

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R P.682-4
(08/2022)

**Datos de propagación necesarios para el
diseño de sistemas de telecomunicación
móviles aeronáuticos Tierra-espacio**

Serie P
Propagación de las ondas radioeléctricas



Unión
Internacional de
Telecomunicaciones

Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión sonora
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2023

© UIT 2023

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R P.682-4

Datos de propagación necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación móviles aeronáuticos Tierra-espacio

(Cuestión UIT-R 207/3)

(1990-1992-2007-2012-2022)

Cometido

La presente Recomendación describe distintos efectos de propagación de especial importancia para los sistemas aeronáuticos móviles por satélite. Se identifican degradaciones debidas a la propagación ionosférica y troposférica pertinentes, y se hace referencia a Recomendaciones del UIT-R en las que se ofrecen orientaciones respecto de dichos efectos. Asimismo, se muestran modelos de predicción de los efectos de propagación causados por trayectos múltiples y dispersiones desde la superficie de la Tierra.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que para planificar los sistemas móviles aeronáuticos Tierra-espacio es necesario disponer de datos de propagación y métodos de predicción adecuados;
- b) que para la planificación de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio se recomiendan los métodos de la Recomendación UIT-R P.618;
- c) que es necesario elaborar con más detalle los métodos de predicción aplicables específicamente a los sistemas móviles aeronáuticos por satélite con el fin de obtener una precisión adecuada en todas las condiciones de funcionamiento;
- d) que, sin embargo, se dispone de métodos que permiten obtener una precisión suficiente para muchas aplicaciones,

recomienda

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

Anexo 1**1 Introducción**

Los efectos de propagación en el servicio móvil aeronáutico por satélite difieren de los del servicio fijo por satélite y de otros servicios móviles por satélite pues:

- en las aeronaves se emplean antenas pequeñas, y el fuselaje de la aeronave puede afectar el funcionamiento de la antena;
- las altas velocidades de las aeronaves producen grandes dispersiones debido al efecto Doppler;

- los terminales de las aeronaves deben dar cabida a una amplia gama dinámica de transmisión y recepción;
- las condiciones de seguridad de las aeronaves exigen una elevada integridad de las comunicaciones y aun las degradaciones de propagación de corta duración son muy importantes. La fiabilidad en las comunicaciones se debe mantener durante las maniobras que implican inclinaciones laterales y desplazamientos tridimensionales.

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

- los efectos troposféricos, incluidas la atenuación producida por los gases, la atenuación debida a las nubes y a la lluvia, la atenuación debida a la niebla, la refracción y el centelleo;
- los efectos ionosféricos, tales como el centelleo;
- los efectos de la reflexión en la superficie (propagación por trayectos múltiples);
- los efectos ambientales (movimiento de la aeronave, estado del mar, tipo de superficie del terreno).

Los sistemas móviles aeronáuticos por satélite pueden funcionar en cualquier parte del mundo, incluso con trayectos de propagación de bajo ángulo de elevación. Se han efectuado diversas mediciones de los parámetros de propagación por trayectos múltiples sobre tierra y mar. En algunos casos se utilizaron simulaciones en laboratorio para comparar los datos medidos y verificar los parámetros del modelo. La señal recibida se considera en términos de sus posibles componentes: una onda directa sujeta a los efectos atmosféricos, y una onda reflejada que por lo general contiene principalmente una componente difusa.

Actualmente resulta de interés utilizar frecuencias próximas a 1,5 GHz para los sistemas móviles aeronáuticos por satélite. Teniendo en cuenta que la mayor parte de los experimentos se han llevado a cabo en esta banda, los datos que figuran en esta Recomendación se aplican principalmente a estas frecuencias. A medida que los sistemas aeronáuticos se perfeccionen, se prevé la posibilidad de utilizar otras frecuencias.

2 Efectos troposféricos

Para los servicios aeronáuticos, la altitud de la antena móvil es un parámetro importante. Pueden efectuarse estimaciones de la atenuación troposférica por los métodos especificados en la Recomendación UIT-R P.618.

La señal recibida puede ser afectada por refracción a gran escala y por centelleos inducidos por turbulencias atmosféricas. Estos efectos disminuirán en el caso de las aeronaves que vuelen a gran altura.

3 Efectos ionosféricos

Los efectos ionosféricos en trayectos oblicuos se examinan en la Recomendación UIT-R P.531. Estos fenómenos son importantes para muchos trayectos en frecuencias por debajo de 10 GHz aproximadamente, en particular dentro de $\pm 15^\circ$ del ecuador geomagnético y, en menor medida, dentro de las zonas aurales y los casquetes polares. Los efectos ionosféricos alcanzan su mayor nivel cerca del máximo del ciclo de manchas solares.

Las degradaciones causadas por la ionosfera no disminuirán a las altitudes típicas de las aeronaves. En la Recomendación UIT-R P.680 figura una descripción resumida de los efectos ionosféricos de interés particular para los sistemas móviles por satélite. Para la mayoría de las señales de telecomunicación, la degradación más grave se deberá probablemente al centelleo ionosférico.

El Cuadro 1 de la Recomendación UIT-R P.680 presenta estimaciones de los efectos ionosféricos máximos previstos a frecuencias hasta 10 GHz para trayectos con un ángulo de elevación de 30°.

4 Desvanecimiento debido a reflexiones y dispersiones en la superficie de la Tierra

4.1 Generalidades

En los sistemas móviles aeronáuticos por satélite, el desvanecimiento debido a la propagación por trayectos múltiples causada por las reflexiones en la superficie de la Tierra difiere del que se produce en otros sistemas móviles por satélite porque las velocidades y altitudes de las aeronaves son mucho mayores que las de otras plataformas móviles.

4.2 Desvanecimiento debido a reflexiones en la superficie del mar

En el caso de los sistemas aeronáuticos, las características de desvanecimiento pueden analizarse por métodos similares a los utilizados para los sistemas marítimos descritos en la Recomendación UIT-R P.680, teniendo debidamente en cuenta la esfericidad de la Tierra, que adquiere importancia al aumentar la altitud de la antena por encima de la superficie reflectora.

