

INFORME 762-2

**INFLUENCIA DE LOS TRAYECTOS MÚLTIPLES EN LA TRANSMISIÓN DIGITAL
POR ENLACES DEL SERVICIO MÓVIL MARÍTIMO POR SATÉLITE**

(Programa de Estudios 17A/8)

(1978-1982-1986)

1. Introducción

Se han efectuado análisis teóricos y evaluaciones experimentales de los efectos de la propagación por trayectos múltiples en la transmisión digital.

Los análisis teóricos realizados en el Japón se han traducido en la predicción del comportamiento en términos de la proporción de errores para las modulaciones MDP-2 Φ coherente y MDF de dos frecuencias no coherente.

Los análisis teóricos llevados a cabo en los Estados Unidos de América indican la proporción de errores para la modulación por desplazamiento de fase (MDP) coherente con codificación diferencial; los resultados de los experimentos norteamericanos con el satélite ATS-6 determinan la gama de valores de trayectos múltiples utilizados en el modelo teórico. La proporción de errores calculada se compara con las mediciones efectuadas utilizando un simulador de canal en laboratorio.

Las pruebas efectuadas en 1975 en Francia mediante el satélite ATS-6 han permitido obtener las curvas de la proporción de errores en los elementos binarios en transmisión digital MDP de dos niveles para diversos ángulos de elevación del satélite.

En pruebas llevadas a cabo por la República Federal de Alemania en 1979 con el radiofaro de seguimiento de Marisat, se registró a bordo de un barco, para varias antenas receptoras y ángulos de elevación, la respuesta de amplitud y fase de la señal propagada por trayectos múltiples en el sentido satélite-barco. Los registros se utilizaron para controlar un simulador de canal en laboratorio (principio del canal registrado) para determinar el margen de desvanecimiento en varios métodos de transmisión de datos. La amplitud se evaluó estadísticamente, y se comparó con los modelos teóricos.

2. Análisis teórico

2.1 Distribución de Rice-Nakagami o distribución m

2.1.1 Consideraciones generales

Este trabajo supone que la distribución de amplitud de la señal reflejada en el mar obedece a una función de distribución m y deriva la distribución de probabilidad de la amplitud del desvanecimiento resultante [Nakagami, 1960]; esta distribución se conoce también como distribución de Rice-Nakagami y por lo general basta para describir la mayoría de los fenómenos de desvanecimiento, incluidos los que responden a la distribución de Rayleigh.

En la fig. 1 se muestra un ejemplo de la distribución m , utilizando « m » como parámetro. Debe observarse que esta figura representa un desvanecimiento gaussiano unilateral cuando $m = \frac{1}{2}$ y el desvanecimiento de Rayleigh cuando $m = 1$, donde m es la inversa de la varianza normalizada del cuadrado de la señal reflejada.

2.1.2 Probabilidad de error

Se ha derivado también la probabilidad de error, p ($\rho, C/M, m$), correspondiente a la distribución de Rice-Nakagami [Mizuno y otros, 1975], en los casos de la señal MDP de dos niveles coherente y de la señal MDF de dos frecuencias no coherente. En esta notación ρ es la relación «energía por bit / densidad de potencia de ruido» (E/N_0) en el demodulador, y C/M es la relación potencia de la señal directa/potencia de la señal de trayecto múltiple.

2.1.3 Resultados de los cálculos

Las figs. 2 a 4 ilustran las características de la proporción de bits erróneos calculada utilizando los métodos analíticos mencionados anteriormente.

La fig. 5 indica cómo varía la relación potencia de la señal directa/potencia de la señal por trayecto múltiple en función del valor equivalente de degradación de la relación de potencia de la portadora/potencia de ruido. El valor equivalente de degradación es la diferencia entre el valor de E/N_0 que se necesita para lograr una proporción de bits erróneos de 10^{-5} en presencia de ruido térmico, en el caso de señales reflejadas en el mar, y el que se necesita para obtener la misma proporción de errores en ausencia de señales reflejadas. Es decir, corresponde al margen de desvanecimiento que se ha de asignar, habida cuenta de la interferencia por trayectos múltiples, para las modulaciones determinadas que se examinan.

De la fig. 5 puede inferirse lo siguiente:

- Cuando C/M es constante, la degradación debida al efecto de los trayectos múltiples aumenta conforme m disminuye.
- Cuando el desvanecimiento es profundo o m es inferior a la unidad el valor equivalente de degradación de E/N_0 para la señal MDF de dos niveles coherente es mayor que para la señal MDF de dos frecuencias no coherente.
- Para un valor de m dado, el margen necesario para obtener una proporción de bits erróneos (BER) de 10^{-5} representada en la fig. 5 como degradación de E/N_0 aumenta conforme C/M disminuye. Para un valor de C/M de 12 dB y para $m = 1/2$, que corresponde a un proceso de dispersión de distribución gaussiana para la propagación por trayectos múltiples, la potencia de la señal debe aumentarse en unos 11 dB para obtener en un receptor MDF de dos niveles coherente la misma proporción de bits erróneos que se logra contando únicamente con el ruido térmico. Cabe observar también que una pequeña disminución en la relación señal directa/señal de trayectos múltiples, C/M , provoca un gran incremento en el margen necesario.

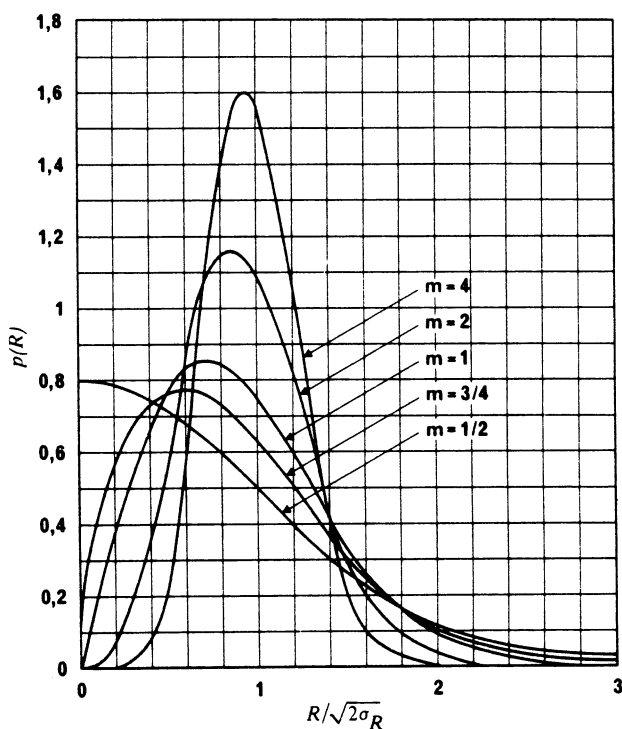


FIGURA 1 — Distribución m

R : Amplitud de la señal reflejada
 σ_R : Valor eficaz de la señal reflejada (R)

