

INFORME 1008-1

REFLEXIÓN EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

(Cuestión 1/5)

(1986-1990)

1. Introducción

En el presente Informe se describe sucintamente la influencia de la reflexión de las señales en la superficie de la Tierra en la calidad de funcionamiento de los sistemas de telecomunicación. Esta influencia es importante cuando la señal reflejada es suficientemente intensa para interferir aditiva o sustractivamente con la señal directa. La intensidad de la señal reflejada en los terminales de antena del receptor dependerá de la directividad de las antenas, de la altura de los terminales sobre la superficie de la Tierra, de la naturaleza del terreno y de la longitud del trayecto.

Las señales reflejadas suelen ser importantes en los sistemas que utilizan antenas de poca directividad, como las empleadas en los servicios móviles, y se han de tener necesariamente en cuenta en los diseños para el servicio móvil aeronáutico. Lo mismo sucede con los servicios móviles terrestre y marítimo por satélite porque existe un trayecto con visibilidad directa sobre toda la zona de servicio.

El resto del presente Informe se divide en tres partes. En la primera se describe la reflexión especular en una superficie terrestre plana. En el § 3 se describe la reflexión especular en una Tierra esférica lisa como base para los casos prácticos. La última parte, § 4, contiene una descripción cualitativa de la reflexión o dispersión difusas desde superficies rugosas y versa sobre la combinación de señales directas y de señales producidas por reflexión especular y por reflexión difusa y sobre su comportamiento estadístico.

2. Reflexión especular en una superficie terrestre plana

El coeficiente de reflexión, R_0 , en una superficie plana viene dado por la expresión:

$$R_0 = \frac{\operatorname{sen} \varphi - \sqrt{C}}{\operatorname{sen} \varphi + \sqrt{C}} \quad (1)$$

siendo φ el ángulo de incidencia rasante y

$$\begin{aligned} C &= \eta - \cos^2 \varphi && \text{en caso de polarización horizontal} \\ C &= (\eta - \cos^2 \varphi) / \eta^2 && \text{en caso de polarización vertical} \end{aligned}$$

con

$$\eta = \varepsilon_r(f) - j60\lambda\sigma(f)$$

donde:

$\varepsilon_r(f)$: constante dieléctrica relativa de la superficie para la frecuencia f

$\sigma(f)$: conductividad de la superficie para la frecuencia f (S/m) y

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

Esta expresión se representa en la fig. 1 en función del ángulo de incidencia rasante a distintas frecuencias y para dos juegos de valores para $\varepsilon_r(f)$ y $\sigma(f)$ correspondientes respectivamente a mar y tierra [Hall, 1979]. El ángulo en que el coeficiente de reflexión con polarización vertical es mínimo se denomina ángulo de Brewster. Este ángulo, φ_p , es aproximadamente igual a $\operatorname{sen}^{-1} (1/\sqrt{|\eta|})$.

Consideraciones especiales sobre el ángulo de Brewster pueden ser importantes en zonas costeras [Furnes, 1984; Stokke, 1984], a fin de reducir los problemas causados por reflexiones en el mar.

2.1 Efectos de polarización

Los términos polarización horizontal y polarización vertical se definieron originariamente respecto de la reflexión en una superficie terrestre plana por la conveniencia analítica de tratar separadamente las componentes del campo eléctrico de una onda radioeléctrica que son paralelas o perpendiculares a la superficie reflectora. Este concepto puede generalizarse para que comprenda los trayectos terrenales y Tierra-espacio, definiendo un plano de referencia a efectos de polarización. Este plano contiene el centro de la Tierra y los dos terminales del trayecto. La componente del campo eléctrico de la onda que es normal a este plano será la componente con polarización horizontal. La componente del campo eléctrico de la onda que es paralela a este plano será la componente con polarización vertical.

