

**VARIACIONES DEL NIVEL DE LAS SEÑALES DEBIDAS A LA PROPAGACIÓN
POR TRAYECTOS MÚLTIPLES Y AL BLOQUEO POR LA SUPERESTRUCTURA
DE LOS BARCOS EN ENLACES DEL SERVICIO MÓVIL MARÍTIMO
POR SATÉLITE**

(Cuestión 88/8)

(1978-1982-1986-1990)

1. Introducción

Los efectos de la interferencia debida a la propagación por trayectos múltiples causados por señales que se reflejan en el mar, constituye un factor importante que se ha de considerar al establecer sistemas de telecomunicaciones del servicio móvil marítimo por satélite.

Las características de los desvanecimientos dependen:

- de la frecuencia,
- del ángulo de elevación,
- de las condiciones de la superficie del mar, especialmente de la altura y de la pendiente de las olas (el viento es un factor importante),
- del diagrama de la antena de a bordo,
- de la relación axial entre la antena del satélite y la antena del barco,
- de la orientación angular de las elipses de polarización de las antenas del satélite y del barco,
- del error de orientación de la antena del barco,
- de la superestructura del barco,
- de la altura de la antena sobre el nivel del mar.

Se ha incluido una estimación teórica basada en el modelo presentado en el Informe 884 para predecir valores del desvanecimiento en función del ángulo de elevación del satélite, del estado del mar y de la ganancia de la antena.

* Se ruega al Director del CCIR que señale este Informe a la atención de la Comisión de Estudio 5.



En los cuadros I y II se dan además, sinópticamente, las estimaciones teóricas y las mediciones de profundidad de desvanecimiento por trayectos múltiples comunicadas recientemente.

Se ha llevado a cabo una simulación por ordenador para evaluar el desvanecimiento debido a reflexiones en la superestructura de un barco; más adelante se indican los resultados de esa simulación. Se facilitan asimismo los factores de atenuación por bloqueo debido a una estructura de tipo columna.

También debe considerarse el error de puntería debido al movimiento aleatorio del barco en estaciones terrenas de barco con una baja relación G/T que utilicen estabilizadores de antena pasivos. En el Informe 921 se indican resultados experimentales y análisis estadísticos sobre este tema.

2. Características del desvanecimiento por trayectos múltiples

2.1 Consideraciones generales

El objeto del modelo teórico es proporcionar datos sobre el desvanecimiento debido a la propagación por trayectos múltiples, para diversos valores de los parámetros. La estimación teórica se basa en un modelo presentado en el Informe 884.

No se ha tenido en cuenta la discriminación por polarización, aunque para ángulos de elevación bajos, esa discriminación puede tener un efecto importante en las características de la señal recibida debido a la inversión del sentido de la polarización para ángulos de elevación superiores al ángulo de Brewster (unos 6° a 1,5/1,6 GHz por trayectos marítimos (véase el Informe 1008)). Ni se han tenido en cuenta las fluctuaciones debidas a la atmósfera, cuyo efecto tiene importancia cuando los efectos asociados al mar son desdeñables, es decir, para ángulos de elevación altos.

En general, el desvanecimiento por trayectos múltiples debido a reflexiones en el mar, se produce por la interferencia entre las ondas directa y reflejada. Las ondas reflejadas procedentes de la superficie del mar están constituidas por una componente coherente (componente de reflexión especular) que varía con la altura de la antena y una componente incoherente (componente difusa) que fluctúa con el movimiento de las olas del mar. La componente coherente predomina en condiciones de mar en calma, en tanto que la componente incoherente es dominante en condiciones de mar gruesa.

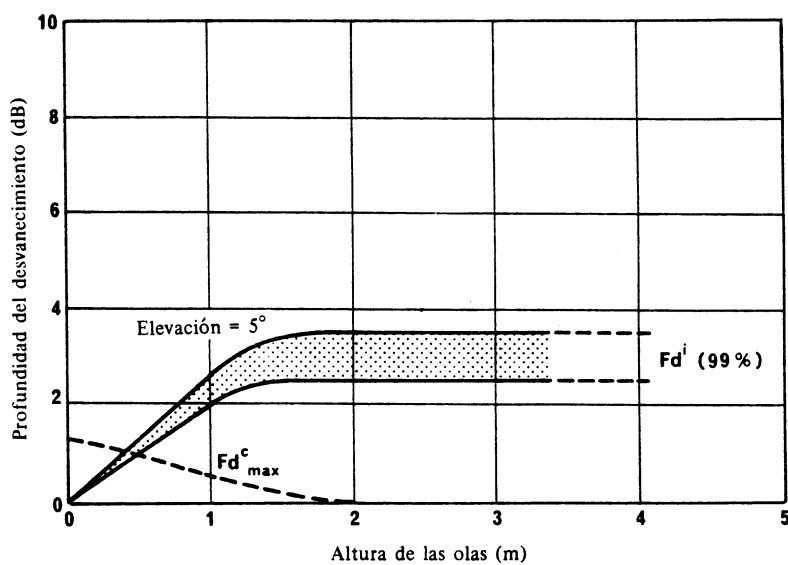
2.2 Profundidad del desvanecimiento

En la práctica, la profundidad del desvanecimiento para el $p\%$ del tiempo puede expresarse, aproximadamente, por la suma del desvanecimiento coherente $Fd_{máx}^c$ del desvanecimiento incoherente (Fd^i) según la siguiente expresión (véase también el Informe 884):