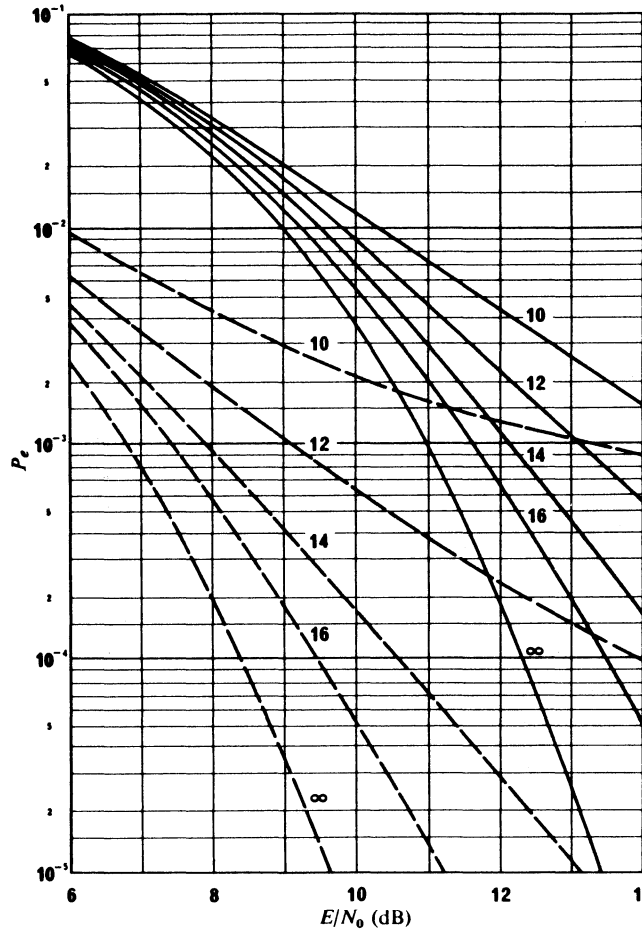


FIGURA 2 — Probabilidad de error para la señal MDP de 2 niveles coherente y para la señal MDF de 2 niveles no coherente ($m = \frac{1}{2}$)
(El parámetro es C/M , en dB)

----- MDP2FC
 ———— MDF2NC

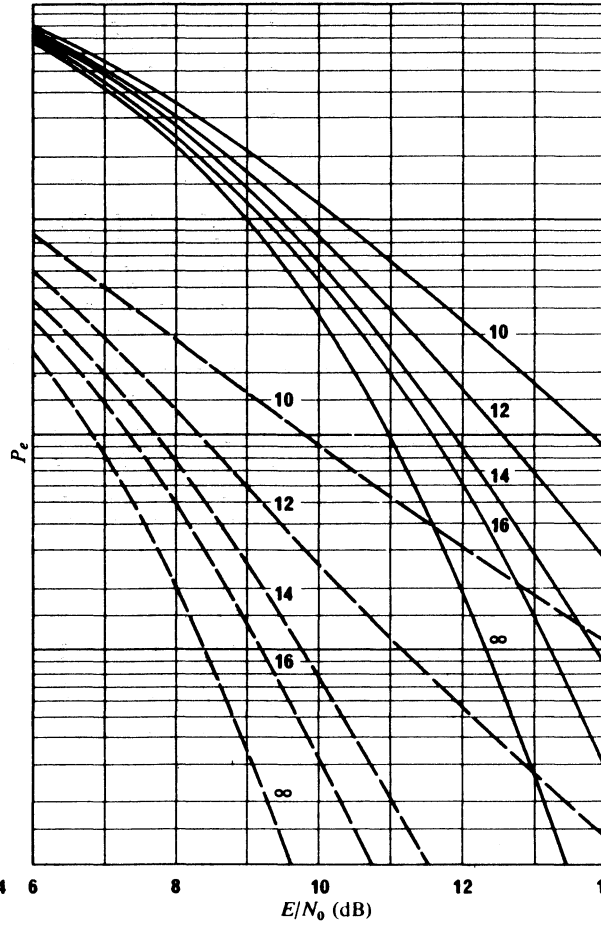


FIGURA 3 — Probabilidad de error para la señal MDP de 2 niveles coherente y para la señal MDF de 2 niveles no coherente ($m = 1$)
(El parámetro es C/M , en dB)

----- MDP2FC
 ———— MDF2NC

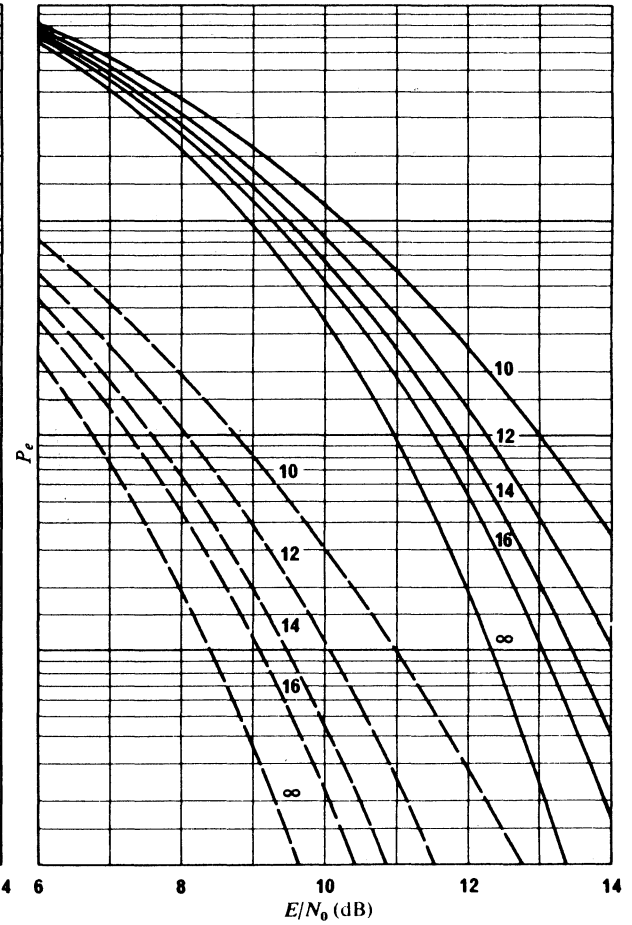


FIGURA 4 — Probabilidad de error para la señal MDP de 2 niveles coherente y para la señal MDF de 2 niveles no coherente ($m = 4$)
(El parámetro es C/M , en dB)

----- MDP2FC
 ———— MDF2NC

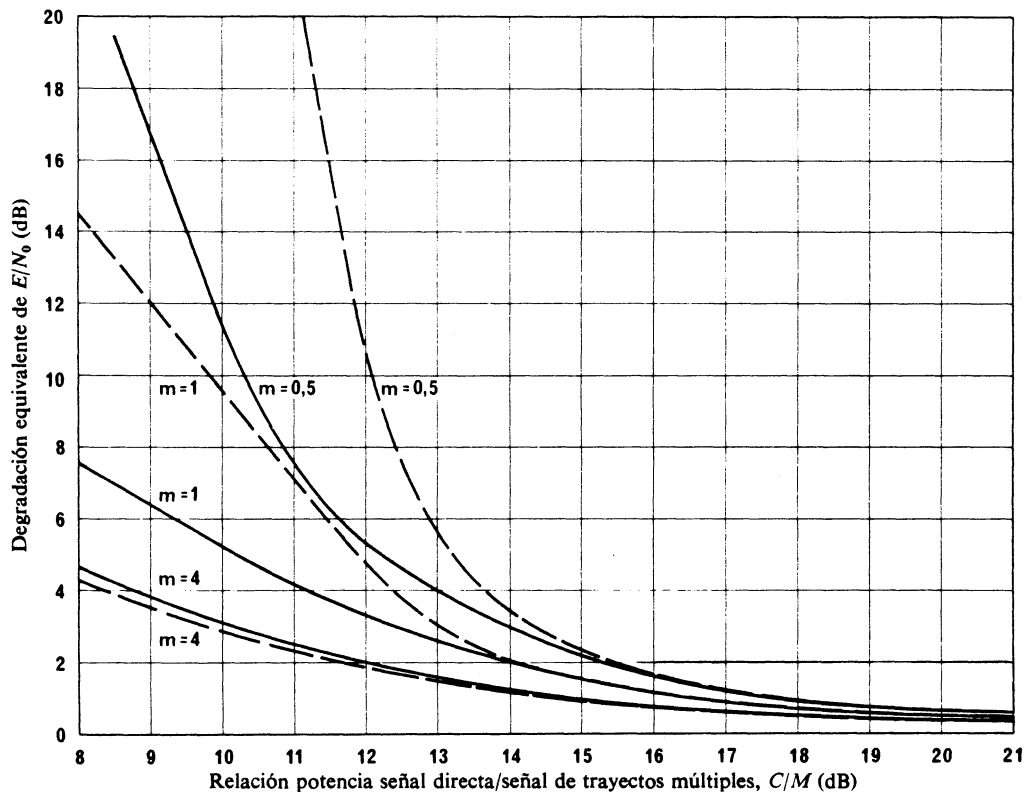


FIGURA 5 — Degradación equivalente de E/N_0
($BER = 10^{-5}$)

--- MDP2ΦC
— MDF2NC

2.2 *Análisis de Modestino-Mui*

2.2.1 *Consideraciones generales*

Es posible establecer un modelo para el canal del servicio móvil marítimo por satélite, tal como se muestra en la fig. 6. Ese modelo se basa en estudios analíticos anteriores [Salwen, 1972].