4.2.1 Influencia de la altitud y la ganancia de la antena

El siguiente método sencillo, basado en un modelo teórico, permite efectuar estimaciones aproximadas de la potencia de la señal propagada por trayectos múltiples o de la profundidad del desvanecimiento utilizables en el diseño de sistemas.

El procedimiento es el siguiente:

Gamas aplicables:

Frecuencias: 1-2 GHz

Ángulos de elevación: $\theta_i \geq 3^\circ$, y $G(1,5\theta_i) \geq -10$ dB

donde $G(\theta)$ es el diagrama de radiación del lóbulo principal, expresado por:

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

donde:

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

θ : ángulo medido desde el eje de puntería (grados)

Polarizaciones: circular y horizontal; vertical para $\theta_i \geq 8^\circ$

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

Paso 1: Calcular los ángulos rasantes del punto de reflexión especular, θ_{sp} , y el horizonte, θ_{hr} , por medio de:

$$\theta_{sp} = 2 \gamma_{sp} + \theta_i \quad \text{grados} \quad (2a)$$

$$\theta_{hr} = \cos^{-1} [R_e / (R_e + H_a)] \quad \text{grados} \quad (2b)$$

donde:

$$\gamma_{sp} = 7,2 \times 10^{-3} H_a / \text{tg } \theta_i$$

R_e : radio de la Tierra = 6 371 km

H_a : altura de la antena (km).

Paso 2: Hallar la ganancia relativa de la antena, G , en la dirección intermedia entre el punto especular y el horizonte. La ganancia relativa de antena, se calcula aproximadamente por medio de la ecuación (1), donde $\theta = \theta_i + (\theta_{sp} + \theta_{hr})/2$ (grados).

Paso 3: Calcular el coeficiente de reflexión Fresnel del mar:

$$R_H = \frac{\text{sen } \theta_i - \sqrt{\eta - \cos^2 \theta_i}}{\text{sen } \theta_i + \sqrt{\eta - \cos^2 \theta_i}} \quad (\text{polarización horizontal}) \quad (3a)$$

$$R_V = \frac{\text{sen } \theta_i - \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta_i) / \eta^2}}{\text{sen } \theta_i + \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta_i) / \eta^2}} \quad (\text{polarización vertical}) \quad (3b)$$

$$R_C = \frac{R_H + R_V}{2} \quad (\text{polarización circular}) \quad (3c)$$

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

donde:

$\varepsilon_r(f)$: 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 4: Calcular el factor de corrección C_θ (dB):

$$C_\theta = \begin{cases} 0 & \text{para } \theta_{sp} \geq 7^\circ \\ (\theta_{sp} - 7)/2 & \text{para } \theta_{sp} < 7^\circ \end{cases} \quad (4)$$

Paso 5: Calcular el factor de divergencia D (dB) debido a la curvatura de la Tierra:

$$D = -10 \log \left[1 + \frac{2 \text{sen } \gamma_{sp}}{\cos \theta_{sp} \text{sen } (\gamma_{sp} + \theta_i)} \right] \quad (5)$$

Paso 6: La potencia incoherente media de las ondas reflejadas en el mar con respecto a la onda directa, P_r , viene dada por:

$$P_r = G + R + C_\theta + D \quad \text{dB} \quad (6)$$

donde:

$$R = 20 \log_{10} |R_i|$$

con $R_i = R_H, R_V$ o R_C según las ecuaciones (3).

Paso 7: La profundidad del desvanecimiento se calcula de forma siguiente:

Paso 7a: La potencia de la señal de referencia (onda directa) es 1 (0 dB);

Paso 7b: La potencia incoherente media de las ondas reflejadas en el mar con respecto a la onda directa (la potencia de la señal propagada por trayectos múltiples) es P_r dB; véase el paso 6;

Paso 7c: La potencia total recibida es $10 \log_{10} \left(1 + 10^{\frac{P_r}{10}} \right)$ dB;

Paso 7d: Calcular la potencia de la señal recibida rebasada para el periodo de tiempo $1 - p\%$. La profundidad del desvanecimiento rebasada para un periodo de tiempo $p\%$ puede obtenerse por medio de la relación entre la potencia de la señal de onda directa y la potencia de la señal rebasada para el periodo de tiempo $1 - p\%$. Para una distribución de probabilidad Nakagami-Rice, la potencia total es 0 dB en la Fig. 1, bajo la hipótesis de que la potencia de la señal recibida rebasada para el periodo de tiempo $1 - p\%$ es A dB.

Paso 7e: Puesto que la potencia total recibida es $10 \log_{10} \left(1 + 10^{\frac{P_r}{10}}\right)$ dB, valor diferente del que se señala en la Fig. 4, la potencia de la señal recibida rebasada para el periodo de tiempo $1 - p\%$ es $A + 10 \log_{10} \left(1 + 10^{\frac{P_r}{10}}\right)$ dB.

