

INFORME 1169 *

EFECTOS DE LA PROPAGACIÓN POR TRAYECTOS MÚLTIPLES EN LA SUPERFICIE
DEL MAR EN EL SERVICIO MÓVIL AERONAÚTICO POR SATÉLITE

(Cuestión 88/8)

(1990)

1. Introducción

La propagación por trayectos múltiples especialmente por reflexión en la superficie del mar es un parámetro importante que ha de tenerse en cuenta al diseñar sistemas móviles aeronáuticos por satélite en las bandas 1,5/1,6 GHz. La nueva información que figura en el punto 3 de este Informe, confirma de nuevo los resultados de anteriores experimentos y amplía las investigaciones sobre caracterización de los trayectos múltiples realizadas anteriormente.

Varios factores relacionados con la posible repercusión de la señal propagada por trayectos múltiples reflejada en el mar en las comunicaciones móviles aeronáuticas por satélite hicieron que la caracterización de este parámetro fuese un asunto de la suficiente importancia como para iniciar investigaciones experimentales, que comenzaron a principios del decenio de 1970. Entre estos factores cabe citar:

- 1) el nivel de potencia previsto de la señal reflejada con respecto a la señal por trayecto directo;
- 2) las características de la señal propagada por trayectos múltiples, y
- 3) la incapacidad relativa de las antenas de aeronave de discriminar la señal reflejada en el mar (especialmente para ángulos de baja elevación y para antenas de baja ganancia, relativamente económicas y de gran anchura de banda).

En el punto 4 de este Informe, se facilitan unos primeros datos sobre la calidad operacional de una instalación de antena de aeronave constituida por una formación de elementos en fase, con respecto a la influencia de los efectos de trayectos múltiples debidos a la reflexión en la superficie del mar.

2. Experimentos en servicio real con satélites ATS

Los primeros experimentos amplios con señales propagadas por trayectos múltiples, basados en el servicio aeronáutico móvil por satélite, en las bandas 1,5-1,6 GHz fueron patrocinados por la Federal Aviation Administration (FAA) de los Estados Unidos de América utilizando el satélite de tecnología de aplicaciones (ATS) número 5 (ATS-5) de la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Se realizaron experimentos de caracterización de comunicaciones por trayectos múltiples de onda continua controlada y de enlaces de datos para diversos estados del mar, ángulos de elevación y relaciones entre la señal propagada por trayecto directo y propagada por trayectos múltiples [FAA, 1973]. Canadá también realizó pruebas por trayectos múltiples complementarias de las de FAA, utilizando códigos pseudoaleatorios [Chinnick y Matt, 1971]. A mediados del decenio de 1970, FAA patrocinó experimentos más sofisticados de caracterización de propagación por trayectos múltiples

* Este Informe debe señalarse a la Comisión de Estudio 5 para información.

en banda ancha, para certificar un banco de pruebas de simulador de canal, utilizando el satélite ATS número 6 (ATS-6) de la NASA [FAA, 1976]. Se evaluó también la calidad de funcionamiento de diversos enlaces de datos y técnicas de modulación vocal con el satélite ATS-6, que tenía una potencia mucho mayor, utilizando una antena de 9 m de diámetro. El extenso programa ATS-6 incluía también programas realizados por Canadá y la Agencia Espacial Europea (ESA, entonces Organización de Investigación Espacial Europea, ESRO).

Estos programas y resultados se resumen en las referencias anteriormente mencionadas y en la documentación del CCIR (Ver Informes 505 y 599, Vol. VIII, Kyoto, 1978). Como principales resultados de la caracterización de la señal propagada por trayectos múltiples reflejada en el mar cabe citar:

- 1) la potencia de la señal propagada por trayectos múltiples en función de las características del ángulo de elevación se ajustó de forma sustancial a los valores previstos;
- 2) la señal propagada por trayectos múltiples fue semejante al ruido (con distribución de Rayleigh, no especular);
- 3) el trayecto directo total más la señal propagada por trayectos múltiples tuvo una distribución de Nakagami- Rice,
- 4) las características de desvanecimiento resultantes de la señal recibida total indicaron la necesidad de un diseño apropiado de la estructura de la señal (por ejemplo, codificación y entrelazado) para combatir los errores en ráfaga periódicos en el canal de radiofrecuencia, y proporcionar orientación para el diseño de la señal.