El modelo de canal de la fig. 6 puede comprender reflexiones por trayectos múltiples, tanto especulares como difusas. A medida que los trayectos múltiples adquieren un carácter más especular, la potencia media cuadrática de trayectos múltiples (M) tiende a aumentar, mientras que las anchuras de banda de los componentes en fase y en cuadratura de la envolvente compleja que caracterizan la envolvente de trayectos múltiples tienden a cero.

Los datos recogidos durante las pruebas con el satélite ATS-6 del servicio móvil marítimo apoyan la conclusión de que el trayecto múltiple reflejado es difuso. Se encontró, en particular, que la energía de trayectos múltiples procede de una amplia región de la superficie del océano y no desde el punto de reflexión especular del trayecto múltiple.

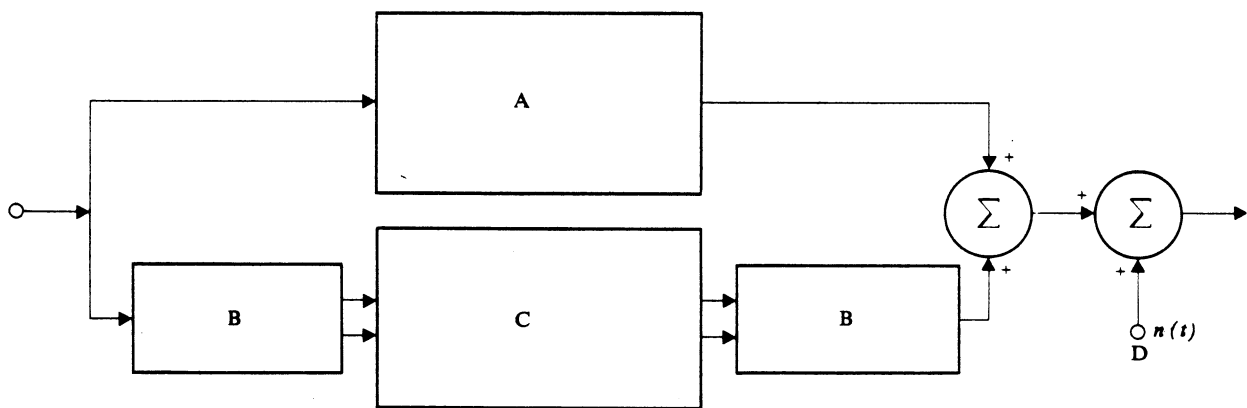


FIGURA 6 — Modelo de canal característico de un enlace satélite-barco

- A: Trayecto directo (factor complejo de ganancia constante)
- B: Híbrido quadri-helicoidal
- C: Trayectos múltiples (factor complejo de ganancia variable en función del tiempo)
- D: Ruido

2.2.2 Probabilidad de error

La probabilidad de bits erróneos en el caso de un sistema MDP coherente en que hay un error de seguimiento de la portadora que varía lentamente, y una amplitud de desvanecimiento lenta, (el desvanecimiento es lento comparado con el régimen binario), viene dada por [Modestino y Mui, 1976] para el caso de MDP de dos niveles coherente. Sus resultados se aplican al caso de la MDPCCD teniendo en cuenta que para esta modulación, la probabilidad de bits erróneos es, aproximadamente, $2P_b$ cuando $P_b \ll 1$.

2.2.3 Resultados de los cálculos

La fig. 7 muestra el valor esperado de la probabilidad de bits erróneos para la MDPCCD en función de C/N_0 y C/M que se obtiene por solución numérica por ordenador de la expresión teórica [Modestino y Mui, 1976]. Las curvas de la fig. 7 suponen una relación señal/ruido de 15 dB en el bucle de seguimiento de la portadora. Para ese nivel los errores de seguimiento de la portadora influyen muy poco en la probabilidad de bits erróneos.

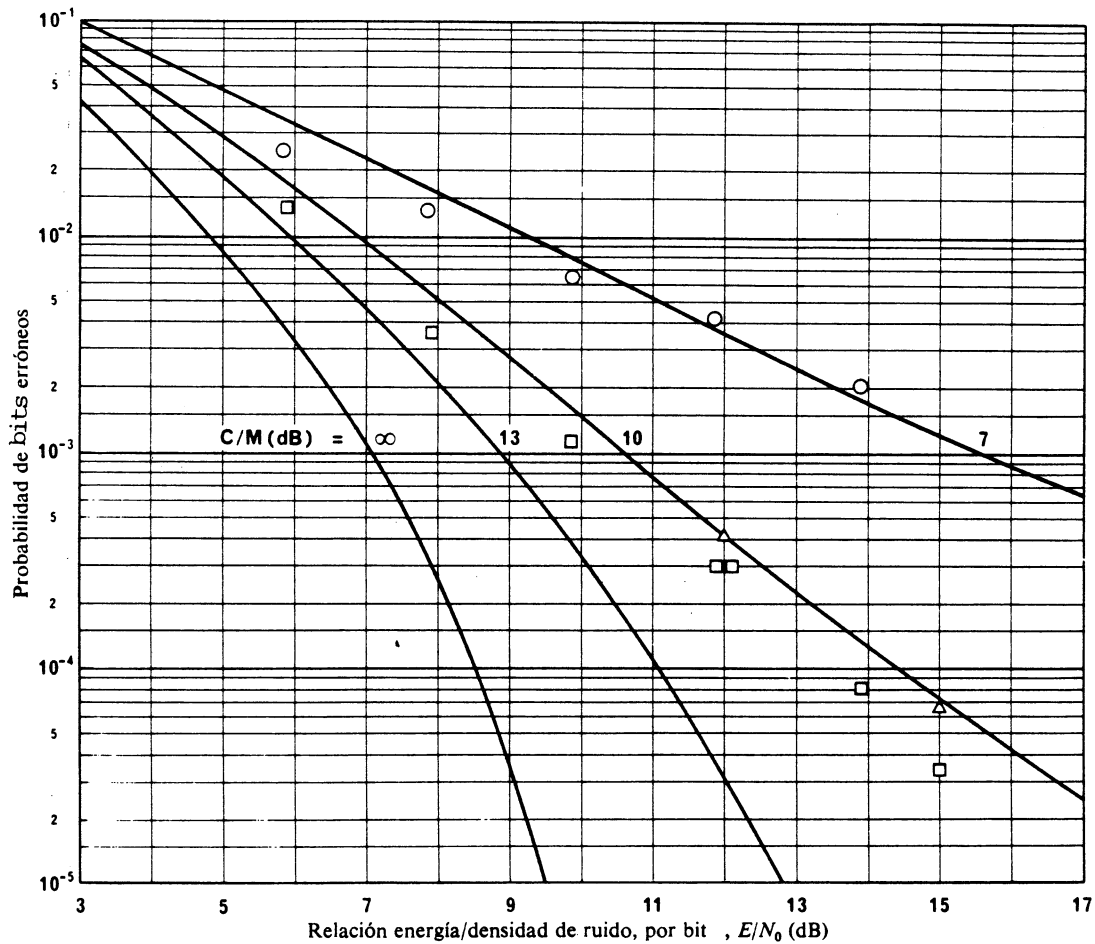


FIGURA 7 — Calidad de funcionamiento de un módem de MDPCCD a 1200 bit/s en presencia de trayectos múltiples, obtenida con simulador