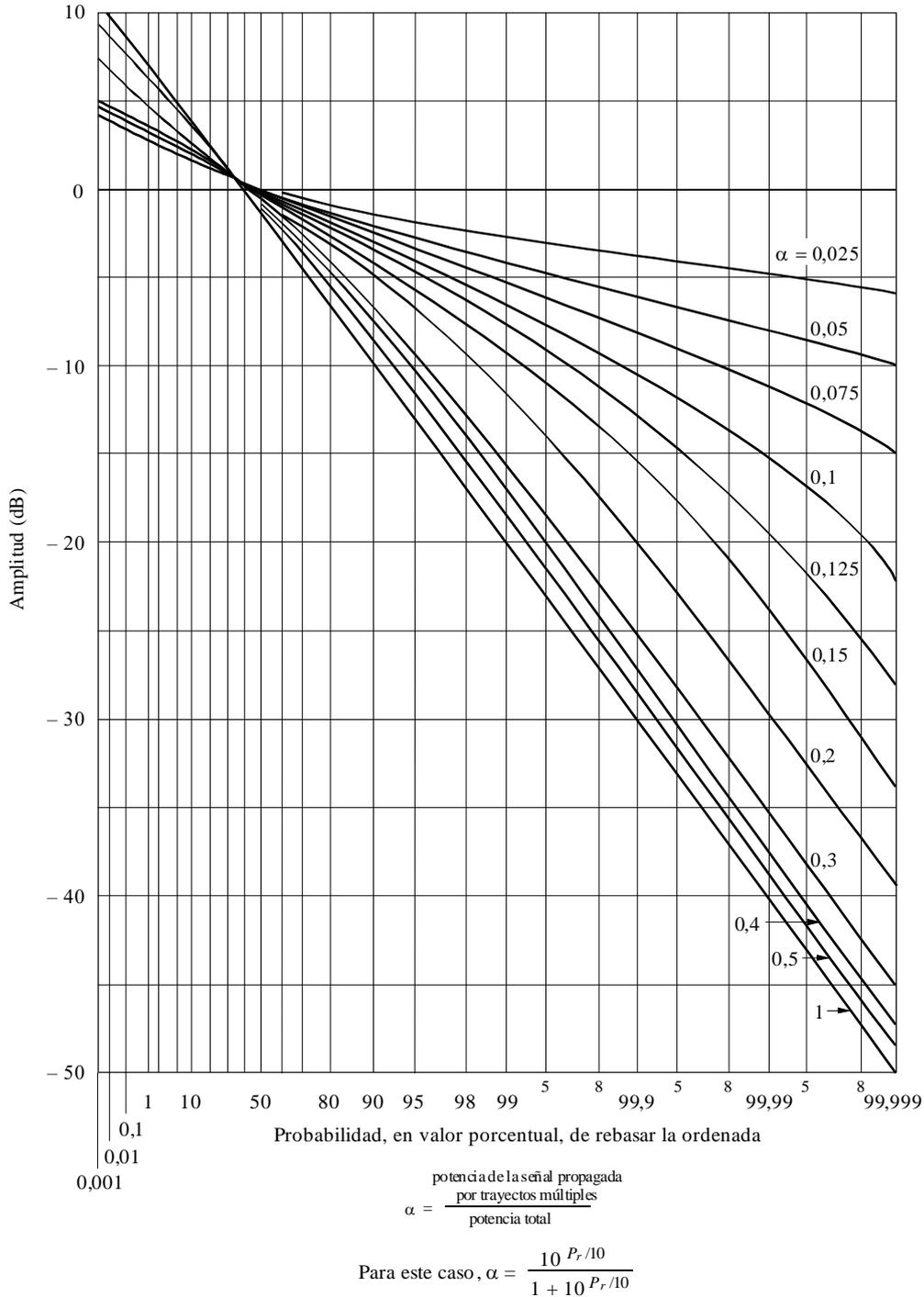
Paso 7f: Habida cuenta de que la profundidad del desvanecimiento es positiva para pérdida de señal, y negativa para la mejora de la misma, la profundidad del desvanecimiento $F_d(p)$ rebasada para $p\%$ es:

$$F_d(p) = 0 - \left[A + 10 \log_{10} \left(1 + 10^{\frac{P_r}{10}}\right) \right] = - \left[A + 10 \log_{10} \left(1 + 10^{\frac{P_r}{10}}\right) \right] \quad \text{dB} \quad (7)$$

FIGURA 1

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

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

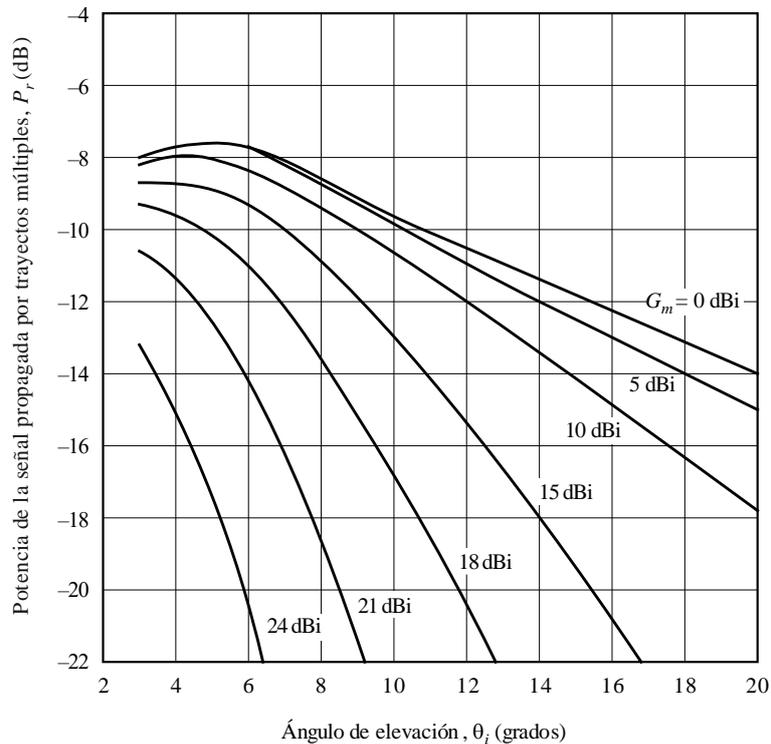


P.0680-01

En la Fig. 2 posterior se representa la potencia multitrayecto media de la componente incoherente obtenida por este método, en función del ángulo de elevación y para diferentes ganancias. Una comparación con el caso de los sistemas móviles marítimos por satélite (Fig. 2 de la Recomendación UIT-R P.680) muestra que en los sistemas móviles aeronáuticos por satélite la potencia de la onda reflejada, P_r , es de 1 a 3 dB menor en ángulos de elevación bajos.