3. Experimentos realizados en la República Federal de Alemania

3.1 En unas mediciones realizadas durante 1985 y 1986 por la República Federal de Alemania con ayuda de una portadora estable de onda continua transmitida desde un satélite MARECS de INMARSAT se registraron en una aeronave, por separado, los valores de la señal directa y la señal reflejada por trayectos múltiples. Estos valores se utilizaron para controlar un simulador de canal de laboratorio (principio del canal almacenado) y para determinar la función de distribución de probabilidad de la señal reflejada. Por otra parte, se determinaron las duraciones medias de los desvanecimientos de un enlace utilizando una antena experimental de aeronave de 3 dB [Hagenauer y otros, 1986]. El resto de este Informe se refiere al programa de mediciones con más detalle.

3.1.1 Establecimiento de un modelo de canal y comprobación del mismo

3.1.2 Modelo teórico del canal

Si el satélite transmite una señal $x(\tau)$ la aeronave recibe, en general, dos componentes: la componente directa $y_d(\tau - \tau_0)$ y la componente reflejada (por trayectos múltiples) $y_r(\tau - \tau_0 - r)$ en la superficie de la tierra. El retardo de propagación τ_0 no influye en el modelo del canal y por tanto se desprecia en las consideraciones que siguen. El retardo diferencial r depende básicamente de la geometría y puede calcularse en función del ángulo de elevación con el satélite (ϵ), indicándose en la Figura 1 para las distintas altitudes de la aeronave.

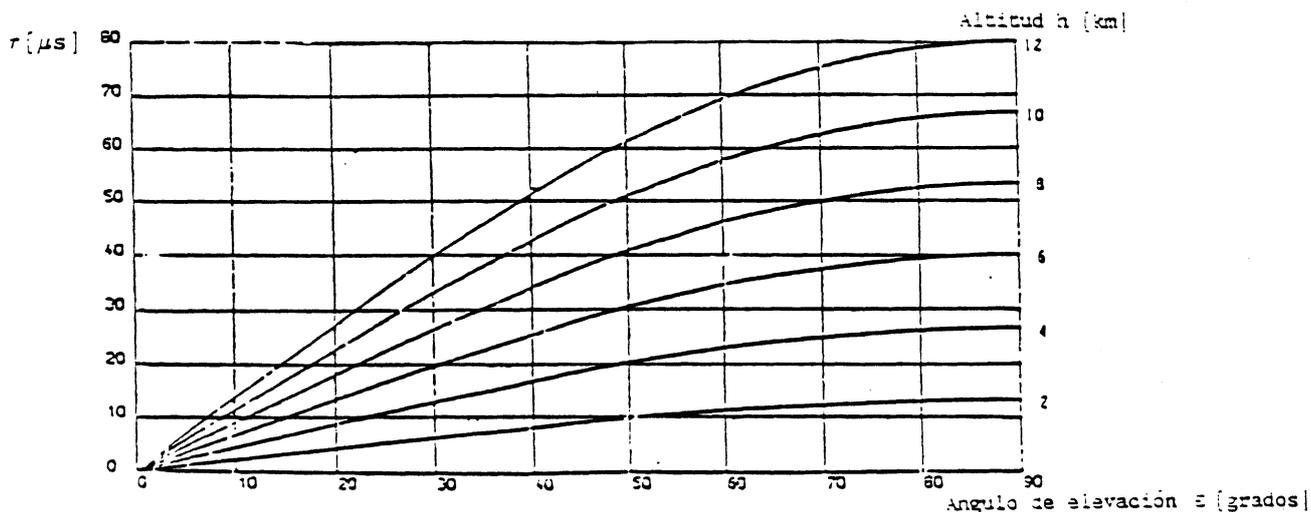


FIGURA 1

Retardo diferencial r entre la señal directa y la reflejada en función del ángulo de elevación y de la altitud

La señal $y(\tau)$ en el receptor de la aeronave es el resultado de sumar la componente directa y la componente reflejada en la antena que se utiliza. Esta recepción por trayectos múltiples da lugar a un desvanecimiento de la señal. Como el coeficiente de reflexión de la tierra es mucho menor que el del agua salada, en adelante el análisis se centra en la recepción por trayectos múltiples desde el mar.