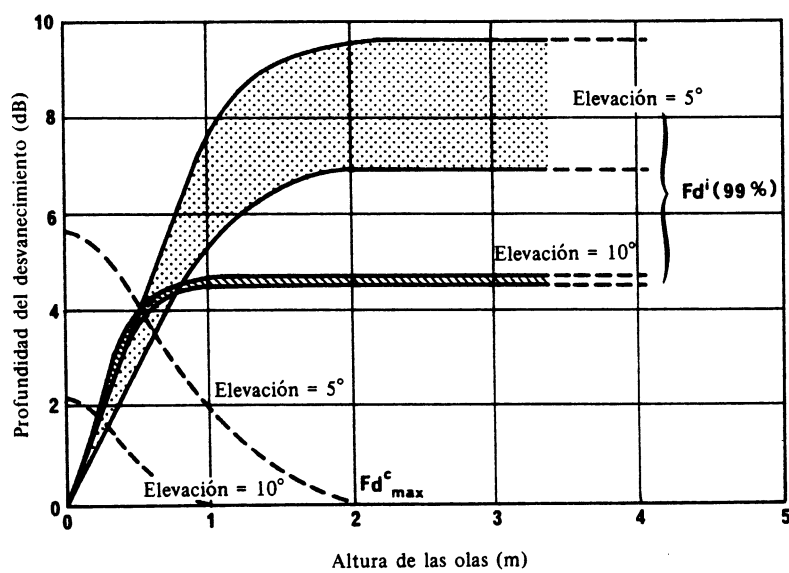
$$Fd(p\%) = Fd_{máx}^c + Fd^i(p\%)$$

En la fig. 1 se indican las profundidades del desvanecimiento para el 99% del tiempo, calculadas en 1,5 GHz para ganancias de antena de 24 y 14 dB, en función de la altura de las olas. La zona sombreada comprende la gama práctica de pendientes de las olas del mar comprendida entre 0,04 y 0,07. De estos resultados puede deducirse que la profundidad del desvanecimiento debido a la componente coherente disminuye de modo continuo cuando aumenta la altura de las olas, en tanto que la profundidad del desvanecimiento debido a la componente incoherente aumenta gradualmente con la altura de las olas hasta que alcanza un valor de cresta.

En la fig. 2 se representa la profundidad del desvanecimiento para ganancias de antena iguales a 24 dB, 20 dB, 15 dB y 8 dB en función del ángulo de elevación en el caso de una componente incoherente totalmente desarrollada, dada la altura de olas de 1,6-3,2 m.