FIGURA 2

Potencia media de la señal propagada por trayectos múltiples con relación a la potencia de la señal directa en función del ángulo de elevación para diferentes ganancias de antena



Frecuencia = 1,54 GHz
 Polarización circular
 $H_a = 10$ km

P.0682-02

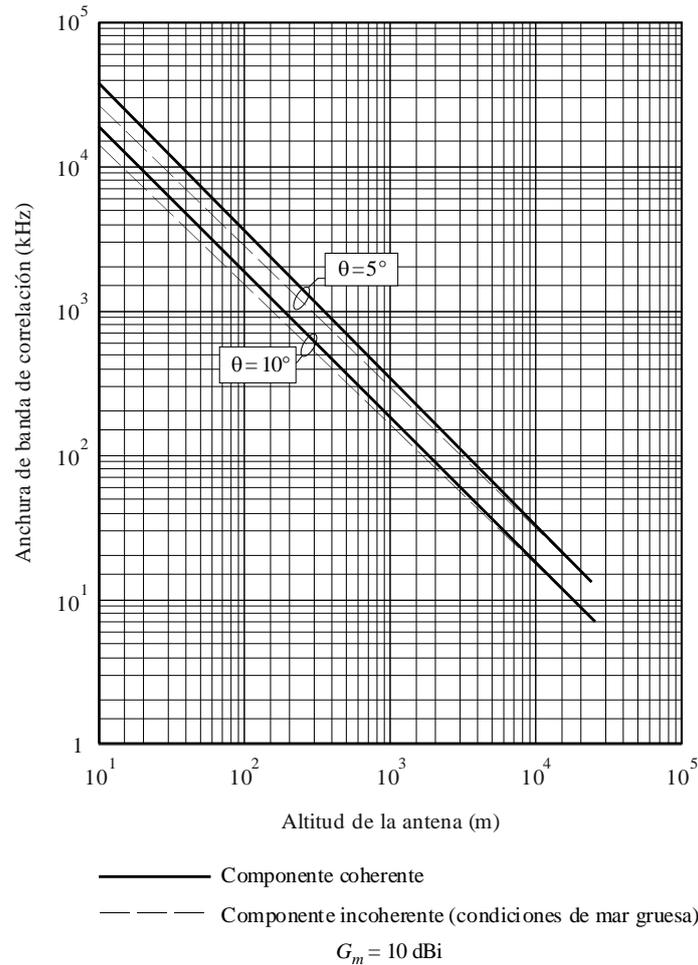
NOTA 1 – Tanto los estudios analíticos como los experimentales han demostrado que para ondas polarizadas circularmente en 1,5 GHz o próximas a esta frecuencia y con una ganancia de antena de 7 dB, la profundidad del desvanecimiento de la señal por trayectos múltiples en condiciones de mar gruesa es de 8 a 11 dB aproximadamente para altitudes de aeronave bajas y moderadas, y de 7 a 9 dB aproximadamente para altitudes elevadas (superiores a 2 km). La profundidad del desvanecimiento multitrayecto es aproximadamente 2 dB menor para una ganancia de antena de 15 dB.

4.2.2 Retardo y anchura de banda de correlación

La señal recibida se compone de una onda directa y ondas reflejadas. Como la componente reflejada experimenta un mayor retardo de propagación que la directa, la señal compuesta recibida puede estar sujeta a desvanecimientos selectivos en frecuencia. La correlación de la señal disminuye al aumentar la separación de frecuencia. La dependencia de la correlación con respecto a la ganancia de la antena es pequeña para ganancias inferiores a 15 dB. La Fig. 3 muestra la relación entre la altura de la antena y la anchura de banda de correlación, definida aquí como la separación de frecuencia para la cual el coeficiente de correlación entre dos ondas es igual a 0,37 (1/e). La anchura de banda de correlación disminuye a medida que aumenta la altura de la antena siendo de 10 a 20 kHz aproximadamente (retardo de 6 a 12 μ s) para una altura de antena de 10 km. Por tanto, el desvanecimiento debido a la propagación por trayectos múltiples que sufren los sistemas aeronáuticos puede tener características selectivas en función de la frecuencia.

FIGURA 3

Anchura de banda de correlación en función de la altitud de la antena para una ganancia de antena de 10 dBi



P.0682-0 3

4.3 Mediciones de los efectos de la propagación por trayectos múltiples debida a reflexión en el mar

Se han realizado amplios estudios en la banda de 1,5 a 1,6 GHz. En este punto se resumen los resultados de estas mediciones para su aplicación al diseño de sistemas.

En el Cuadro 1 se resumen los parámetros de la propagación por trayectos múltiples en el océano observados en las mediciones, completados con los resultados de un modelo analítico. Las dispersiones del retardo indicadas en este Cuadro son las anchuras del perfil de potencia/retardo de la señal con dispersión difusa que llega al receptor. La anchura de banda de correlación indicada es la anchura de banda entre los puntos a 3 dB de la función de autocorrelación de frecuencia (transformada de Fourier del espectro del retardo). La dispersión Doppler se determina a partir de la anchura de la densidad espectral de potencia Doppler. El tiempo de descorrelación es la anchura entre los puntos a 3 dB de la función de autocorrelación temporal (transformada de Fourier inversa del espectro Doppler).