Dado el movimiento de la aeronave y la rugosidad de la superficie de la Tierra, el canal aeronáutico debe modelarse en principio como un canal con variación aleatoria en el tiempo. La teoría de los canales lineales con variación aleatoria en el tiempo se describe en un documento fundamental [Bello, 1963]. Aplicando dicho texto al caso aeronáutico, puede considerarse como si la componente de la señal reflejada se hubiese transmitido por un canal de dispersión estacionario sin correlación en sentido amplio [Bello, 1973, FAA, 1976, Vol. 5]. Para todas las anchuras de banda B de la señal consideradas [Hagenauer y Papke, 1982], este canal se describe mediante un desvanecimiento multiplicativo (no selectivo en frecuencia), es decir, en el que la función de transferencia variable en el tiempo $T(f, \tau)$ es independiente de la frecuencia en los tramos indicados:

$$T(f, \tau) = T(\tau) \quad \text{para} \quad f_0 - \frac{B}{2} < f < f_0 + \frac{B}{2} \quad (1)$$

f_0 = frecuencia portadora

B = anchura de banda de la señal

3.1.3 Comprobación del canal

Las señales directa y reflejada se reciben en dos canales receptores separados y por último se graban en cinta analógica. Estas grabaciones de las señales directa y reflejada pueden utilizarse en el laboratorio junto con el simulador de canal almacenado [Hagenauer y Papke, 1982] para simular todos los diagramas de antena deseados, y también, pueda realizarse una evaluación estadística indirecta precisa.

Estas dos cadenas receptoras llevaban una antena para la recepción de la señal directa (un sistema de antenas conformadas en fase orientable electrónicamente de 10 dB de ganancia) [Splitt y Forster, 1986] y un par de antenas para la recepción de las señales reflejadas con polarización dextrógira y levógira (antenas helicoidales orientables mecánicamente de 10 dB de ganancia) instaladas cerca del extremo y orientadas hacia el punto de reflexión especular.

3.2 Resultados

3.2.1 Factor C/M de Rice

La Figura 2 muestra las relaciones medidas entre la "potencia recibida directamente, C" y la "potencia debida a la propagación por trayectos múltiples con polarización circular dextrógira, M" para una antena ideal de 0 dBi y para una antena de 3 dBi, en función del ángulo de elevación ϵ .