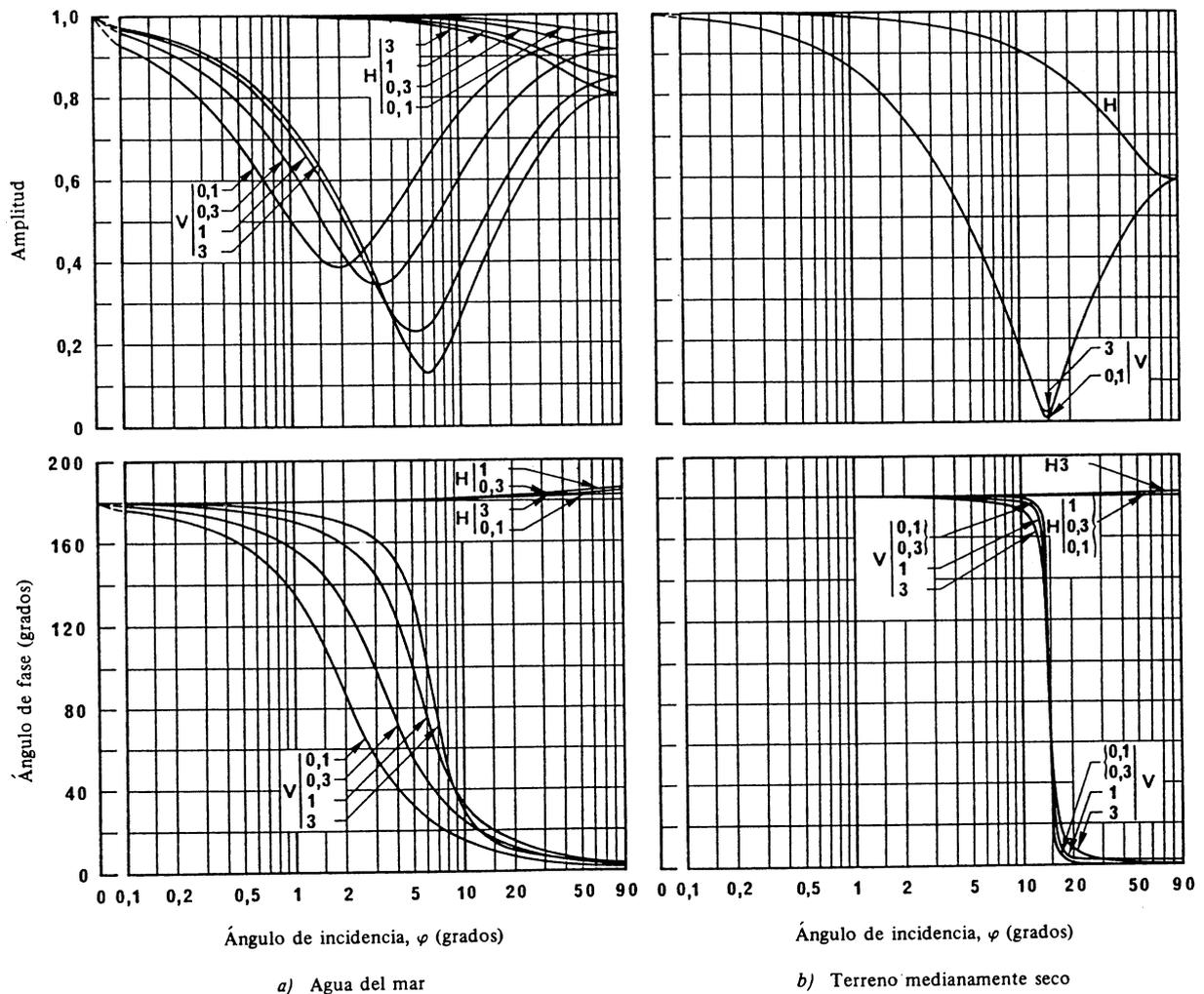


FIGURA 1- Amplitud y fase del coeficiente de reflexión en una superficie terrestre plana, en función del ángulo de incidencia, φ , con polarización vertical (V) y horizontal (H)

Las frecuencias se indican en GHz.

Nota. - Las características correspondientes a las superficies de agua del mar y terreno medianamente seco se dan en la Recomendación 527.