CUADRO 1

**Parámetros de la propagación por trayectos múltiples
según las mediciones en el océano**

Parámetro	Gama medida	Valor típico para el ángulo de elevación especificado		
		8°	15°	30°
Potencia normalizada de la propagación por trayectos múltiples (dB)				
Polarización horizontal	-5,5 a -0,5	-2,5	-1	-1
Polarización vertical	-15 a -2,5	-14	-9	-3,5
Dispersión del retardo ⁽¹⁾ (μs)				
Valor entre puntos a 3 dB	0,25-1,8	0,6	0,8	0,8
Valor entre puntos a 10 dB	2,2 -5,6	2,8	3,2	3,2
Anchura de banda de correlación ⁽²⁾ (kHz)				
Valor entre puntos a 3 dB	70-380	160	200	200
Dispersión Doppler ⁽¹⁾ (Hz)				
Geometría en el plano propio				
Valor entre puntos a 3 dB	4-190	5	70	140
Valor entre puntos a 10 dB	13-350	44 40 ⁽³⁾	180	350
Geometría en el plano transversal				
Valor entre puntos a 3 dB	79-240	79	110	190
Valor entre puntos a 10 dB	180-560	180 80 ⁽³⁾	280	470
Tiempo de descorrelación ⁽²⁾ (ms)				
Valor entre puntos a 3 dB	1,3-10	7,5	3,2	2,2

(1) Bilateral.

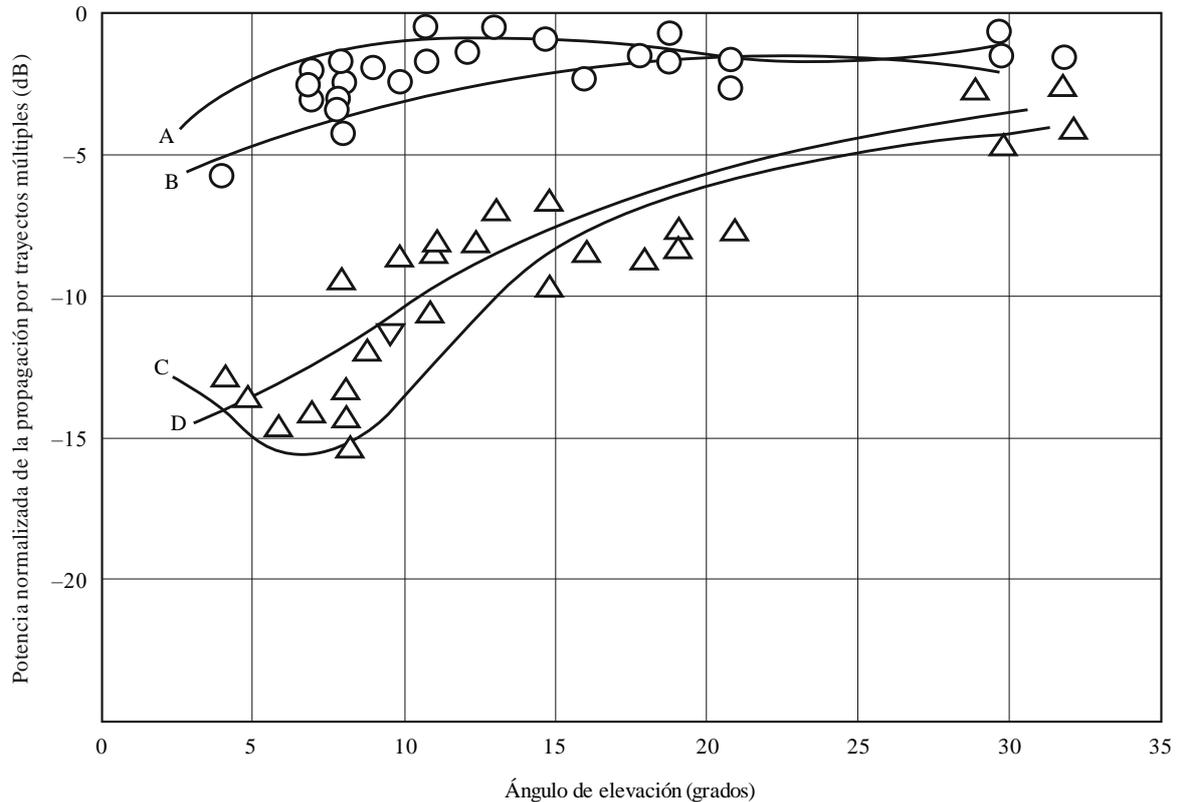
(2) Unilateral.

(3) Datos de un modelo de la propagación por trayectos múltiples para una altitud de aeronave de 10 km y una velocidad de 1 000 km/h.

La Fig. 4 representa la potencia normalizada de la propagación por trayectos múltiples con polarizaciones horizontal y vertical de la antena y en condiciones de mar en calma y de mar gruesa en función del ángulo de elevación, junto con las predicciones obtenidas mediante un modelo físico de las características ópticas. Se encontró que la condición del mar tiene un efecto mínimo para ángulos de elevación superiores a unos 10 grados. La concordancia entre los coeficientes medidos y los predichos para una Tierra plana lisa, modificados por el factor de divergencia de una Tierra esférica, aumenta al apaciguarse el mar.

FIGURA 4

Potencia normalizada de la propagación por trayectos múltiples en el océano en función del ángulo de elevación a 1,6 GHz



O : mediciones con polarización horizontal
 Δ : mediciones con polarización vertical