a) Ganancia de la antena: 24 dB



b) Ganancia de la antena: 14 dB

FIGURA 1 - Profundidad del desvanecimiento en función de la altura de las olas

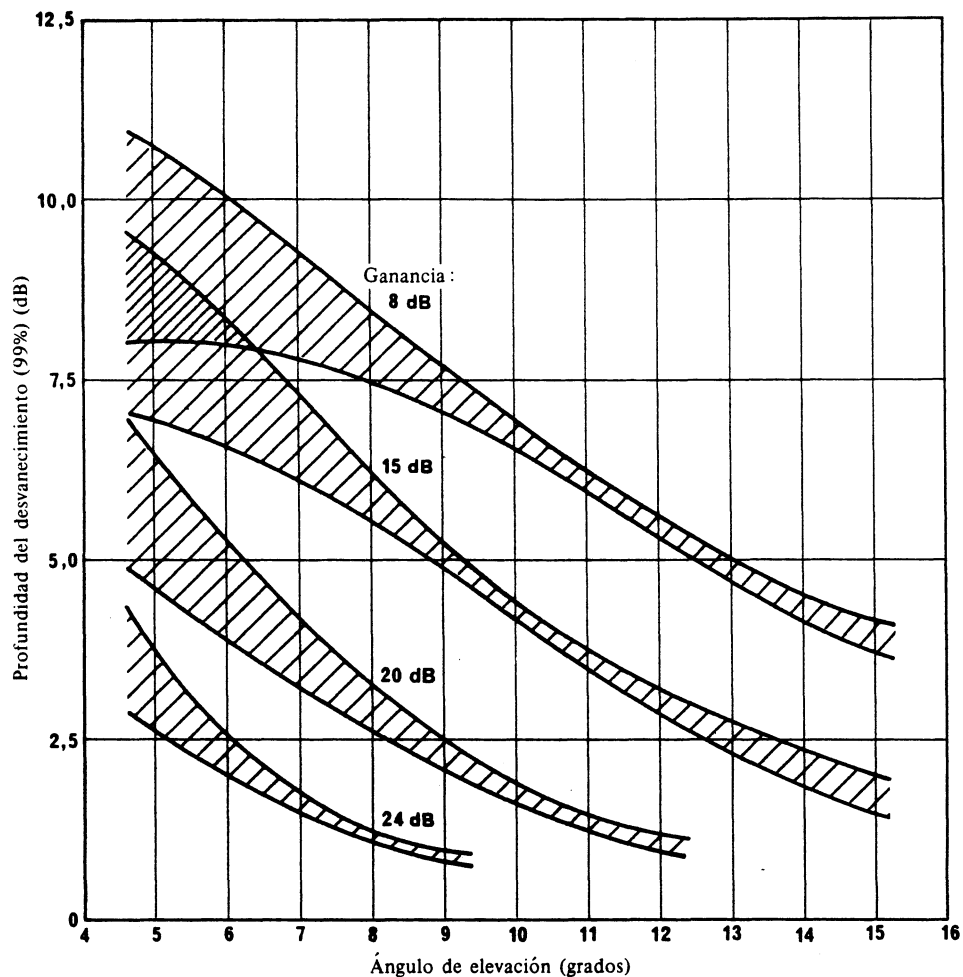


FIGURA 2 - Profundidad del desvanecimiento, para el 99% del tiempo, en función del ángulo de elevación, en el caso de altura de olas comprendidas entre 1,6 y 3,2 m

2.3 Espectro y estadísticas de duración del desvanecimiento

La anchura de banda del espectro de frecuencias correspondiente a las variaciones temporales de la amplitud, aumenta con la altura de las olas y el ángulo de elevación. De conformidad con los cálculos efectuados, teniendo en cuenta la variación de la altura de la antena debida a los movimientos del barco (balanceo-cabeceo), la frecuencia correspondiente a la densidad espectral de potencia de -10 dB respecto a la parte plana del espectro de potencia (denominada en adelante anchura espectral a -10 dB) varía entre 0,3 Hz y 5 Hz cuando la altura significativa de las olas está comprendida entre 0,5 m y 5 m, el ángulo de elevación varía de 5° a 10° y la velocidad del barco es inferior a 30 nudos.

En la Figura 3 se representa la franja probable de anchura de banda espectral de -10 dB para un desvanecimiento por trayectos múltiples a 1,5/1,6 GHz, obtenida a partir del modelo del desvanecimiento teórico (véase el Informe 884) en función del ángulo de elevación, en condiciones habituales en las comunicaciones marítimas por satélite, a saber: altura de las olas, 1-5m; velocidad de crucero, 0-20 nudos; balanceo/cabeceo, 0-30°.

La pauta de errores generada por el desvanecimiento por trayectos múltiples en los sistemas de transmisión digitales suele ser de tipo ráfaga. Por esa razón, es necesario comprender a fondo las estadísticas de duración de los desvanecimientos de tipo ráfaga para poder aplicar el entrelazado de datos junto con la corrección de errores hacia adelante, a fin de lograr una mejora considerable en el comportamiento de errores de bit. A partir del espectro de desvanecimiento pueden calcularse los valores medios de duración ($\langle T_D \rangle$) y del intervalo de sucesos ($\langle T_I \rangle$), definidos en la Figura 4. En el Informe 884 se expone un método sencillo de predicción de los valores medios a partir de la anchura de banda espectral de -10 dB.

Los valores predichos de $\langle T_D \rangle$ y $\langle T_I \rangle$ para el 99% del tiempo, a ángulos de elevación comprendidos entre 5° y 10°, son de 0,05 a 0,4 segundos para T_D y de 5 a 40 segundos para $\langle T_I \rangle$. La función de densidad de probabilidad de $\langle T_D \rangle$ y $\langle T_I \rangle$ para cualquier porcentaje de tiempo comprendido entre el 50% y el 99% se aproxima a una distribución exponencial.

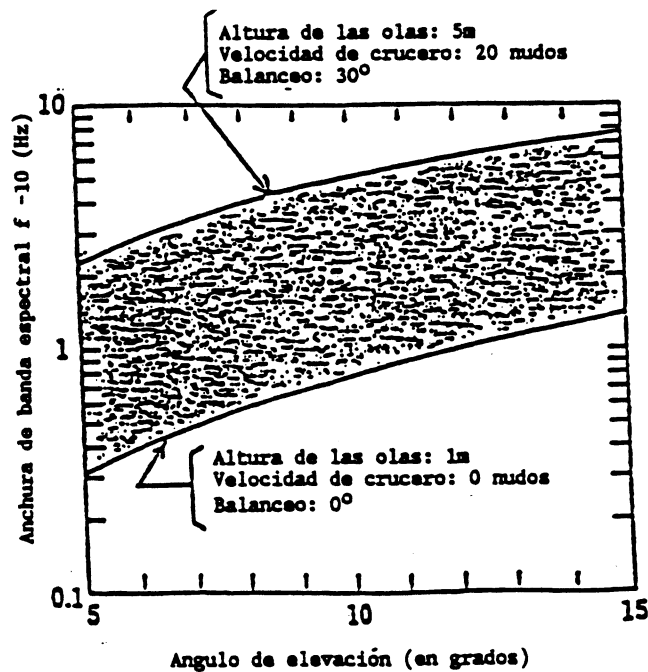


FIGURA 3

Anchura de banda espectral de -10 dB para un desvanecimiento por trayectos múltiples a 1.5 GHz causado por reflexión de la superficie del mar, en función del ángulo de elevación