Notas:

- Las curvas de trazo continuo representan los resultados teóricos con una dispersión por efecto Doppler (velocidad de desvanecimiento) muy inferior a la velocidad de bits.
- Datos del simulador: \circ $C/M = 8$ dB
 \triangle $C/M = 10$ dB
 \square $C/M = 11$ dB

3. Resultados experimentales

3.1 Pruebas realizadas en los Estados Unidos de América con el ATS-6 y con un simulador de canal

3.1.1 Pruebas realizadas en los Estados Unidos de América con el ATS-6

La fig. 8 muestra la potencia de la señal de trayectos múltiples observada, con respecto a la potencia en la señal de trayecto directo para los datos recogidos durante las pruebas con el satélite ATS-6. La potencia relativa de trayectos múltiples oscila entre 5,7 dB y 8,8 dB. Estos valores excluyen los efectos de discriminación de la antena, pero incluyen en cambio los efectos de discriminación de polarización. Los valores reales observados de la relación C/M incluido el factor de directividad de la antena, fueron típicamente mayores o iguales a 10 dB. No obstante, en algunos casos se midieron relaciones C/M de sólo 6 dB [Engels y otros, 1976].

En el cuadro I se resumen los datos promediados relativos a los trayectos múltiples, recogidos con ángulos de elevación bajos, durante las pruebas con el satélite ATS-6 del servicio móvil marítimo. La antena del barco tiene una abertura angular de 35° .

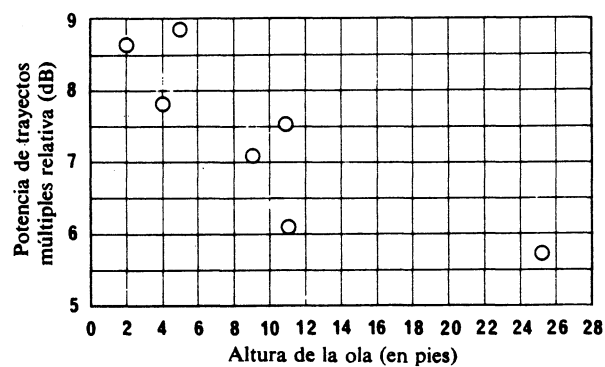


FIGURA 8 — Dependencia de la potencia de trayectos múltiples respecto de la altura de las olas sobre la superficie del mar

CUADRO I — Datos relativos a los trayectos múltiples recopilados con el satélite ATS-6

Ángulo de elevación del satélite ($^\circ$)	Estado del mar (de cresta a cresta) (m)	Fecha	C/M (dB)	Anchura de banda de -20 dB (Hz)
8,2	2,4-3	13 de noviembre de 1974	10,02	4,5
8,3	7,5	14 de noviembre de 1974	8,65	5,35
8,4	3,0-3,6	15 de noviembre de 1974	9,1	4,55
16,9	1,2	19 de noviembre de 1974	14,2	5,5
16,9	3,3	20 de noviembre de 1974	14,76	3,75
17,0	1,5	21 de noviembre de 1974	16,2	4,47
17,0	0,6	31 de marzo de 1975	15,65	3,35

3.1.2 Pruebas realizadas en los Estados Unidos de América con simulador de canal

Los análisis mencionados en el punto 2.2 se realizaron experimentalmente utilizando un módem de MDPCCD y un simulador de canal en laboratorio; los resultados obtenidos están superpuestos a los resultados teóricos de la fig. 7 [Salwen y Duncombe, 1975; Salwen, 1975]. Hay estrecha concordancia entre los datos teóricos y experimentales. Los resultados experimentales de la fig. 7 se refieren al mejor módem ensayado en un amplio programa de pruebas de laboratorio [Salwen y Duncombe, 1975]. La calidad de los demás módems de MDPCCD ensayados fue considerablemente inferior en condiciones simuladas de trayectos múltiples.

Es posible deducir los márgenes necesarios para alcanzar una proporción de errores de 10^{-5} en un módem de MDPCCD basándose en los resultados que aparecen en la fig. 8. Esos márgenes se muestran en el cuadro II.

CUADRO II – Márgenes C/N_0

C/M (dB)	Margen (dB) para $P_e = 10^{-4}$	Margen (dB) para $P_e = 10^{-5}$
13	2,5	3,2
11	5,3	7,4
10	5,5	9
8	–	30 (estimado)

En las condiciones más favorables, un margen de 5 dB produjo una proporción de errores de 10^{-5} cuando la relación C/M era de 12 dB. No obstante, en la mayor parte de los casos se requerirá un margen mayor a fin de tener en cuenta otros factores de degradación de calidad, como por ejemplo:

- los errores de orientación de la antena;
- las pérdidas ionosféricas;
- las pérdidas atmosféricas; y
- la degradación de la calidad del módem (en presencia de trayectos múltiples).

3.2 Pruebas realizadas en Francia con el satélite ATS-6

3.2.1 Tipo de transmisión

Se recibió a bordo de un buque situado en aguas de las Azores un canal digital MDP de 2 niveles de 19,2 kbit/s transmitido por medio del satélite ATS-6. Se comparó una secuencia pseudoaleatoria transmitida por este canal con una secuencia no perturbada, a fin de determinar la proporción de bits erróneos.

3.2.2 Antena utilizada en el barco

Se empleó una antena cuadrilicoidal con una ganancia máxima de unos 20 dB y una abertura angular a potencia mitad de 14° . La antena tenía una altura sobre el mar de unos 20 m. Mediante una referencia vertical y el girocompás del barco se consigue en la antena una estabilidad de $\pm 1^\circ$.

3.2.3 Estados del mar

Las mediciones se efectuaron en estado de mar agitada correspondiente a una altura de las olas de cresta a cresta de unos 3 m.

3.2.4 Resultados obtenidos

La fig. 9 muestra las curvas de la proporción de bits erróneos en función de la relación entre la energía por bit y la densidad de ruido (E/N_0), expresada en dB, para ángulos de elevación de 5° , 10° , 15° y 20° . Muestra también la curva teórica del comportamiento en presencia de ruido térmico, únicamente.