El coeficiente de reflexión especular, en el caso de polarización vertical, será igual o inferior al coeficiente de la polarización horizontal. Así, la polarización de la onda reflejada será diferente de la polarización de la onda incidente si la polarización incidente no es puramente horizontal o puramente vertical. Por ejemplo, una onda incidente con polarización circular queda polarizada elípticamente después de la reflexión. Asimismo, cuando el ángulo de incidencia rasante es mayor que el ángulo de Brewster se invierte el sentido de la rotación.

El cálculo de la amplitud y la polarización de la onda reflejada suele realizarse descomponiendo la onda incidente en sus componentes horizontal y vertical y calculando luego la amplitud y fase de cada componente de la onda reflejada mediante la ecuación (1) [Kraus y Carver, 1984].

3. Reflexión especular en una Tierra esférica lisa

Una señal reflejada en una Tierra esférica lisa, según se puede ver en la fig. 2, se denomina señal con reflexión especular porque el ángulo de incidencia rasante, φ , es igual al ángulo de reflexión. La amplitud de la señal reflejada es igual a la amplitud de la señal incidente multiplicada por el módulo del coeficiente de reflexión R . La fase de la señal reflejada es la suma del cambio de fase debido a la reflexión, más el debido a la diferencia de longitud de los trayectos de la señal directa y de la señal reflejada.

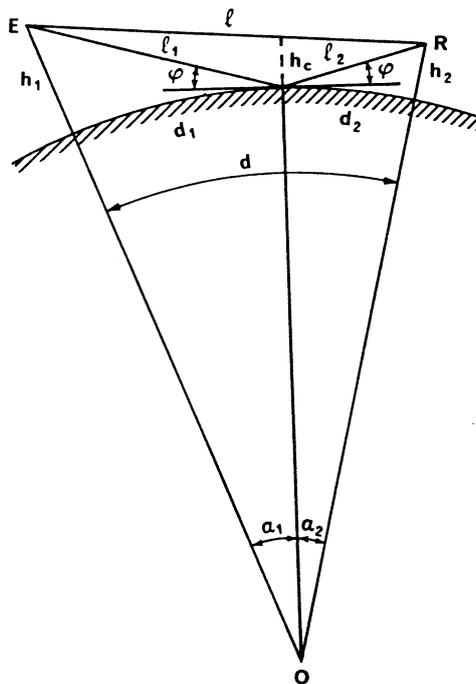


FIGURA 2 – Elementos geométricos de la reflexión en una Tierra esférica

3.1 Reflexión para ángulos de incidencia rasante reducidos

En la mayoría de los sistemas de comunicaciones terrenales la reflexión se produce con ángulos de incidencia rasante muy pequeños. En estos casos, el valor del coeficiente de reflexión R se aproxima a -1 . El resultado es un campo recibido en el que el campo directo y el reflejado son de amplitud igual y tienen una diferencia de fase de casi 180° . La diferencia de fase viene determinada por la diferencia de longitud de los trayectos.

Es conveniente expresar el despejamiento del trayecto determinando cuál es el elipsoide de Fresnel (véase el Informe 715) tangente al suelo, pero sin olvidar que el número n que caracteriza a este elipsoide no es obligatoriamente un número entero. Entonces se puede demostrar que el nivel recibido es inferior al nivel en el espacio libre si n es inferior a $1/3$, es decir, si el radio ecuatorial del elipsoide tangente al suelo es inferior a la fracción $1/\sqrt{3}$ del radio ecuatorial del primer elipsoide de Fresnel.

Otro valor de despejamiento que conviene conocer es el valor por debajo del cual la óptica geométrica no se puede utilizar ya, porque los fenómenos de difracción pasan a ser preponderantes. Este valor se expresa por medio del ángulo rasante del rayo reflejado. El valor límite de ese ángulo viene dado por la relación aproximada:

$$\varphi(\text{mrad}) = \left\{ \frac{2100}{f(\text{MHz})} \right\}^{1/3} \quad (2)$$

lo que da, por ejemplo, un ángulo límite de 5,94 mrad a 10 MHz, 2,76 mrad a 100 MHz y 1,28 mrad a 1 GHz [Boithias, 1984].