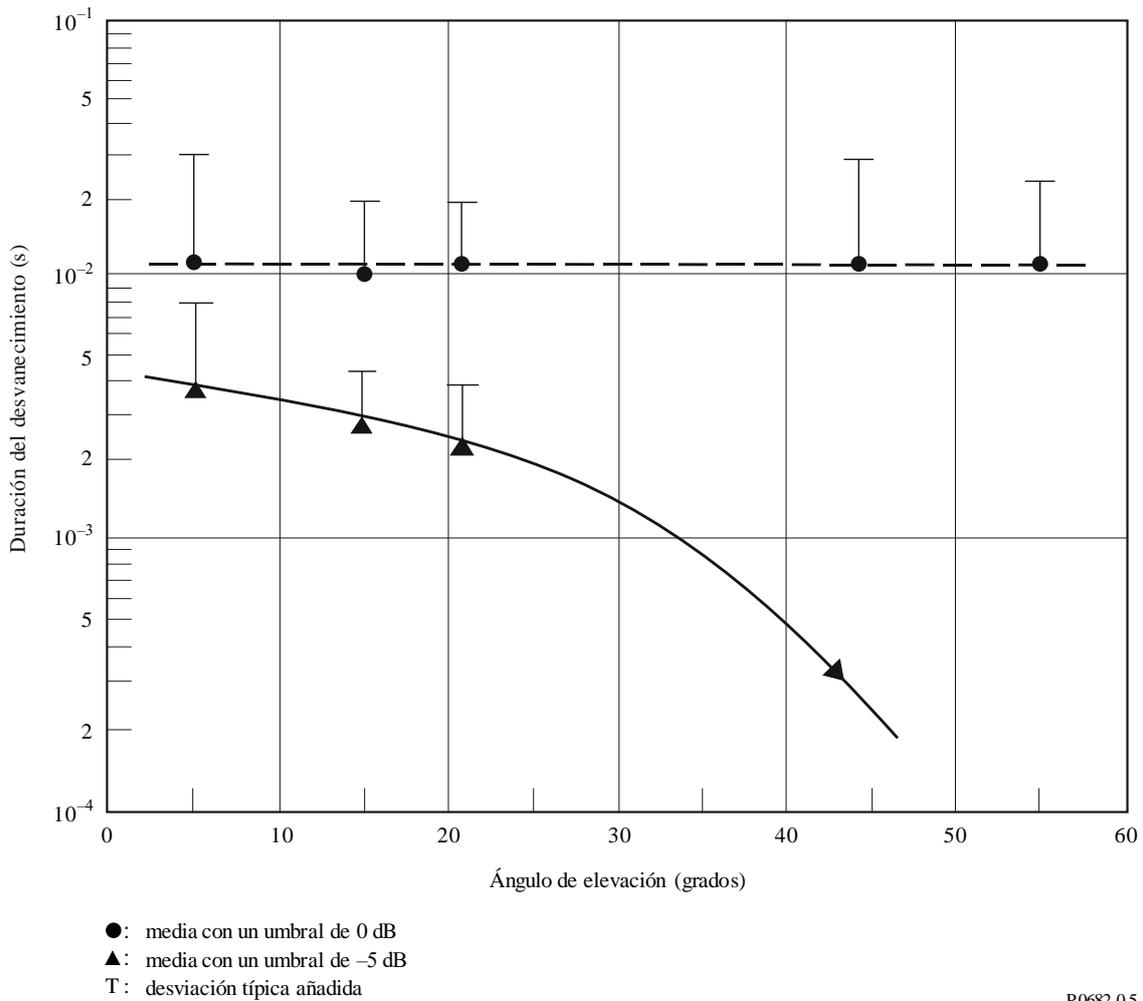
Curvas A : predicción con polarización horizontal, mar en calma
 B : predicción con polarización horizontal, mar gruesa
 C : predicción con polarización vertical, mar en calma
 D : predicción con polarización vertical, mar gruesa

P.0682-0.4

Se han reunido datos de propagación por trayectos múltiples en una serie de mediciones de sistemas móviles aeronáuticos por satélite sobre el Océano Atlántico y partes de Europa. En la Fig. 5 se muestran los valores medios y las desviaciones típicas de la duración de los desvanecimientos en 1,6 GHz en función del ángulo de elevación de esos vuelos. (Para recoger estos datos se utilizó una antena de dipolos cruzados con una ganancia de 3,5 dBi. La aeronave volaba a una altitud nominal de 10 km y a una velocidad nominal respecto al suelo de 700 km/h.)

FIGURA 5

Duración del desvanecimiento en función del ángulo de elevación para polarización circular a 1,6 GHz (ganancia de antena = 3,5 dBi), datos recogidos sobre el Océano Atlántico y Europa occidental



P0682-05

4.4 Mediciones de los efectos de la propagación por trayectos múltiples debida a reflexión en tierra

El Cuadro 2 muestra los parámetros medidos de la propagación por trayectos múltiples durante vuelos sobre tierra; las definiciones de los parámetros son las mismas que para el Cuadro 1. Las señales propagadas por trayectos múltiples en tierra son sumamente variables. No se pudo establecer una dependencia sistemática con respecto al ángulo de elevación, quizá porque la naturaleza del suelo era muy variable (los datos se recogieron sobre suelo húmedo y seco, pantanos, nieve seca y húmeda, hielo, lagos, etc.).

NOTA 1 – Proporción de errores irreducible; el desvanecimiento debido a la propagación por trayectos múltiples en canales móviles produce una proporción de errores irreducible, en el sentido de que su valor no disminuye al aumentar la potencia de la señal directa. Las simulaciones indican que la proporción de errores irreducible es mayor para un canal móvil aeronáutico por satélite que para un canal móvil terrestre por satélite.

CUADRO 2

Parámetros de la propagación por trayectos múltiples según las mediciones en tierra

Parámetro	Gama medida	Valor típico
Potencia normalizada de la propagación por trayectos múltiples (dB)		
Polarización horizontal	–18 a 2	–9
Polarización vertical	–21 a –3	–13
Dispersión del retardo ⁽¹⁾ (μs)		
Valor entre puntos a 3 dB	0,1-1,2	0,3
Valor entre puntos a 10 dB	0,2-3	1,2
Anchura de banda de correlación ⁽²⁾ (kHz)		
Valor entre puntos a 3 dB	150-3 000	600
Dispersión Doppler ⁽¹⁾ (Hz)		
Valor entre puntos a 3 dB	20-140	60
Valor entre puntos a 10 dB	40-500	200
Tiempo de descorrelación ⁽²⁾ (ms)		
Valor entre puntos a 3 dB	1-10	4

⁽¹⁾ Bilateral.

⁽²⁾ Unilateral.

4.5 Modelo de trayectos múltiples para aeronaves durante la aproximación en tierra y el aterrizaje

En los sistemas de navegación y comunicación aeronáuticos deben tomarse en consideración los trayectos múltiples con retardo breve, especialmente para las señales de banda ancha. Las reflexiones en la estructura de las aeronaves causan perturbaciones considerables. La reflexión en tierra y la reflexión en el fuselaje tienen apreciables efectos de propagación, sobre todo durante la aproximación final, cuando la disponibilidad y fiabilidad de la comunicación, así como la exactitud e integridad de la navegación, son de suma importancia.