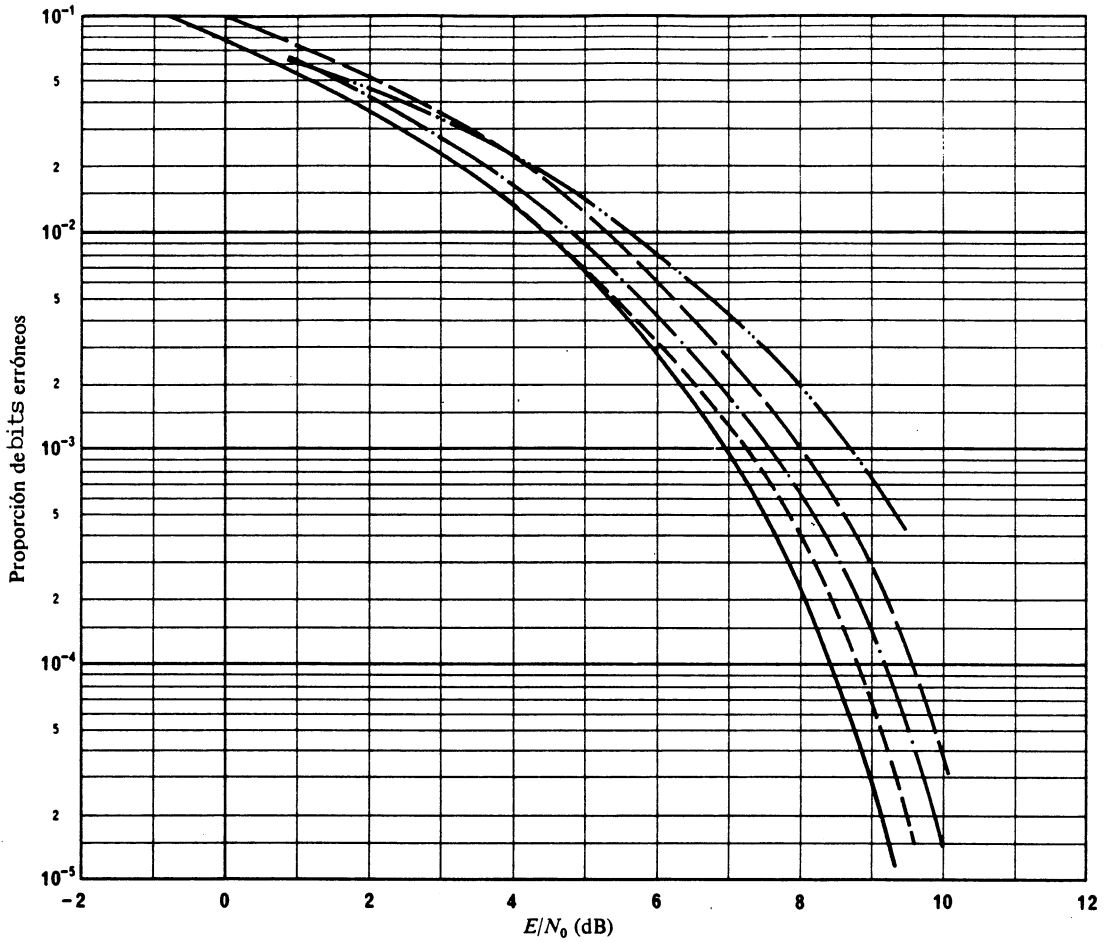


FIGURA 9 — Influencia del ángulo de elevación sobre la proporción de errores

- | | | | |
|--------------------------|---|-----------|----------------------------|
| Curvas
experimentales | { | ————— | Curva teórica |
| | | — · — · — | Ángulo de elevación de 5° |
| | | — — — — | Ángulo de elevación de 10° |
| | | — · — · — | Ángulo de elevación de 15° |
| | | — — — — | Ángulo de elevación de 20° |

3.2.5 Comparación entre los resultados teóricos y los experimentales

Para comparar directamente los resultados experimentales y los teóricos es preciso conocer la distribución m y la relación entre la señal directa y la señal por trayectos múltiples.

Para los parámetros que figuran en el ejemplo del punto 2.1, resulta necesario un valor teórico de 11 dB, partiendo de la base de ausencia de discriminación en la antena. Para una elevación del satélite de 5°, las señales directa y reflejada incidirán dentro del haz principal de la antena de gran ganancia utilizada en la experiencia. Extrapolando la curva de 5° de la fig. 9, la degradación medida de E/N_0 para un PBE de 10^{-5} es de 2,5 dB aproximadamente.

Este valor reducido deriva probablemente de una discriminación substancial en el caso de la señal por trayectos múltiples, además de la ya proporcionada por la antena. Las hipótesis formuladas anteriormente sobre los valores reales de m y C/M deben confirmarse con pruebas ulteriores.

3.3 Pruebas realizadas por la República Federal de Alemania con el sistema MARECS y método del canal registrado

3.3.1 Descripción del método de canal registrado

La comunicación desde y hacia los barcos a través de satélites geostacionarios se complica debido a la propagación por trayectos múltiples en la superficie del mar y a los requisitos de seguimiento de la antena. En el caso de las antenas relativamente grandes utilizadas hasta el presente, el desvanecimiento con ángulos de elevación superiores a 5° causó muy poca degradación. Debido a su amplia abertura angular, las antenas más pequeñas no necesitan un seguimiento preciso, pero causan mayor degradación. Se dispone de poca información acerca de la degradación de la calidad de transmisión que cabe esperar de la propagación por trayectos múltiples. Puesto que es muy difícil reproducir el desvanecimiento en condiciones reales, se empleó el método del canal registrado. Durante pruebas en condiciones reales se registró a bordo del barco y evaluó en laboratorio la respuesta de amplitud y fase de la señal. La configuración del canal es la que aparece en la fig. 10. También se determinaron en laboratorio las correlaciones entre los parámetros del modelo, los diversos tipos de antena, el estado del mar y los ángulos de elevación. Utilizando el desvanecimiento registrado para controlar un simulador de canal, es posible reproducir con precisión la respuesta de amplitud y fase del desvanecimiento.

La adición de ruido permite comparar diversos métodos de modulación y codificación para una relación señal/ruido variable. En laboratorio se determinaron las proporciones de bits erróneos y el margen de desvanecimiento requerido de los diversos métodos de transmisión, para diferentes estados del mar y ángulos de elevación (0° - 28°), con diferentes antenas y mecanismos de seguimiento [Schweikert y otros, 1980].

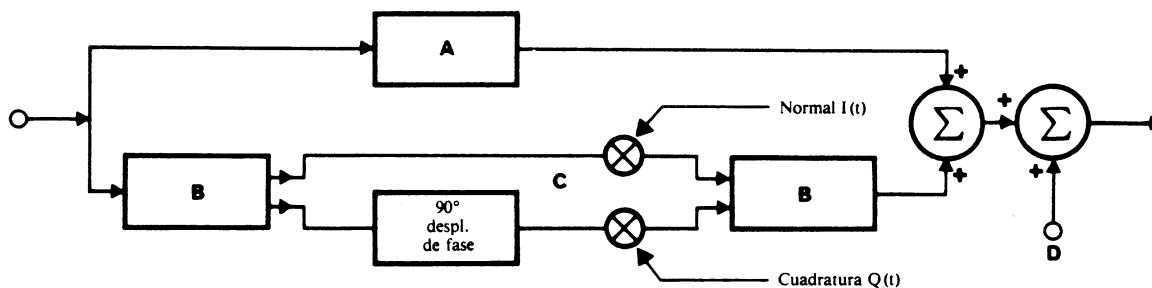


FIGURA 10 - Modelo de canal característico de un enlace satélite-barco

- A: trayecto directo (factor de ganancia compleja constante)
- B: híbrido quadri-helicoidal
- C: trayectos múltiples (factor de ganancia compleja variable en función del tiempo, componente normal y en cuadratura)
- D: $n(t)$ ruido

3.3.2 Pruebas en condiciones reales con antenas de norma C

Desde enero a marzo de 1983, se realizaron pruebas en condiciones reales a bordo del barco RV «Gauss» del «Deutsches Hydrographisches Institut (DHI)». Se utilizaron en paralelo cuatro antenas diferentes cuyas ganancias variaban entre 3 dB y 14 dB y tres receptores para recibir una señal de onda continua transmitida desde la estación terrena de Villafranca (España), por medio del satélite Marecs del Océano Atlántico. La potencia de la señal de onda continua era una potencia equivalente a la de por lo menos 10 canales de sonido MF (p.i.r.e., 28 dBW). Se registraron las componentes normal y en cuadratura de banda de base de los tres receptores a bordo del barco, para ángulos de elevación de 4° a 30° y estados de la mar con una altura de ola comprendida entre 1 m y 6 m (condiciones de alta mar). Se hicieron registros durante 3 periodos de 80 h [Hagenauer y otros, 1984].