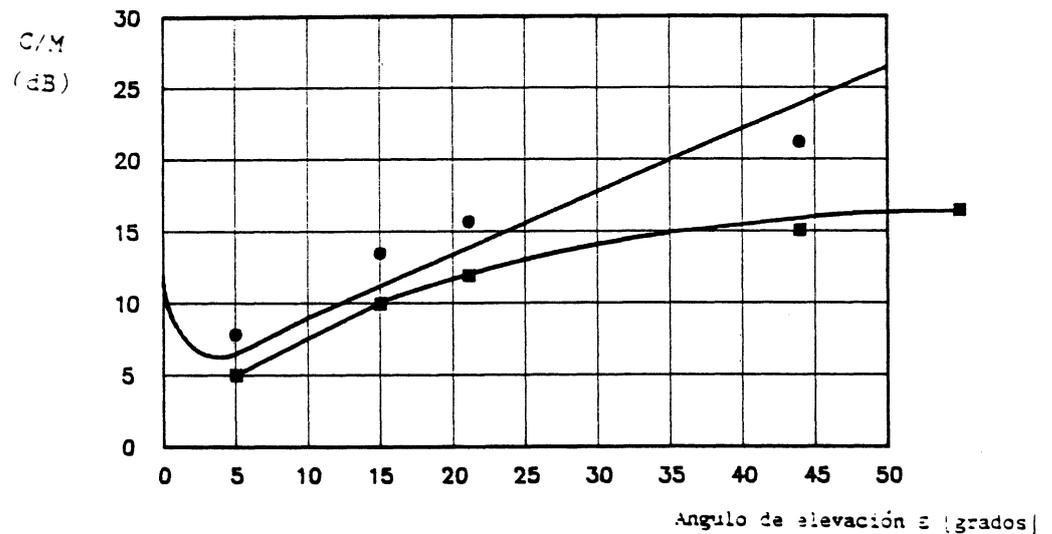


FIGURA 2

Relación medida entre la potencia recibida directamente y la potencia por trayectos múltiples en función del ángulo de elevación para las antenas indicadas y predicciones teóricas

- antena de 0 dBi
- antena experimental de 3 dBi

En un tramo amplio hay una buena coincidencia entre la C/M obtenida a partir de los coeficientes de Fresnel para la reflexión especular y el factor de divergencia [Beckmann y Spizzichino, 1963].

3.2.2 Anchura de banda del espectro de potencia debido al efecto Doppler

Según la teoría expresada en [Bello, 1973], el espectro de potencia correspondiente al efecto Doppler de la señal reflejada tiene forma gaussiana:

$$P(\nu) = \frac{\sqrt{2}}{B_{rms} \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{2\nu^2}{B_{rms}^2}\right) \quad (2)$$

Dicha forma gaussiana se ha verificado en todas las mediciones.

En (2) se define la dispersión rms por efecto Doppler como el doble de la desviación típica de $P(\nu)$.

$$B_{rms} = 4 \frac{\alpha}{\lambda_0} \cdot v \cdot \text{sen } \epsilon \quad (3)$$

en la que α es el valor rms de la pendiente de la superficie, λ_0 es la longitud de onda de la portadora transmitida y v es la velocidad de la aeronave a lo largo de la ruta con un ángulo de elevación constante. La Figura 3 muestra los valores medidos de B_{rms} , en comparación con la ecuación anterior siendo $\alpha = 0,04$; $0,12$ y $0,2$; $\lambda_0 = 0,2$ m, y $v = 380$ nudos.

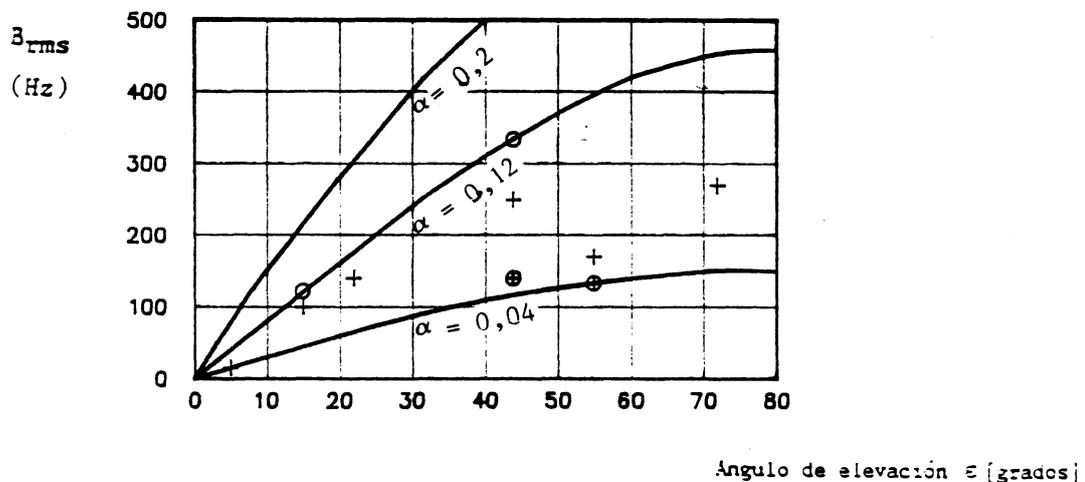


FIGURA 3

Valores medidos de la dispersión por efecto Doppler en función del ángulo de elevación y los valores rms de la pendiente de la superficie

- x polarización circular levógira a un nivel de vuelo de 30.000 pies
- o polarización circular dextrógira a un nivel de vuelo de 30.000 pies
- ⊕ polarización circular levógira a un nivel de vuelo de 6.000 pies

3.2.3 Duración de los desvanecimientos e intervalo de conexión

Un desvanecimiento se define como un caso en el que el nivel recibido de potencia es inferior a un umbral determinado. En lo que sigue se consideran los umbrales "potencia media (0 dB)" y "5 dB inferior a la potencia media".