Si bien el modelo está destinado principalmente a aplicaciones de navegación, también puede utilizarse con cualquier señal de satélite. Sin embargo, dada su finalidad originalmente prevista, se supone que la antena debe colocarse en la parte superior de la cabina (donde suele instalarse la antena de navegación). El modelo completo está destinado a utilizarse como simulador estadístico. Dado que la anchura de banda de las reflexiones es muy reducida, el proceso no permite obtener suficientes valores durante el tiempo de aproximación de 200 s. Para simular un error de navegación estadísticamente válido, el modelo debe utilizarse en numerosas aproximaciones. Para obtener los errores de navegación mínimo, máximo y medio, es necesario promediar los resultados de simulación de dichas aproximaciones.

En la parte de la dirección web del UIT-T relativa a la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones aparece una implementación *software* del modelo.

4.5.1 Efectos físicos

Las características de propagación por trayectos múltiples de las aeronaves receptoras se dividen principalmente en dos partes:

- la estructura de la aeronave; y
- la reflexión en tierra.

La estructura de la aeronave muestra considerables reflexiones únicamente en el fuselaje (cuando la antena se coloca en la parte superior de la cabina). Esta reflexión con muy escaso retardo muestra poca variación en el tiempo y domina el canal.

No se observa una fuerte reflexión en el ala (cuando la antena se coloca en la parte superior de la cabina).

La reflexión en tierra muestra una amplia variación en el tiempo y tiene un efecto Doppler, proporcional a la velocidad de descenso de la aeronave.

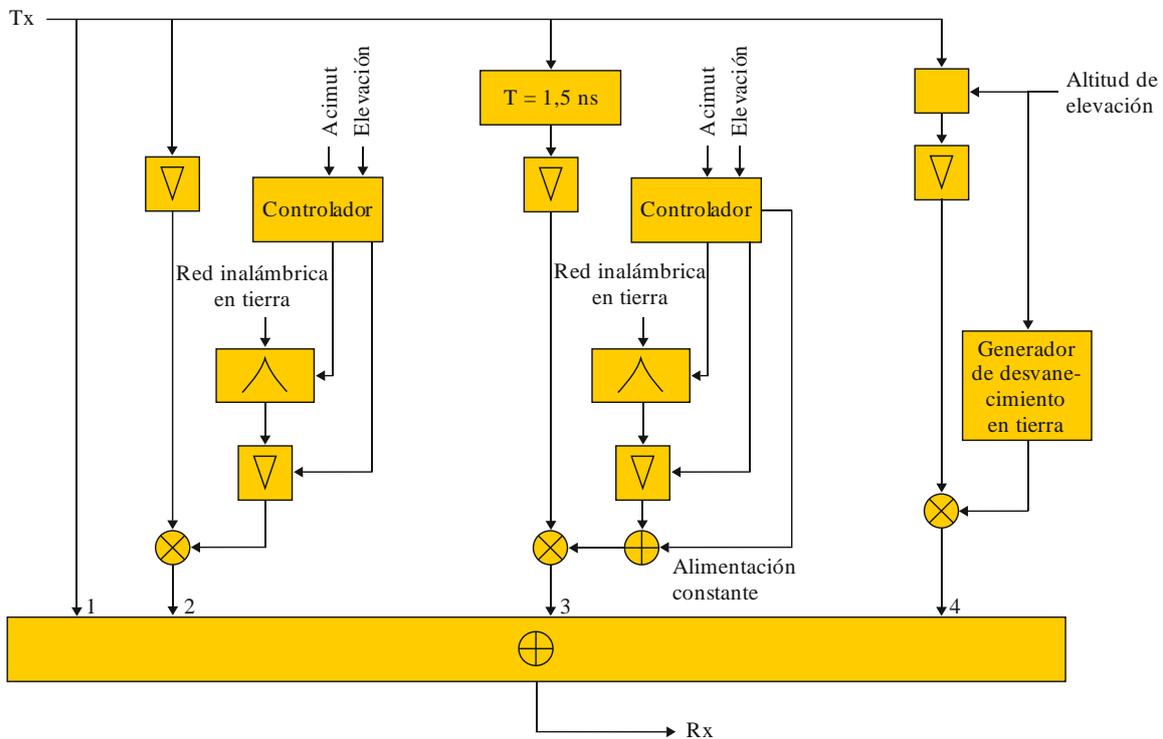
4.5.2 Gama de aplicación del modelo

El modelo puede utilizarse en las frecuencias que oscilan entre 1 GHz y 3 GHz. El acimut del satélite puede variar entre 10 grados y 170 grados, o entre 190 grados y 350 grados. El ángulo de elevación respecto del satélite puede situarse entre 5 y 75 grados.

4.5.3 Modelo

4.5.3.1 Resumen

FIGURA 6
Modelo de canal aeronáutico completo



P.0682-0 6

En la Fig. 6 se muestra el modelo aeronáutico completo para la aproximación final. La primera rama corresponde a la señal directa (Rama 1), seguida del desvanecimiento lineal, que representa la modulación de línea de visibilidad directa (LoS) (Rama 2). La tercera rama (Rama 3) se refiere al proceso de desvanecimiento por trayectos múltiples del fuselaje, que se retrasa en 1,5 ns. La última rama (Rama 4) representa el eco en el suelo, cuyo tiempo de propagación depende de la elevación y la altitud.

Los parámetros de variantes de tiempo de este modelo son los siguientes:

- acimut del satélite, $\varphi(t)$
- elevación del satélite, $\theta(t)$
- altitud de la aeronave (sobre el nivel del mar), $h(t)$, donde t es el tiempo.