3.3.3 Estimaciones estadísticas y modelo de canal

En el laboratorio, se digitalizaron todas las cintas y se realizó una gran variedad de estimaciones estadísticas con una unidad central de computador. Los resultados [Hagenauer y otros, 1984] de estas estimaciones indican lo siguiente:

- Puede hacerse un modelo de canal marítimo de norma C mediante un modelo de desvanecimiento de Rice-Nakagami, con una señal directa de potencia C y una señal de dispersión difusa con una potencia media M . No se han observado componentes especulares reflejadas significativas.
- El parámetro de Rice-Nakagami C/M en el borde de la cobertura del satélite (5° de elevación) es de 8 a 9,5 dB para todas las antenas y aumenta con el ángulo de elevación dependiendo de cada antena (véase la fig. 11).
- La influencia del estado de la mar es insignificante comparado con la del ángulo de elevación.
- El margen de fluctuaciones de potencia (margen de desvanecimiento) para un ángulo de elevación de 5° es de:
 - 14 dB para el 98% al 1% del tiempo, y
 - 19 dB para el 99,8% al 0.1% del tiempo.
- La anchura de banda del desvanecimiento para un ángulo de elevación de 5° (anchura de la densidad espectral de potencia) es aproximadamente:
 - 0,5 a 1 Hz (anchura de banda a 3 dB)
 - 5 Hz (anchura de banda a 20 dB) (véase la fig. 12)
- La duración media de un desvanecimiento para umbrales comprendidos entre -3 dB y -5 dB por debajo de la potencia media de la señal es aproximadamente de 0,1 s.
- Se dispone de estadísticas sobre desvanecimiento y tiempo de conexión que ofrecen una descripción suficiente del canal en el dominio del tiempo. La fig. 13 muestra algunos resultados significativos.
- Se encontró que los desplazamientos Doppler (véase la nota) de este barco de tamaño medio (1600 toneladas) fueron del orden de ± 10 Hz con una variación de 1 Hz/s.

Nota. – Cabe destacar, que los desplazamientos Doppler observados en un barco son una función de la velocidad relativa del satélite con respecto al barco y a la estación terrena costera (véase Informe 214).

3.3.4 Pruebas de modems MDP-2 con transmisiones de datos no codificados

3.3.4.1 Modems

Se han probado cuatro modems MDP-2 diferentes para el canal marítimo. Para asegurar la comparación, se fijó la velocidad de datos del canal en 1200 bit/s y se utilizó codificación diferencial para la resolución de la ambigüedad de fase.

Los modems probados fueron:

- a) Receptor coherente de Costas.
- b) Receptor coherente con filtro sintonizado.
- c) MDP-2 (con detección MDP coherente diferencial).
- d) Receptor de Costas con control automático de frecuencia (CAF).

3.3.4.2 Anchuras de banda

Para todos los receptores se optimizaron los filtros y las anchuras de banda de lazo, ya sea mediante una simulación por computador durante diseño o mediante una optimización adecuada durante las pruebas.

Para el desvanecimiento de Rayleigh artificial, el receptor a) funcionó mejor para una relación S/N alta (35 dB) y el receptor d) dio mejores resultados para una relación S/N baja (20 dB). Al contrario que las curvas teóricas, que suponen una sincronización perfecta de fase, las curvas resultantes se estabilizan a partir de una BER de 10^{-4} con una relación S/N de 35 dB, debido a variaciones de fase.

3.3.4.3 Receptores

Para los canales registrados, el receptor d) funcionó mejor, puesto que era capaz de seguir las variaciones de fase y de frecuencia en el enlace. Los márgenes de desvanecimiento se muestran en el cuadro III. El receptor siguiente mejor, fue el receptor c).

3.3.4.4 Conclusión

Los resultados medidos del funcionamiento de los modems mediante el canal registrado, mostraron que probablemente la elección más apropiada entre las pruebas efectuadas es una combinación entre el receptor coherente de Costas y el de CAF o un receptor coherente diferencial (MDP-2). Si se utiliza corrección de errores en recepción (FEC – forward error correction), la selección de los receptores es menos crítica, porque para proporciones de error de canal de 5×10^{-3} a 10^{-2} , la característica del receptor difiere sólo en 1 dB. Los resultados indicados en el cuadro III sólo se aplican a los modems probados. Se hace observar que el empleo de FEC, de otras técnicas, o de ambas, reduciría el margen requerido y, consecuentemente, la p.i.r.e. necesaria del satélite y de la estación terrena de barco (véase el Informe 921).

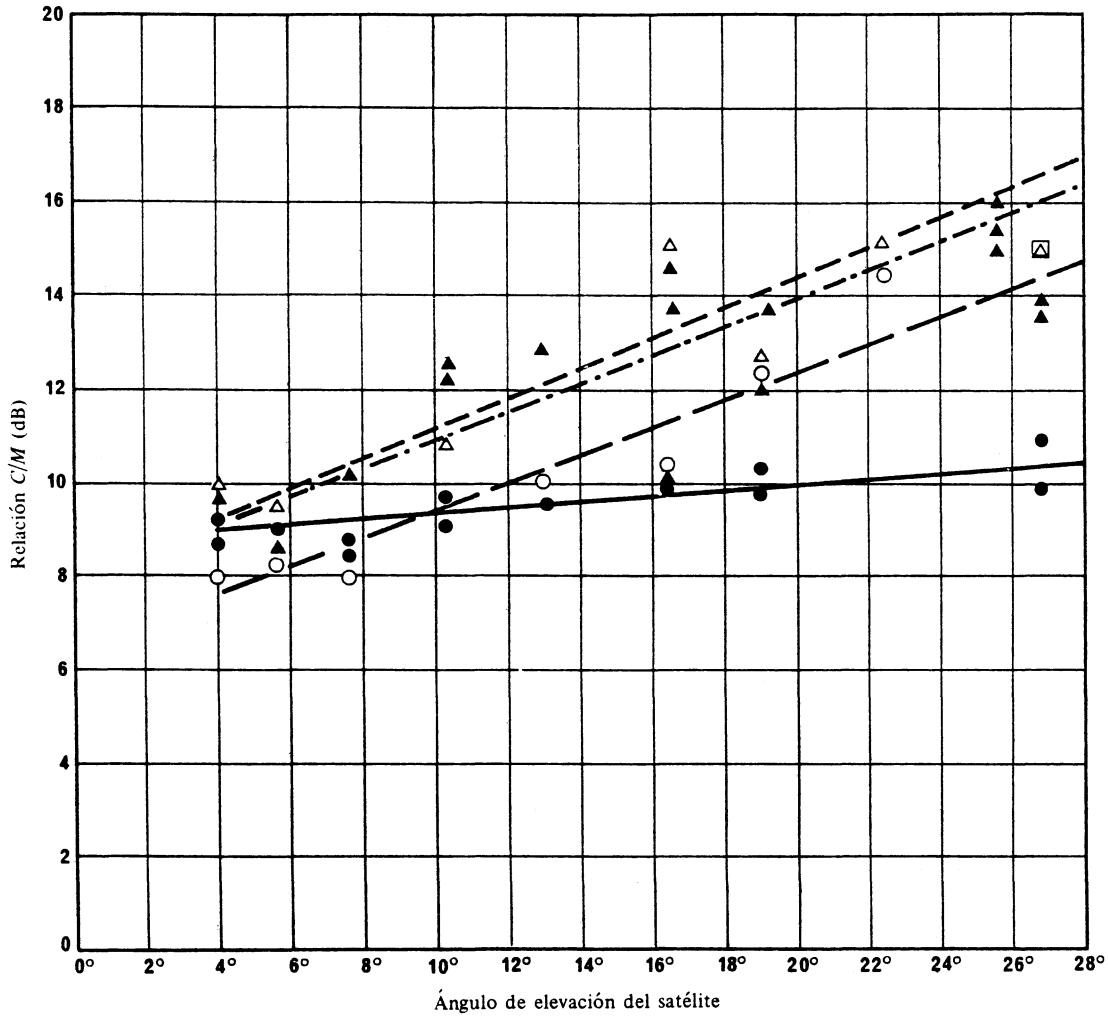


FIGURA 11 - Relación de potencias señal directa/señal por trayectos múltiples, C/M , (dB), en función del ángulo de elevación de satélite