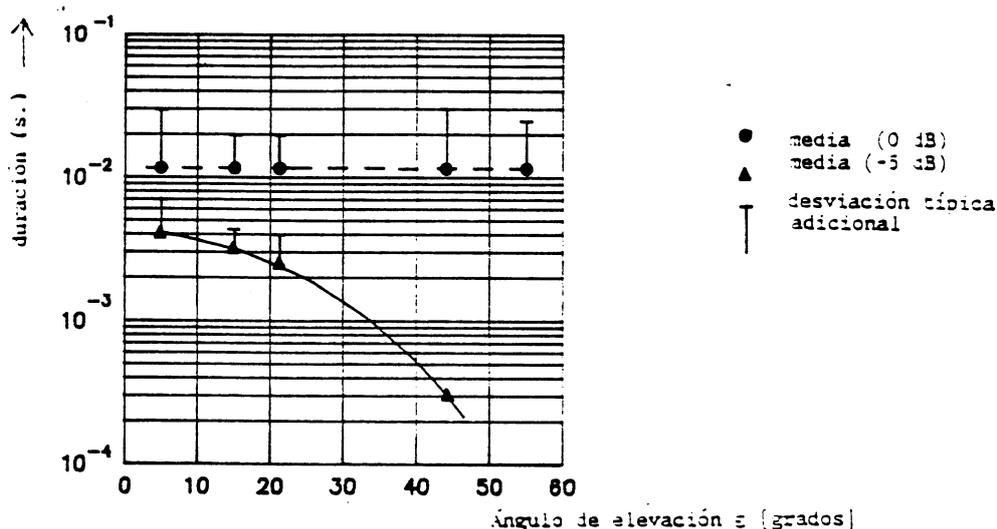


FIGURA 4
Duración media de los desvanecimientos en función del ángulo de elevación

La Figura 4 muestra la duración media de los desvanecimientos T_{med} en función de la elevación del satélite, obtenida procesando los datos de cinco vuelos de prueba.

La duración media de los desvanecimientos para el umbral de 0 dB es casi constante con el ángulo de elevación, y para el umbral de -5 dB disminuye considerablemente. Obsérvese que la desviación típica es relativamente alta.

Por otra parte, conviene apreciar la duración máxima de los desvanecimientos T_{max} y el valor de la duración $T_{99,9}$ cuya probabilidad de no ser excedida por otro desvanecimiento es del 99,9%. Ambos valores se representan en la Figura 5 para vuelos a baja altura.