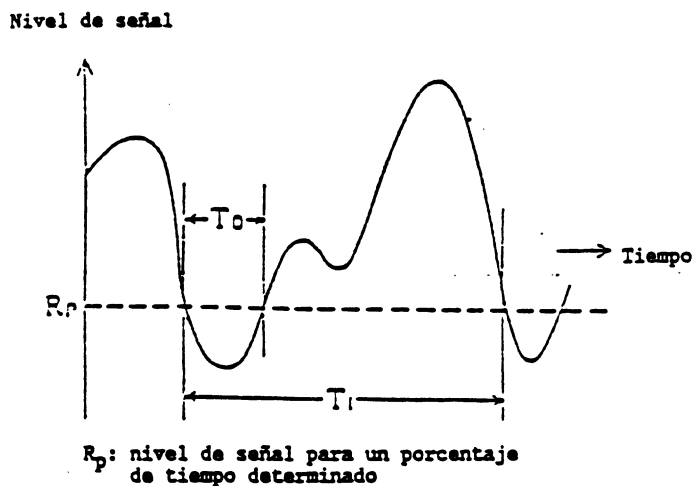


FIGURA 4

Duración del desvanecimiento e intervalo de sucesos de desvanecimiento

3. Resumen de las estadísticas de los desvanecimientos debidos a trayectos múltiples

El cuadro I muestra un resumen de las estimaciones teóricas y de los resultados de las mediciones de la profundidad del desvanecimiento contenidos en este Informe. El cuadro muestra también algunos resultados de mediciones realizadas mediante una estación terrena de barco experimental con una relación G/T baja (véase anexo II al Informe 921).

Los valores que se muestran en el cuadro I indican que los resultados experimentales corroboran bien el modelo teórico.

CUADRO I - Valores estadísticos de desvanecimiento por trayectos múltiples teóricos y medidos para el 99% del tiempo

Ganancia de antena (dB)	Ángulo de elevación (grados)	Fuerza del viento (nudos)	Altura de las olas (m)	Profundidad de desvanecimiento (dB)		Notas de referencia
				Valor teórico	Valor medido	
0	6		0,5	5,0 ⁽⁹⁾	6,9	(8)
0	6		0,5	12,2 ⁽¹⁰⁾	12,8	(8)
3	4 8 19	35 27 20			12 13 10,5	(1)
5	4 8 19	35 27 20			14 14 8	(1)
11	4 8 19	35 27 20			11 10 6,5	(1)
14	5		1,5-3,2	7-9		(2) (3)
14	5		1,5-3		6-10	(4)
15	5		1-4		7-10	(5)
13	4		4,5		7,2	(6)
14	10		1,5-3	4,5-5		(2) (3)
15	10		0,5-3		4-5	(5)
13	10		3,5		6,2	(6)
20	5		1,6-3,2	5-7		(2)
20	5		3		4,8	(7)
24	5		1,6-3,2	2,5-4		(2) (3)
24	5		1,6-3,2		1,5-3	(4)
20	10		1,6-3,2	1,5-2		(2)
20	10		3		2,8	(7)
24	10		1,6-3,2	1		(2) (3)

(1) [Hagenauer y otros, 1984]; Informe 921, Anexo II.

(2) Fig. 4 del Informe 884.

(3) Fig. 2 del Informe 763.

(4) [Ohmori y otros, 1985].

(5) [Karasawa y otros, 1986].

(6) Fig. 11 del Informe 762.

(7) Informe 763-2 [1986], Cuadro V.

(8) [Higuchi y Shinohara, 1988].

(9) Fijo para una posición media del diagrama de altura de antena.

(10) Fijo para una posición mínima del diagrama de altura de antena.

En el Cuadro II figura un resumen de los datos sobre estadísticas de la duración de los desvanecimientos.