●	Medida	antena C3	ganancia 3 dB
—	Mejor aproximación		
○	Medida	antena C5	ganancia 5 dB
- - -	Mejor aproximación		
▲	Medida	antena C11	ganancia 11 dB
- · - · -	Mejor aproximación		
△	Medida	antena C14	ganancia 14 dB
- - - - -	Mejor aproximación		

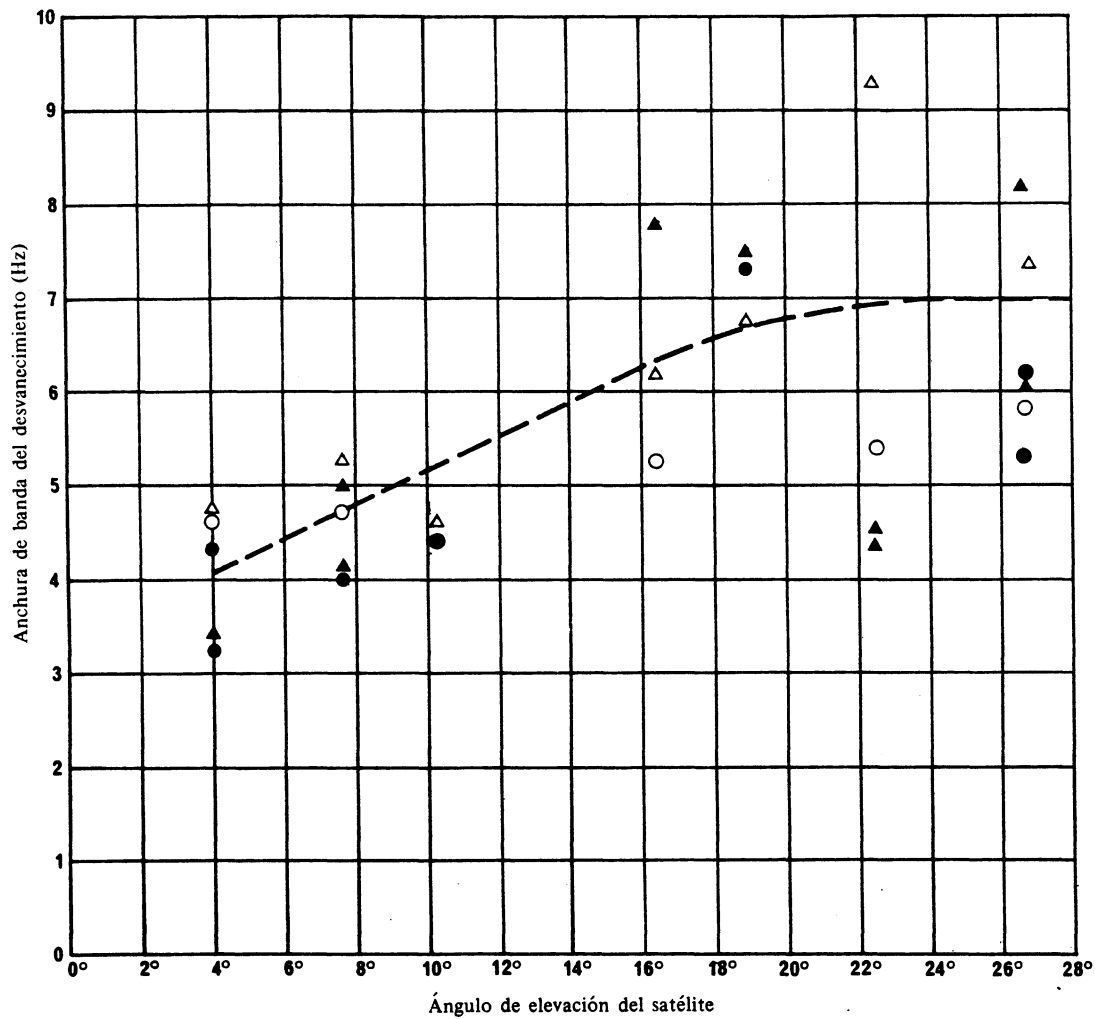


FIGURA 12 - Anchura de banda del desvanecimiento de 20 dBHz, en función del ángulo de elevación del satélite

- Antena C3 ganancia 3 dB
- Antena C5 ganancia 5 dB
- ▲ Antena C11 ganancia 11 dB
- △ Antena C14 ganancia 14 dB