3.2 *Análisis geométrico de la reflexión*

El análisis de la reflexión en una superficie requiere la determinación del punto geométrico de reflexión especular situado a cierta distancia, d_1 , de uno de los terminales. Esta determinación no es fácil y una solución exacta sólo existe para una superficie terrestre llana. Se dispone de soluciones aproximadas para distancias angulares pequeñas en el caso de terminales situados cerca de la superficie terrestre y para distancias muy grandes entre terminales, como sucede con un terminal terreno y un satélite geostacionario [Boithias, 1984; Kerr, 1965].

En el primer caso, conviene definir dos magnitudes intermedias, m y c :

$$m = \frac{d^2}{4 a_e (h_1 + h_2)} \quad (3)$$

$$c = (h_1 - h_2)/(h_1 + h_2) \quad h_1 > h_2 \quad (4)$$

donde a_e es el radio efectivo de la Tierra y las demás magnitudes son las de la fig. 2. Luego se halla una tercera magnitud, b :

$$b = 2 \sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right] \quad (5)$$

y las magnitudes que interesan, es decir, la distancia d_1 , la diferencia de longitud del trayecto, Δ y el ángulo de incidencia rasante φ (rad), vienen dadas por:

$$d_1 = \frac{d}{2} (1 + b) \quad (6)$$

$$\Delta = \frac{2d_1 d_2}{d} \varphi^2 \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{h_1 + h_2}{d} [1 - m(1 + b^2)] \quad (8)$$

Para trayectos Tierra-espacio l y l_1 son casi paralelos por las grandes distancias que intervienen. En este caso:

$$d_1 \approx h \cotg E \quad (9)$$

$$\Delta \approx 2h \sen E \quad (10)$$

$$\varphi \approx E + \frac{h}{a_e + h} \cotg E \text{ (radianes)} \quad (11)$$

siendo E el ángulo de elevación del satélite y h la altura de la estación terrestre por encima de la superficie terrestre.

Se ha desarrollado un método experimental para localizar el punto de reflexión que utiliza variaciones medidas de la intensidad de campo recibida en función de la altura [Furnes, 1984], y se ha utilizado satisfactoriamente en aplicaciones de radiodifusión.

3.3 Factor de divergencia

Cuando los rayos se reflejan especularmente en una superficie esférica, hay una reducción efectiva del coeficiente de reflexión que es en realidad un efecto geométrico debido a la divergencia de los rayos. Este efecto se recoge escribiendo el coeficiente de reflexión en una Tierra esférica lisa de la siguiente manera:

$$R = D R_0 \quad (12)$$

donde R_0 es el coeficiente de reflexión en una superficie plana de la ecuación (1) y D es un factor de divergencia.

El factor de divergencia en los trayectos terrestres viene dado por la expresión:

$$D = \left[1 + \frac{2}{a_e \sen \varphi} \frac{l_1 l_2}{l_1 + l_2} \right]^{-1/2} \quad (13)$$

y en el caso de los trayectos Tierra-espacio, esa expresión puede adoptar la forma:

$$D \approx \left[1 + \frac{2h \tg E}{a_e \sen \varphi} \right]^{-1/2} \quad (14)$$

La ecuación (14) tiene un valor de ≈ 1 con ángulos de elevación superiores a 5° y una altura del terminal inferior a 2 km. El concepto de divergencia ya no es aplicable si el valor del ángulo de incidencia rasante, φ , es inferior al valor límite indicado por la fórmula (2).

3.4 Reflexión parcial en la superficie terrestre

En una Tierra esférica lisa, el mecanismo de reflexión puede asimilarse a la reflexión de un solo rayo incidente en un solo punto geométrico. Sin embargo, la superficie total contribuye a la señal reflejada, y la mayor contribución proviene de la superficie de las zonas de Fresnel próximas del punto de reflexión geométrico.