CUADRO II

Estadísticas de la duración de los desvanecimientos

a) Parámetros de medición

Número de datos	Ganancia de la antena (dBi)	Angulo de elevación (grados)	Fuerza del viento (nudos)	Altura de las olas (m)	Velocidad del barco (nudos)	Balaceo/cabeceo (grados)	Notas de referencia
1	15.5	5		0.5	11	1	(1)
2	15.5	10		3.0	11	5	(1)

¹ [Karasawa y Shiokawa, 1987]

b) Datos medidos

Número de datos	Nivel de umbral		T _D (segundos)		T _I (segundos)	
	Proposición de tiempo (%)	Profundidad de desvanecimiento (dB)	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica
1	50	0	1.29	1.53	2.56	2.16
	90	4.0	0.55	0.54	5.61	5.41
	99	9.3	0.30	0.24	29.0	28.5
2	50	0	0.26	0.32	0.52	0.47
	90	2.0	0.13	0.13	1.29	1.61
	99	4.0	0.078	0.072	7.29	10.8

4. Predicción de la influencia de la superestructura del barco

4.1 Reflexiones en la superestructura del barco

Las reflexiones en la superestructura del barco, que son casi siempre coherentes con la señal directa, causarán un desvanecimiento en la señal recibida.

La profundidad de desvanecimiento depende de distintos parámetros:

- forma del barco,
- ubicación de la antena del barco,
- directividad de la antena y nivel de lóbulos laterales,
- relación axial y orientación de la elipse de polarización tanto de la antena del satélite como de la antena del barco,
- ángulos de elevación y de acimut.

Se escogió un petrolero de unas 230 000 toneladas de peso muerto (fig. 5) como muestra para una predicción por ordenador de las reflexiones en el barco. Se consideraba que este tipo de barco produciría intensas reflexiones debido al gran espacio abierto de la cubierta frente a la antena. La superficie reflectora de la cubierta del barco estaba simulada como una serie de elementos de superficie plana de conductividad infinita. Se suponía que la relación axial de la antena del barco era de 1 dB y que la de la antena del satélite era de 2 dB.

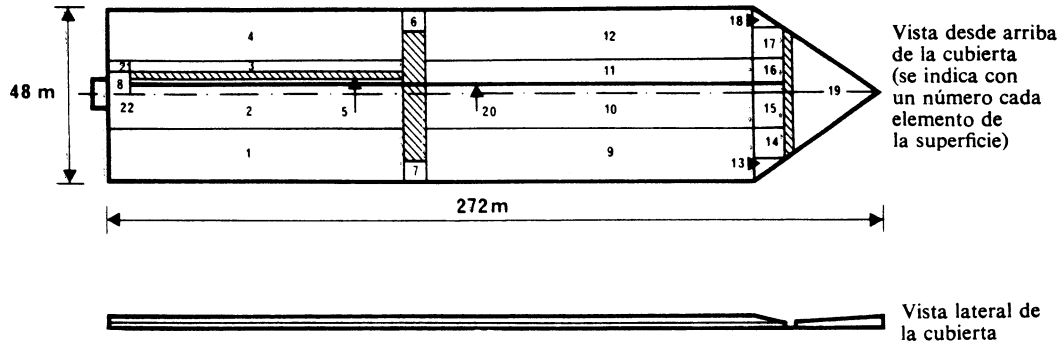


FIGURA 5 - Diagrama del petrolero empleado para la simulación de reflexiones en la superestructura del barco

En la fig. 6 , se representan los niveles de la señal predichos por el ordenador, en función del ángulo de elevación, para dos valores supuestos de directividad de la antena: 20 dB y 24 dB. Se indican los efectos de un error de puntería de la antena correspondiente a una pérdida de 1 dB. Los correspondientes errores del ángulo de puntería son: $-5,4^\circ$ en elevación para la antena de 20 dB y $-3,4^\circ$ para la antena de 24 dB.