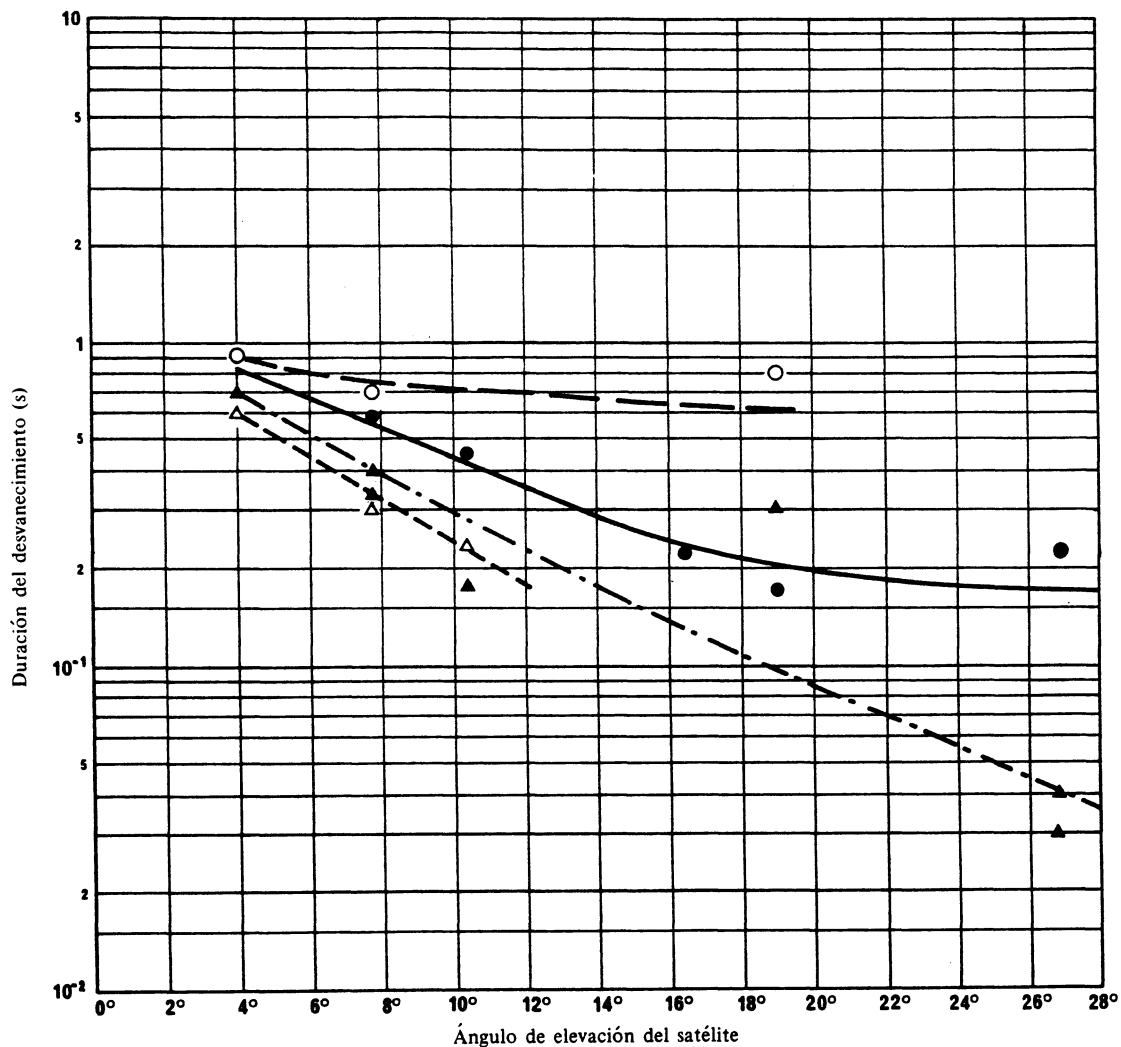


FIGURA 13 – Duración máxima de los desvanecimientos (5 dB por debajo de la potencia media) durante el 99,9% del tiempo, en función del ángulo de elevación del satélite

- | | | | |
|-----------|--------------------|------------|----------------|
| ● | Medida | antena C3 | ganancia 3 dB |
| — | Mejor aproximación | | |
| ○ | Medida | antena C5 | ganancia 5 dB |
| — | Mejor aproximación | | |
| ▲ | Medida | antena C11 | ganancia 11 dB |
| - · - · - | Mejor aproximación | | |
| △ | Medida | antena C14 | ganancia 14 dB |
| - - - - - | Mejor aproximación | | |

CUADRO III – E_b/N_0 requerido de desvanecimiento para diversas antenas y ángulos de elevación
(Receptor MDP-2 de Costas con CAF)

Ganancia de antena (dB)	Ángulo de elevación (grados)	E_b/N_0 requerido con desvanecimiento (dB)		E_b/N_0 requerido sin desvanecimiento (dB)		Margen de desvanecimiento a largo plazo requerido (dB)	
		BER = 10^{-4}	BER = 10^{-5}	BER = 10^{-4}	BER = 10^{-5}	BER = 10^{-4}	BER = 10^{-5}
3	4	19	25	10	11	9	14
	19	14	18	10	11	4	7
5	4	20	30	10	11	10	19
11	4	18	33	10	11	8	22
	19	12	14	10	11	2	3

Nota. – Las antenas utilizadas para estas mediciones no estaban estabilizadas y la orientación del satélite en puntería se efectuó manualmente.

4. Conclusiones

Se ha estudiado, desde el punto de vista teórico, el efecto de la interferencia debida a trayectos múltiples reflejados por el mar en la proporción de bits erróneos recibidos de la señal MDP de 2 niveles coherente y de la señal MDF de 2 niveles no coherente, en la hipótesis de que la distribución de amplitud de las señales reflejadas por el mar obedece a una distribución m . Esta distribución abarca casi todos los tipos de fenómenos de desvanecimiento causados por señales que experimentan reflexión especular o por señales reflejadas gaussianas. Los métodos indicados y las figuras del punto 2.1 son útiles para estimar el margen de desvanecimiento, aunque deben determinarse experimentalmente los valores de m y C/M .

Los análisis teóricos y los datos experimentales obtenidos en los Estados Unidos de América con el satélite ATS-6 utilizando a bordo de un barco una antena con una abertura angular de 35° indican que un margen de 5 dB hará, en condiciones ideales que $P_e = 10^{-5}$ cuando $C/M = 12$ dB. Es probable que en condiciones reales, con este margen de 5 dB, P_e será igual a 10^{-5} cuando C/M sea superior a unos 14 dB. Se obtuvo típicamente este nivel de trayectos múltiples (o inferior) cuando el ángulo de elevación respecto del satélite era igual a la mitad de la abertura angular de la antena (o superior).

Las curvas experimentales de la fig. 9, obtenidas en Francia con el ATS-6, ilustran el efecto de los trayectos múltiples sobre la proporción de bits erróneos, con la antena de 20 dB de ganancia utilizada. Se comprueba que las curvas experimentales se apartan de la curva del ruido térmico en un valor (en dB) que aumenta a medida que disminuye el ángulo de elevación, conforme a la previsión teórica. Para una proporción de errores comprendida entre 10^{-3} y 10^{-4} , la potencia adicional necesaria debido a los trayectos múltiples por encima de la que se necesita sin trayectos múltiples resulta ser, por término medio, la que se indica a continuación:

- Ángulo de elevación de 5° : 2 dB.
- Ángulo de elevación de 10° : 1 dB.
- Ángulo de elevación de 15° o más: 0,5 dB aproximadamente.

Contribuyó notablemente a la calidad de la modulación digital MDP de 2 niveles la discriminación conseguida por la antena estabilizada de 20 dB.

En pruebas realizadas por la República Federal de Alemania con el sistema MARECS en 1983 se utilizó el método del canal registrado. La comparación entre la transmisión de datos por satélite y la realizada por canal registrado en laboratorio, así como la evaluación de las estadísticas de amplitud, confirmaron la posibilidad de utilizar el canal registrado y el modelo de desvanecimiento de Rice-Nakagami.

Se observó que los siguientes valores son típicos para una antena de norma C con un ángulo de elevación de 5° :

- $C/M = 9$ dB
- un margen de desvanecimiento de 8 dB en la transmisión de datos MDP-2 y una proporción de bits erróneos (BER) = 10^{-4} .

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ENGELS, P. y otros [febrero de 1976] Maritime communications experiments and search-and-rescue evaluations with the NASA ATS-6 satellites. Report N.º DOT-TSC-USCG-76.
- 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 en virtud de ESA/ESTEC contrato N.º 5323/82/NL/JS.
- MIZUNO, T., MORINAGA, N., NAMEKAWA, T. e HIRATA, Y. [junio de 1975] Effects of multipath interference in aeronautical and maritime satellite communication links. IEEE International Conference on Communications (ICC '75), San Francisco, Estados Unidos de América, Conf. Record 10.11-10.15.
- MODESTINO, J.W. y MUI, S.Y. [junio de 1976] Convolutional code performance in the Rician fading channel. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-24, 6, 592-606.
- NAKAGAMI, M. [1960] The m-distribution – a general formula of intensity distribution of rapid fading. In *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, W. C. Hoffman, Ed., Oxford, Reino Unido, 3.
- SALWEN, H. [9 de agosto de 1972] Multipath effects in the Marisat system, Tech. Memo A100-1, Transportation Systems Center, Department of Transportation, Cambridge, Mass., Estados Unidos de América.
- SALWEN, H. [marzo de 1975] Differential phase shift keying performance under time selective multipath fading. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-23, 3, 383-385.
- SALWEN, H. y DUNCOMBE, C. [julio de 1975] Performance evaluation of data modems for the aeronautical satellite channel. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-23, 7, 695-705.
- SCHWEIKERT, R., PAPKE W. y HAGENAUER, J. [1980] Medición de canales y transmisión de datos por canales reales y registrados del servicio móvil marítimo por satélite (MARISAT). DFVLR Internal Report NE-NT-T-26/80, 144 págs. (en alemán), distribuido por DFVLR/NT, D-8031 Oberpfaffenhofen, Alemania (República Federal de).

INFORME 763 -3.*

**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.