En las consideraciones previas de la reflexión desde la superficie de la Tierra se ha supuesto que la Tierra es una esfera uniforme y lisa. En la práctica se pueden encontrar tres situaciones no ideales o combinaciones de las mismas. El primer caso es el de las superficies no uniformes, es decir, superficies que presentan irregularidades que no son demasiado grandes comparadas con una longitud de onda. En el § 4 se describe más detalladamente la reflexión en superficies irregulares.

El segundo caso se da cuando el coeficiente de reflexión no es uniforme, es decir, cuando su valor varía según la posición en la superficie. Como ejemplo de este caso cabe citar la superficie reflectante de un lago rodeado por suelos de baja reflectividad.

El tercer caso es el de una zona reflectante limitada. Se da cuando un trayecto de visibilidad directa desde cualquier terminal a una región situada en la superficie reflectante se ve obstruido por edificios, árboles, colinas, etc.

El concepto de coeficiente de reflexión se puede también utilizar en estos casos no ideales si el coeficiente de reflexión correspondiente a una superficie terrestre esférica y lisa se modifica para tener en cuenta los efectos de estas superficies no ideales.

En el segundo y en el tercer caso puede obtenerse un cálculo del campo reflejado mediante el método de óptica física. Este método utiliza generalmente la teoría de imágenes, el principio de Babinet y la integral de Fresnel [Boithias, 1984]. El resultado de estos cálculos es un factor de reflexión parcial, F , que es la relación entre la amplitud del campo reflejado por la superficie no uniforme y la del reflejado por una superficie uniforme.

Desde el punto de vista puramente teórico, el valor de F puede estar comprendido entre 0 y 2. Se obtiene el valor de 2 si la onda incidente ilumina únicamente la primera zona de Fresnel próxima a la superficie de reflexión. En la práctica, F adquiere un valor comprendido entre 0,1 y 1,2 en la mayoría de los casos.

3.5 Coeficiente de reflexión efectivo para una Tierra esférica

El coeficiente de reflexión efectivo de una Tierra esférica, incluidos los efectos de divergencia y reflexión parcial, es:

$$R = FDR_0$$

4. Reflexión en superficies rugosas

En muchos casos prácticos, la superficie de la Tierra no es lisa. La reflexión de las señales radioeléctricas en superficies rugosas ha sido ampliamente estudiada [Beckmann y Spizzichino, 1963], pero la complejidad del problema ha impedido hallar fórmulas técnicas que describan completamente el mecanismo de reflexión.

Una fórmula útil es la definición cuantitativa del criterio de rugosidad de Rayleigh, que viene dado por:

$$g = 4\pi(S_h/\lambda) \text{ sen } \varphi \quad (15)$$

donde:

S_h : desviación típica de la altura de la superficie en torno al valor medio local dentro de la primera zona de Fresnel;

λ : longitud de onda en el espacio libre, y

φ : ángulo de incidencia rasante medido en relación con una tangente a la superficie.

En general, una superficie se puede considerar lisa cuando $g < 0,3$. Cuando la superficie es rugosa, la señal reflejada tiene dos componentes: una componente especular, de fase igual a la de la señal incidente, y una componente difusa, que fluctúa en amplitud y fase según una distribución de Rayleigh.

4.1 Coeficiente de reflexión especular para superficies rugosas

La componente especular se debe a una reflexión coherente, en el plano de incidencia, desde las zonas de Fresnel próximas del punto de reflexión geométrica y se puede describir por medio de un coeficiente de reflexión $R_s = \rho_s R$ donde ρ_s es un factor de reducción dependiente del modelo. Para superficies ligeramente rugosas con una distribución de altura aleatoria:

$$\rho_s = \exp(-1/2 g^2) \quad (16)$$

En superficies muy rugosas, la ecuación (16) tiende a subestimar ρ_s . Los modelos teóricos en los que se tienen en cuenta múltiples reflexiones [DeSanto, 1981] concuerdan con los datos experimentales, pero requieren para el cálculo técnicas de integración numérica.

