anchura de banda espectral a -10 dB del desvanecimiento por trayectos múltiples a $1,5$ GHz debido a la reflexión en el mar en función del ángulo de elevación



0680-03

Los valores medios de la duración del desvanecimiento, $\langle T_D \rangle$, y el intervalo de ocurrencia de los desvanecimientos $\langle T_I \rangle$ definidos en la Fig. 4 pueden obtenerse mediante el siguiente procedimiento utilizando la anchura de banda espectral a -10 dB, f_{-10} .

$$\langle T_I(p) \rangle = \langle T_I(50\%) \rangle \exp [m(p)^2/2]$$

$$\langle T_D(p) \rangle = \langle T_I(p) \rangle (1 - p/100)$$

donde:

$$\langle T_I(50\%) \rangle = \sqrt{3} / f_{-10}$$

$$m = 2,33 - 0,847 a - 0,144 a^2 - 0,0657 a^3$$

$$a = \log (100 - p) \quad \text{para } 70\% \leq p \leq 99,9\%$$

Los valores previstos de $\langle T_D \rangle$ y $\langle T_I \rangle$ durante el 99% del tiempo para ángulos de elevación de 5° a 10° , van de $0,05$ a $0,4$ s para $\langle T_D \rangle$ y de 5 a 40 s para $\langle T_I \rangle$.

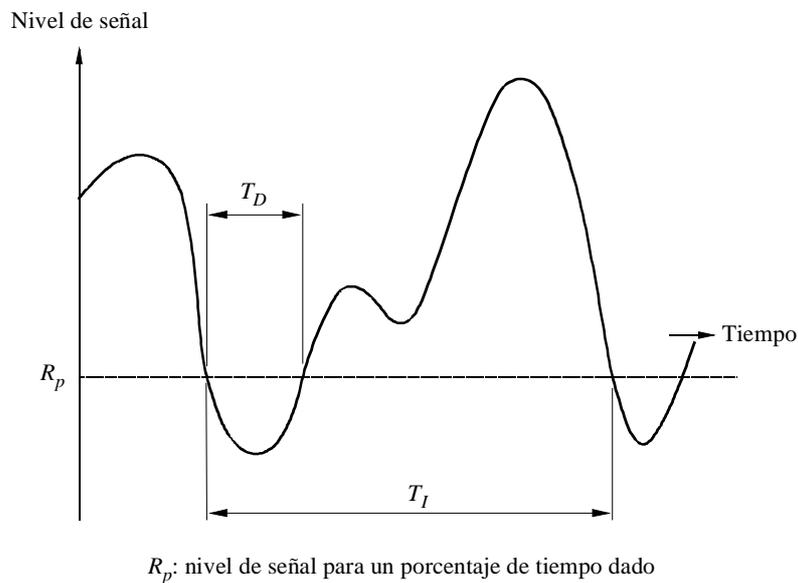
La función de densidad de probabilidad de T_D y de T_I en cualquier porcentaje de tiempo que varíe del 50 al 99% se aproxima bien a la distribución exponencial.

5 Interferencia ocasionada por sistemas de satélite adyacentes

5.1 Generalidades

En los sistemas de comunicaciones móviles por satélite, las amplitudes de la señal deseada del satélite y de una señal interferente producida por un satélite adyacente sufren fluctuaciones independientes, debido al desvanecimiento ocasionado por la propagación por trayectos múltiples, lo que exige un tratamiento diferente del que se aplica en los sistemas fijos por satélite. Un factor importante que hay que tener en cuenta son las estadísticas del desvanecimiento diferencial, es decir, de la diferencia de amplitud entre la onda directa y la onda interferente, sujetas ambas a desvanecimiento por trayectos múltiples.

FIGURA 4
Duración de los desvanecimientos e intervalo de ocurrencia de los desvanecimientos



0680-04

A continuación se ofrece un método práctico para predecir las estadísticas de la relación señal/interferencia que tiene en cuenta el ruido térmico y la interferencia variable con el tiempo.

5.2 Método de predicción

En general, se producen dos tipos de interferencia entre sistemas por satélite adyacentes: uno es la «interferencia de enlace descendente» en el lado de la estación terrena móvil, y el otro es la «interferencia de enlace ascendente» en el lado del satélite. También existe una interferencia entre haces cuando se utilizan varios haces estrechos y se asigna repetidamente una misma frecuencia. En esos casos se puede aplicar este método.

Los parámetros de entrada (expresados en unidades de potencia y no en dB) son:

D : potencia de la componente de onda directa de la señal deseada

M : potencia media de la componente reflejada (o sea, la componente incoherente) de la señal deseada

N : potencia media de ruido del sistema

I_D : potencia de la componente de onda directa de la señal interferente

I_M : potencia media de la componente reflejada de la señal interferente

(I : potencia media de la interferencia: $I = I_D + I_M$)

Los parámetros de salida (expresados en unidades de potencia y no en dB) son:

$[c/n](p)$: relación entre la potencia de la señal deseada y la potencia de ruido del sistema en función del porcentaje de tiempo p

$[c/i](p)$: relación entre las potencias de la señal deseada y de la señal interferente

$[c/(i+n)](p)$: relación entre la potencia de la señal deseada y la potencia de ruido del sistema más la potencia de la señal interferente.

La relación portadora/ruido en función de p viene dada por:

$$[c/n](p) = (\eta_c)^2(p) D/N \quad (5)$$

donde η_c es el factor normalizado dependiente del porcentaje de tiempo de la potencia de la señal deseada que tiene una función de densidad de probabilidad con distribución de Nakagami-Rice y una potencia directa constante según la Fig. 2, en la que:

$$20 \log \eta_c = A + 10 \log ((D + M)/D) \quad (6)$$

donde A es la amplitud (dB) leída en el eje de ordenadas de la Fig. 2. El parámetro de esa figura para esta aplicación es $M/(D + M)$.

La relación señal/interferencia en función de p viene dada por:

$$[c/i](p) = (\eta_{c/i})^2(p) D/I_{50} \quad (7)$$

donde I_{50} es el valor mediano (o sea, correspondiente al 50% del tiempo) de las variaciones de potencia de la señal interferente:

$$I_{50} = (\eta_{i,50})^2 I \quad (8)$$

y $\eta_{c/i}$ es el factor normalizado dependiente del porcentaje de tiempo de las variaciones de $[c/i]$ que viene dado aproximadamente por:

$$[\log \eta_{c/i}(p)]^2 = [\log \eta_c(p)]^2 + [\log \eta_i(100 - p)]^2 \quad (9)$$

donde η_i es el factor normalizado dependiente del porcentaje de tiempo de la potencia de la señal interferente. Se debe elegir una solución en la que $\eta_{c/i} < 1$ para el porcentaje de tiempo que cumple la condición $\eta_c < 1$ y $\eta_i > 1$. En el Cuadro 3 se indican $\eta_{i,50}$ y η_i (ambos en dB) en función de b cuando se hace $I_D/I = b$.

Por último,

$$[c/(i+n)](p) = [1/[c/n](p) + 1/[c/i](p)]^{-1} \quad (10)$$

La exactitud de la predicción de $[c/i]$ y $[c/(n+i)]$ por este método es de 1 dB o menos en todos los casos, dentro de las siguientes gamas de valores de los parámetros:

$$N \leq -5 \text{ dB}; \quad M \leq -5 \text{ dB}; \quad I \leq -10 \text{ dB}; \quad 0,5 \leq b \leq 1 \quad (11)$$

donde todas las magnitudes están referidas a D .