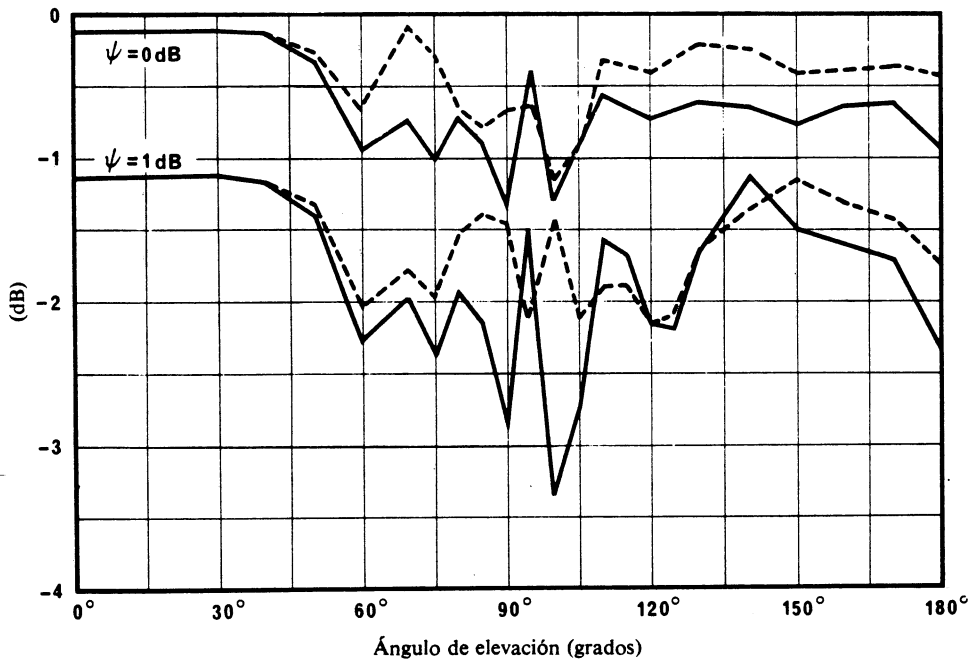


FIGURA 6 - Profundidad del desvanecimiento en función del ángulo de elevación en el caso de un petrolero de 230 000 toneladas de peso muerto (ψ = pérdida por error de puntería)

- Directividad 20 dB
- - - - - Directividad 24 dB

Las variaciones para ángulos de elevación de 9° a 11° obedecen a interferencias entre reflexiones provenientes de las diversas partes de la cubierta.

Para este ejemplo particular, el efecto previsto de los trayectos múltiples debidos a la superestructura de un barco:

- se anula cuando el rumbo del barco se desvía más de 14° de la dirección del satélite,
- se modifica en menos de 1 dB cuando varía la altura de la antena con relación a la cubierta.

4.2 Bloqueo producido por la superestructura del barco

El bloqueo se produce por superestructuras del barco tales como el mástil y diversos tipos de antenas: su geometría se representa en la fig. 7. La atenuación debida al bloqueo depende de diversos parámetros tales como el diámetro de la columna, la distancia entre la antena y la columna y el tamaño de la antena. Basándose en resultados experimentales comunicados hasta ahora se obtiene la atenuación debida al bloqueo producido por una estructura de tipo columna.

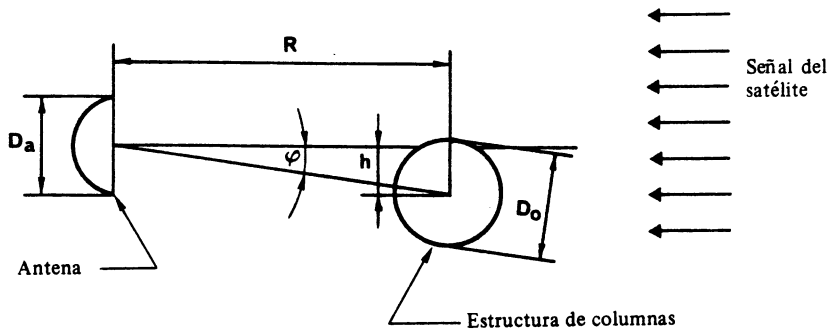


FIGURA 7 - Geometría del bloqueo

En la fig. 8 se dan valores estimados de atenuaciones debidas al bloqueo producido por una estructura tipo columna para las antenas de 20 y 14 dB de ganancia.