Una reciente derivación de ρ_s para superficies marinas [Miller y otros, 1984] apunta la posibilidad de obtener una mejor estimación mediante la expresión:

$$\rho_s = \exp(-1/2 g^2) I_0(1/2 g^2) \quad (16a)$$

donde I_0 es la función Bessel modificada de orden cero. Con esta expresión, se obtiene una buena concordancia de los coeficientes de reflexión medidos en la superficie del mar [Beard, 1961].

Una expresión aproximada de esta fórmula es la siguiente:

$$\rho_s = \frac{1}{\sqrt{3,2x - 2 + \sqrt{(3,2x)^2 - 7x + 9}}} \quad (16b)$$

donde $x = 0,5 \epsilon^2$

4.2 Amplitud del coeficiente de reflexión difusa

La componente difusa de la señal reflejada se debe a la dispersión por una vasta zona y la contribución principal procede de regiones alejadas de la primera zona de Fresnel. La región que contribuye a la dispersión difusa se conoce con el nombre de «superficie reluciente». Las señales se dispersan desde estas superficies sin seguir ninguna dirección preferente. Es posible definir el coeficiente de reflexión difusa de la siguiente manera:

$$R_d = \rho_d |R| \quad (17)$$

donde ρ_d es un coeficiente que depende sólo de las irregularidades de la superficie.

No se ha encontrado una expresión simple para ρ_d cuyo valor en una superficie terrestre llana es de cero. Su valor máximo corresponde a superficies muy rugosas y su límite superior depende de la directividad de la antena y de la naturaleza del terreno. En el caso de antenas de poca directividad y sobre terreno llano o mar, el valor se sitúa entre 0,2 (-14 dB) y 0,4 (-8 dB) y el valor más probable es de 0,35 con superficies muy rugosas. En los casos en que la superficie reluciente no está plenamente iluminada, debido a que las antenas tienen una gran directividad o a la presencia de una pantalla o cuando la vegetación causa una importante absorción en la superficie, ρ_d es inferior a 0,2 y puede ser insignificante.

Las mediciones experimentales y los análisis teóricos indican que la componente difusa es estadísticamente aleatoria con una distribución de Rayleigh.

4.3 Campo reflejado total

La fig. 3 ilustra los factores de reducción especular y difusa medidos en una superficie marina [Beard, 1961]. En la figura se ha representado también la curva correspondiente a la ecuación (16). El campo total encima de una superficie reflejante es el resultado del campo directo, la componente especular coherente y la componente difusa aleatoria. El campo resultante sigue la distribución de Nakagami-Rice. Si se da por supuesto que la potencia total dispersada hacia adelante es constante, la relación:

$$\langle \rho_s \rangle^2 + \langle \rho_d \rangle^2 = \text{constante} \quad (18)$$

en la que $\langle \rho \rangle$ indica valores eficaces, puede ser útil para calcular el campo reflejado. En el cálculo de este campo resultante hay que tener también en cuenta la directividad de la antena.

La reflexión en superficies irregulares ha sido objeto de diversos estudios teóricos. Desgraciadamente, no se cuenta en la actualidad con fórmulas técnicas adecuadas para calcular el desvanecimiento por trayectos múltiples originado por ese tipo de reflexión. Se ha avanzado mucho en lo que se refiere a las superficies marinas a frecuencias próximas a 1,5 GHz [Karasawa y Shiokawa, 1984]. Es probable que la metodología elaborada para esa frecuencia sea válida para frecuencias inferiores y podría servir de base para hacerla extensiva a frecuencias superiores.