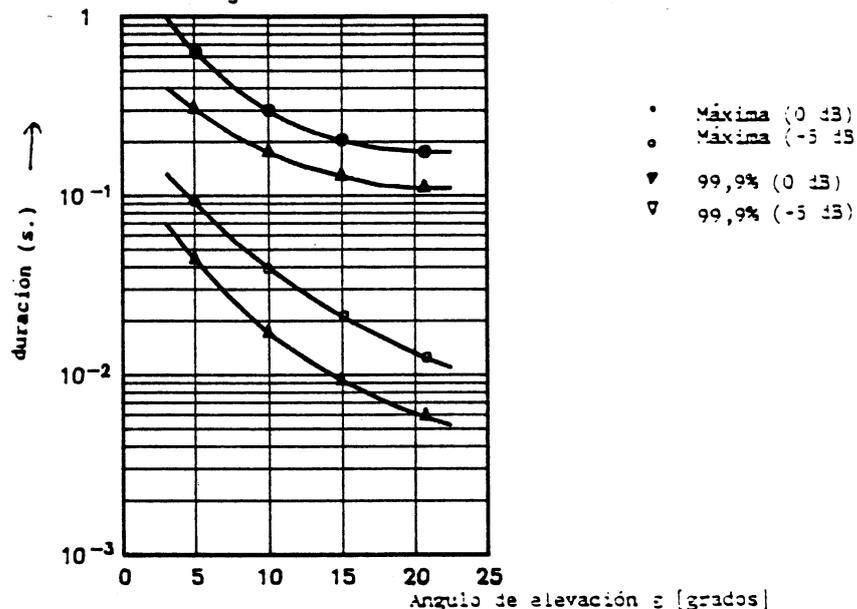


FIGURA 5

Duración máxima y del 99,9% de los desvanecimientos en función del ángulo de elevación

El caso complementario de un desvanecimiento es una conexión. Los intervalos de conexión son importantes para evaluar el caudal de la transmisión de datos por paquetes. Las Figuras 6 y 7 muestran los resultados para T_{med} , T_{max} y $T_{99,9}$.

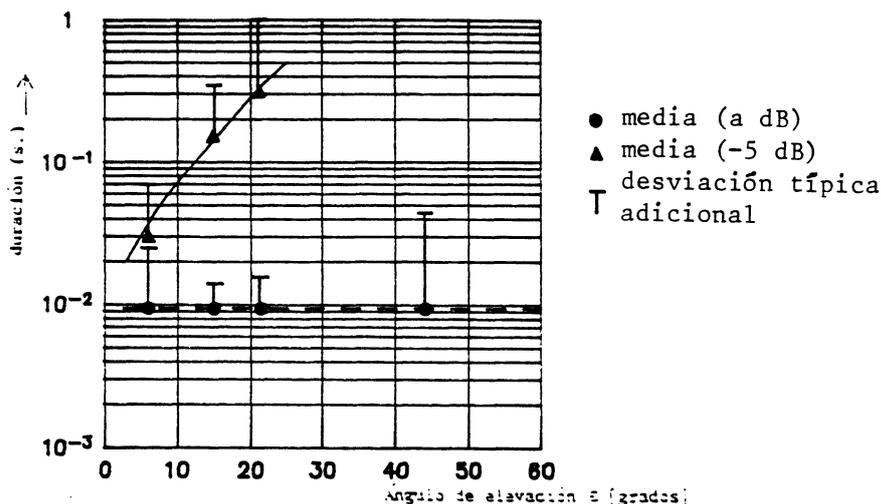


FIGURA 6

Duración media de la conexión en función del ángulo de elevación

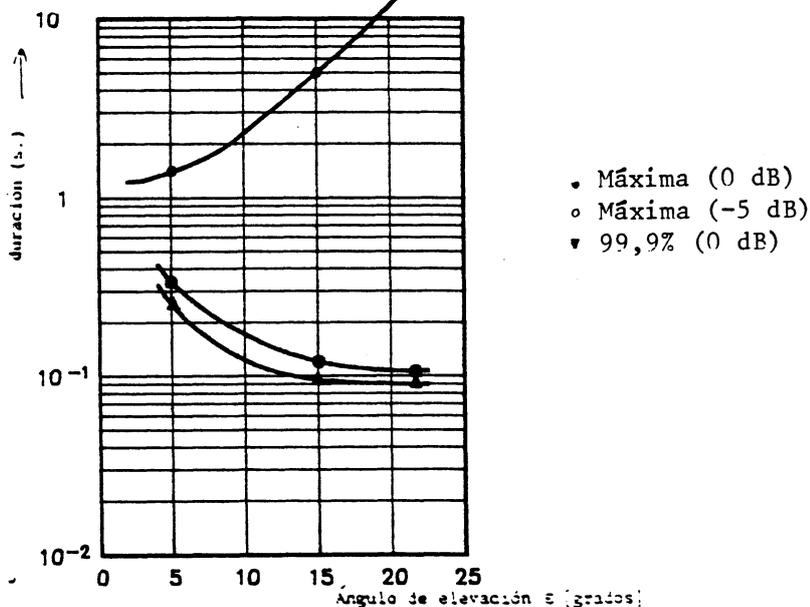


FIGURA 7

Duración máxima y del 99,9% de la conexión en función del ángulo de elevación

3.3 Conclusiones

En las mediciones realizadas por la República Federal de Alemania durante 1985 y 1986 se utilizó la transmisión de una portadora continua desde un satélite MARECS de INMARSAT para evaluar el canal de comunicaciones aeronáuticas por satélite. Los ensayos seguían el principio del canal almacenado y comprendían la recepción por separado de las componentes de la señal directa y reflejada así como unas mediciones con una antena experimental de aeronave de 3 dB. Los resultados del programa de mediciones presentado en este Informe permiten llegar a las conclusiones siguientes.