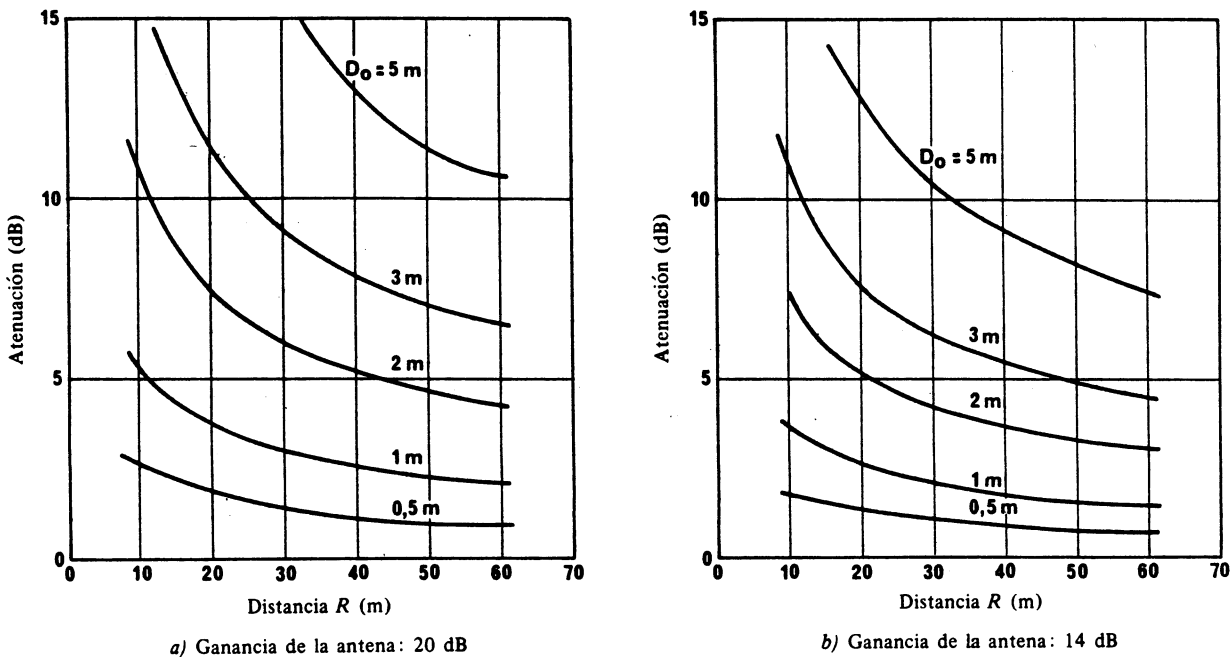


FIGURA 8 - Valor estimado de la atenuación debida al bloqueo

La Figura 9 muestra los efectos de bloqueo causados por una estructura de tipo columna cercana a una antena de reducida ganancia.

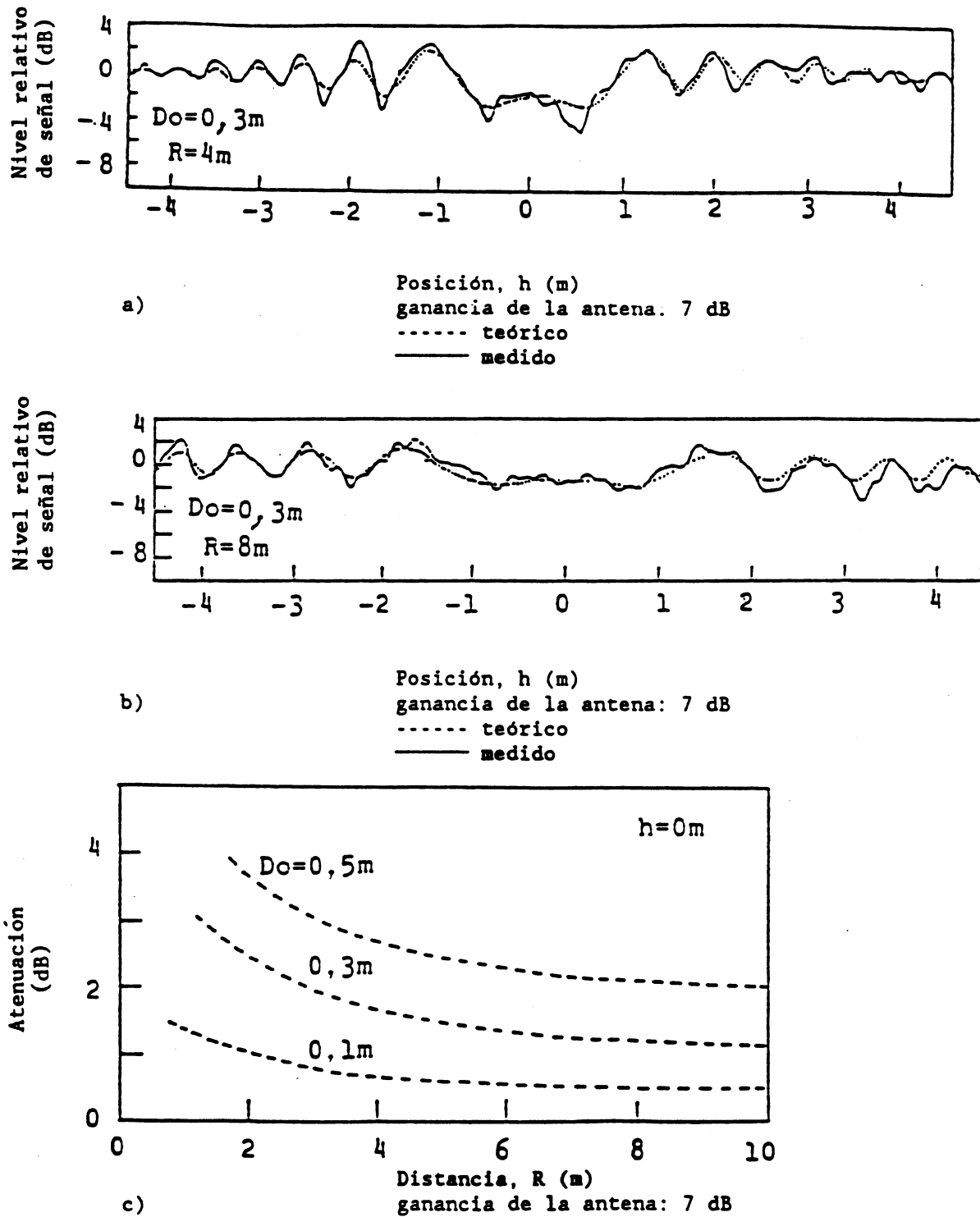


FIGURA 9

Efectos de bloqueo debidos a una estructura de tipo columna cercana a una antena de reducida ganancia

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos con el modelo teórico indicado en el § 2 permiten prever el desvanecimiento causado por la propagación por trayectos múltiples para una amplia gama de valores de los parámetros. Se ha demostrado que el desvanecimiento debido a la componente coherente, es decir el desvanecimiento por diagrama de altura, disminuye continuamente cuando aumenta la altura de las olas, mientras que el desvanecimiento debido a la componente incoherente aumenta gradualmente con la altura de las olas hasta alcanzar un máximo para una altura de olas de 1,6 m aproximadamente. La profundidad del desvanecimiento aumenta generalmente al disminuir el ángulo de elevación y la ganancia de la antena.