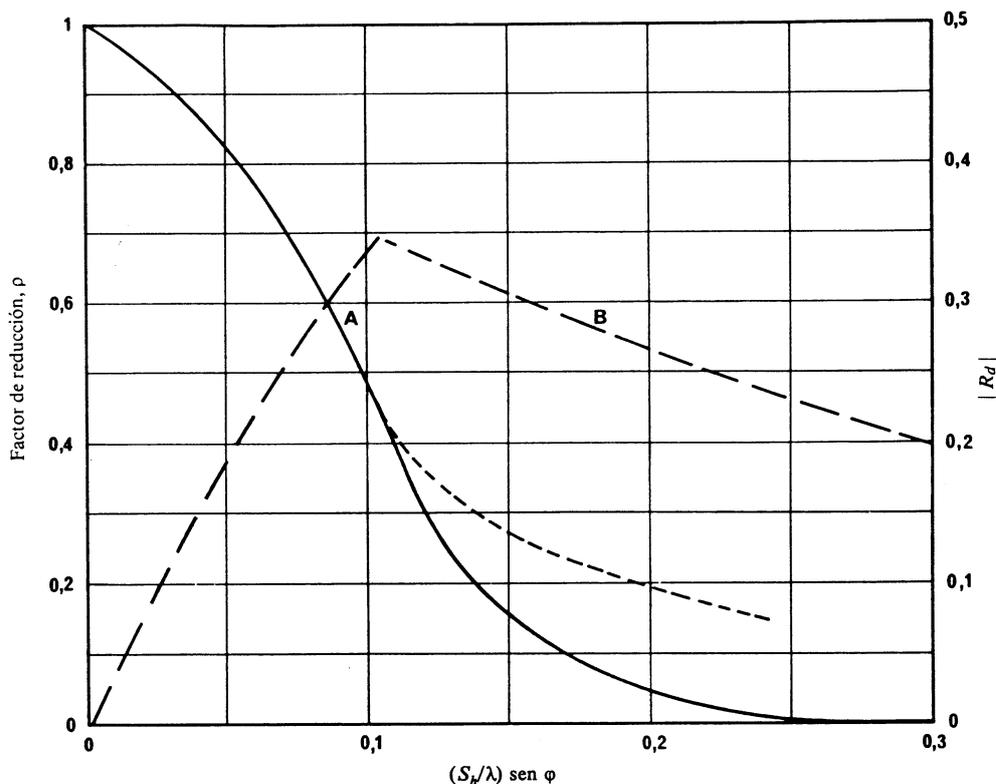


FIGURA 3 - Reflexión producida por superficies rugosas

La curva A corresponde a la componente especular. La línea de trazo continuo se ha calculado mediante la ecuación (16). La línea de trazos representa datos experimentales.

La curva B es un coeficiente de reflexión difusa medido experimentalmente, R_d [Beard, 1961].

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEARD, C. I. [1961] Coherent and incoherent scattering of microwaves from the ocean. *IRE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-9, 5, 470-483.
- BECKMANN, P. y SPIZZICHINO, A. [1963] *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*. Pergamon Press, Oxford, Reino Unido.
- BOITHIAS, L. [1984] *Propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement terrestre. Collection Technique et Scientifique des Télécommunications*. 2.ª edición, Editions Dunod, Paris, Francia. Traducción inglesa [1987] Radiowave propagation, Mc Graw Hill, New York.
- DeSANTO, J. A. [noviembre-diciembre de 1981] Scattering from a rough interface. *Radio Sci.*, Vol. 16, 6 1021-1024.
- FURNES, N. [1984] Practical results from FM broadcasting coverage in coastal areas and mountainous terrain in Norway. Use of methods to reduce or avoid propagation problems *Teletronikk*, 1, 57-80.
- HALL, M. P. M. [1979] *Effects of the Troposphere on Radio Communication*. IEE Electromagnetic Wave Series, 8, Peter Peregrinus Ltd., Londres, Reino Unido.
- KARASAWA, Y. y SHIOKAWA, T. [junio de 1984] Characteristics of L-band multipath fading due to sea surface reflection. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-32, 6, 618-632.
- KERR, D. E. [1965] *Propagation of Short Radio Waves*. Dover Publications Inc., Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- KRAUS, J. D. y CARVER, C. R. [1984] *Electromagnetics*, 3.ª edición, McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- MILLER, A. R., BROWN, R. M. y VEGH, E. [abril de 1984] New derivation for the rough-surface reflection coefficient and for the distribution of sea-wave elevations. *IEE Proc.*, Vol. 131, Parte H, 2, 114-116.
- STOKKE, K. N. [1984] Problems concerning FM broadcasting in coastal areas and mountainous terrain. Methods to reduce the influence of such problems. *Teletronikk*, 1, 44-56.