- 1) Se vio que la componente de señal reflejada seguía exactamente una distribución de Rayleigh. Se determinó que la dispersión rms por efecto Doppler estaba comprendida entre 10 Hz (5° de elevación) y 330 Hz (44° de elevación).

- 2) La evaluación estadística de los datos medidos con la antena experimental confirmaron el modelo de desvanecimiento de Nakagami-Rice con una relación C/M comprendida entre 5 dB a 5° de elevación y 15 dB a 55° de elevación.
- 3) La duración media de los desvanecimientos con relación a un umbral de 5 dB por debajo de la potencia media es de 4 ms para una elevación de 5° y disminuye a 0,3 ms para 44°. Con una elevación de 5° se midió una duración máxima de los desvanecimientos de 100 ms.
- 4) La duración media de un intervalo de conexión (potencia de la señal por encima del umbral) respecto a un umbral de 5 dB por debajo de la potencia media, es de 30 ms con una elevación de 5° aumentando a 300 ms para 21°.

4. Experimentos con el satélite de comunicaciones aeronáuticas de Japón

En Japón se han efectuado experimentos de satélite aeronáutico utilizando los satélites ETS-V e INMARSAT en las bandas 1,5/1,6 GHz mediante aeronaves comerciales en rutas de vuelos transoceánicos. Se instalaron en la parte superior del fuselaje de un avión B-747 antenas operacionales compuestas de formaciones de elementos en fase consistentes en dos hileras de 16 elementos que empleaban láminas circulares de microcinta.

No se observó desvanecimiento multitrayecto debido a la reflexión en la superficie del mar, ni siquiera para ángulos de elevación pequeños y ello debido a que las señales reflejadas en la superficie del mar resultaban bloqueadas por las alas y el fuselaje antes de que pudieran alcanzar la antena situada en el techo del fuselaje.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BECKMANN, P., SPIZZICHINO, A. [1963] - The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces, New York: Pergamon.

BELLO, P.A. [Diciembre 1963] - Characterization of randomly time-variant linear channels, IRE Trans. Comm. Syst., Vol. CS-11, pp. 360-393.

BELLO, P.A. [Mayo 1973] - Aeronautical channel characterization, IEEE Trans. Comm. Vol. COM-21, pp. 548-563.

CHINNICK, J., MATT, E. [Diciembre 1971] - Spread spectrum measurements of multipath channel characterization in a satellite mobile communication system, Canadian Communications Research Centre.

FAA [Abril 1973] - ATS-5 Multipath/digital data/ranging L-band experimental programme, Report No. FAA-RD-73-57, Multivolume.

FAA [Febrero 1976] - Air traffic control experimentation and evaluation with the NASA ATS-6 satellite, Report No. FAA-RD-75-173, 10 Volumes.

HAGENAUER, J., PAPKE, W. [Mayo 1982] - Data transmission for maritime and land mobile using stored channel simulation, Proc. of the 32nd IEEE Vehicular Tech. Conference, San Diego, pp. 379-383.

HAGENAUER, J., NEUL, A. y otros, - The aeronautical satellite channel. Final report, 1986, DFVLR, 8031 Oberpfaffenhofen, Federal Republic of Germany.

SPLITT, G., FORSTER, H. - Eine konforme Flugzeug-Array-Antenne mit schwenkbarer Strahlungscharakteristik zur Satellitenkommunikation im L-Band, DFVLR-FB 86-47. DFVLR, 8031 Oberpfaffenhofen, Federal Republic of Germany.