Con bajos ángulos de elevación predomina la componente coherente (especular) de la reflexión, mientras que con ángulos de elevación mayores predomina la componente incoherente (difusa).

Los resultados experimentales descritos anteriormente muestran que el efecto de los trayectos múltiples aumenta cuando disminuyen el ángulo de elevación del satélite y la ganancia de la antena. La máxima profundidad del desvanecimiento que contiene componentes coherentes e incoherentes se produce para una altura de olas de 1,6 m, aproximadamente, y la dependencia de la profundidad del desvanecimiento con la altura de las olas es pequeña para alturas comprendidas entre 0,8 y 3,2 m.

Las mediciones experimentales de profundidad de desvanecimiento difieren normalmente en menos de 1 dB de las estimaciones teóricas. Por lo tanto, puede concluirse que el modelo teórico está bien comprobado por los resultados de las mediciones.

Se han estudiado las reflexiones en la superestructura de un gran petrolero. Los resultados indican que cabe esperar desvanecimientos del orden de 1 dB con ganancias de antena comprendidas entre 20 y 24 dB, suponiendo que sean pequeños los errores de puntería y que la antena está orientada en la dirección de proa a popa del barco. Se ha estudiado también el bloqueo debido a la superestructura del barco. Se representan las atenuaciones debidas al bloqueo por estructura de tipo columna en función de la distancia, diámetro de la columna y tamaño de la antena.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HAGENAUER, J., DOLAINSKY, ETBAUER, GRÄBEL, LOTZ, PAPKE, W., PLÖCHINGER y SCHWEIKERT, R. [noviembre de 1984] Multipath fading effects and data transmission for small ship earth stations (Standard C). DFVLR Final Report, 223 páginas (en alemán). DFVLR, D-8031 Oberpfaffenhofen, Alemania (República Federal de). Preparado por ESA/ESTEC Contrato N.º 5323/82/NL/JS.
- HIGUCHI, T. y SHINOHARA, T. [1988] Experiment of INMARSAT Standard-C system, Fourth Int. Conf. Sat. Sys. for Mobile Comm. and Nav., IEE Conf. pub. no.294.
- KARASAWA, Y., YASUNAGA, M., NOMOTO, S. y SHIOKAWA, T. [1986] On-board experiments on L-band multipath fading and its reduction by use of the polarization shaping method, Trans. IEICE of Japan, vol. E69, no. 2, pp. 124-131.
- KARASAWA, Y. y SHIOKAWA, T. [1987] Fade duration statistics of L-band multipath fading due to sea surface reflection, IEEE, Trans. Ant. Prop., vol. AP-35, no. 8, pp. 956-961.
- OHMORI, S., IRIMATA, A., MORIKAWA, H., KONDO, K., HASE, Y. y MIURA, S. [agosto de 1985] Characteristics of sea reflection fading in maritime satellite communications. IEEE Trans. Ant. Prop., Vol. AP-33, 8, 838-845.

BIBLIOGRAFÍA

- BEARD, C. I., KATZ, I. y SPETNER, L. M. [abril de 1956] Phenomenological vector model of microwave reflection from the ocean. IRE Trans. Ant. Prop., Vol. AP-4, 2, 162-167.
- BECKMANN, P. y SPIZZICHINO, A. [1963] *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*. Pergamon Press.
- HOGBEN, N. y LUMB, F. E., *Ocean Wave Statistics etc.* Her Majesty's Stationery Office, Reino Unido.
- KARASAWA, Y. y SHIOKAWA, T. [1984a] Characteristics of L-band multipath fading due to sea surface reflection. IEEE Trans. Ant. Prop., Vol. AP-32, 6, 618-623.
- KARASAWA, Y. y SHIOKAWA, T. [1984b] Spectrum of L-band multipath fading due to sea surface reflection. Trans. Inst. Electron. Comm. Engrs. Japan, Vol. J67-B, 2, 171-178.
- SHIOKAWA, T. y KARASAWA, Y. [1982] Shipborne antennas suppressing multipath fading in maritime satellite communications. IEEE Trans. Ant. Prop., Vol. AP-S, New Mexico, Estados Unidos de América.
- TSUJIMURA, K. y otros [1979] Experiment of blocking effect in maritime satellite communication. JRC Tech. Rep., 13.
- YOSHIKAWA, M. y otros [1979] Experimental results of propagation over sea at high elevation angles. Paper on Tech. Group AP 79-89, Institute of Electronics and Communication Engineers of Japan, Tokyo.

Documentos del CCIR

Informe 884.