Por otra parte, el modelo requiere conocer la geometría y la dinámica de vuelo de la aeronave. A continuación se muestran los coeficientes empíricos de los distintos tipos de aeronaves:

- Vereinigte Flugzeugwerke VFW 614 (ATTAS), que representa un pequeño avión a reacción;
- Airbus A 340, que representa un gran avión comercial.

El acimut y la dependencia de elevación de los procesos de desvanecimiento por trayectos múltiples, que en el diagrama anterior se indican como «controlador», se toman en consideración en la función polinómica utilizada en la ecuación (10). Además, el tiempo de propagación de la reflexión en tierra depende de la elevación y la altitud; véase la ecuación (16).

Los procesos de desvanecimiento y los bloques de variantes temporales incluyen parámetros de trabajo destinados a ajustar el modelo a distintas posiciones del satélite (elevación y acimut). Los diferentes procesos de desvanecimiento dependen en gran medida del tipo de aeronave.

CUADRO 3

Parámetros del modelo canal – Resumen

	Retardo (ns)	Potencia relativa (dB)	Anchura de banda Doppler (Hz)
LoS Componente de CC Proceso de desvanecimiento	0	0 (-14,2 – media)	0 < 0,1
Fuselaje Componente de CC Proceso de desvanecimiento	1,5	-14,2 (-14,2 – media)	< 0,1
Suelo	900-10 (descendente)	-15 a -25	< 20 (modificado para tener en cuenta la velocidad de descenso)

4.5.3.2 Trayecto directo

Además de la LoS (Rama 1), este trayecto es objeto de una fuerte modulación (Rama 2), que tiene una distribución de amplitud Riciana. Este proceso de desvanecimiento se genera como se muestra en las ecuaciones (8), (9), (10) y (11).

4.5.3.3 Reflexión en el ala

Si la antena se coloca en la parte superior de la cabina (obligatorio en el caso de las antenas de navegación por satélite), el rayo, al entrar, se dispersa por una amplia gama de valores angulares. Por consiguiente, la potencia total de la reflexión en el ala es desdeñable (inferior a -35 dB).

En el caso de las antenas situadas en otras posiciones (por ejemplo, en el caso de los sistemas de comunicaciones), especialmente entre las alas, es previsible que una parte de la reflexión se produzca en el ala.

4.5.3.4 Reflexión en el fuselaje

Para generar una serie temporal de la reflexión en el fuselaje es indispensable conocer su densidad espectral de potencia. El modelo se dirige por medio de un proceso estocástico, p_{proc} . Dicho proceso puede generarse filtrando el ruido blanco complejo con la densidad espectral de potencia obtenida según la ecuación (8), donde b_2 y b_3 son los coeficientes del proceso exponencial:

$$p_{proc}(\text{dB}) = b_1 + b_2 \cdot e^{b_3 \cdot |f|} \quad (8)$$

Además de este componente de ruido, la señal de reflexión en el fuselaje contiene un elemento medio (DC) de $-14,2$ dB, y la constante b_1 se determina como sigue:

$$b_1 = -14,2 - media \quad \text{dB} \quad (9)$$

Como se ha mencionado anteriormente, el ángulo de elevación del trayecto válido oscila entre 10° y 75° . El acimut puede variar entre 15 y 165 grados, o 195 y 335 grados, respectivamente.

Para obtener la *media* y los coeficientes b_2 y b_3 , existe una función polinómica bidimensional de 4° orden para cada parámetro (*media*, b_2 , b_3). A continuación se muestra un ejemplo:

$$media(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} \theta^4 & \theta^3 & \theta^2 & \theta & 1 \end{bmatrix} \cdot A_{media} \cdot \begin{bmatrix} \varphi^4 \\ \varphi^3 \\ \varphi^2 \\ \varphi \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

proporciona el valor medio en función de la elevación θ y el acimut φ , donde A_{media} es una matriz de 5 por 5 de coeficientes polinómicos. Los coeficientes b_2 y b_3 , se calculan de forma similar.

Para los dos ejemplos de aeronaves (ATTAS y A340), las matrices se calculan respectivamente como sigue:

$$A_{media,ATTAS} =$$

$$\begin{bmatrix} -2,0057e-12 & 5,0499e-10 & -4,6114e-8 & 1,8053e-6 & -2,4773e-5 \\ 2,8598e-10 & -7,4259e-8 & 7,0553e-6 & -2,9116e-4 & 0,0043 \\ -1,1568e-8 & 3,2474e-6 & -3,3846e-4 & 0,0156 & -0,2698 \\ 3,8681e-8 & -2,2536e-5 & 0,0038 & -0,2512 & 6,3140 \\ 1,9434e-6 & -3,5747e-4 & 0,0133 & 0,8133 & -28,1329 \end{bmatrix}$$

$$A_{b3,ATTAS} =$$

$$\begin{bmatrix} -1,8398e-12 & 4,2182e-10 & -3,3813e-8 & 1,0855e-6 & -1,0875e-5 \\ 2,6665e-10 & -6,0897e-8 & 4,8490e-8 & -1,5346e-4 & 0,0015 \\ -1,2870e-8 & 2,9171e-6 & -2,2947e-4 & 0,0071 & -0,0629 \\ 2,3542e-7 & -5,2520e-5 & 0,0040 & -0,1193 & 0,9153 \\ 1,2058e-6 & 2,5797e-4 & -0,0187 & 0,5027 & -4,1128 \end{bmatrix}$$

$$A_{b2,ATTAS} =$$

$$\begin{bmatrix} -3,9148e-11 & 8,8672e-9 & -7,0048e-7 & 2,2069e-5 & -2,1492e-4 \\ 6,0699e-9 & -1,3708e-6 & 1,0784e-4 & -0,0034 & 0,0322 \\ -3,2203e-7 & 7,2344e-5 & -0,0057 & 0,1747 & -1,6206 \\ 6,7649e-6 & -0,0015 & 0,1162 & -3,5328 & 31,6814 \\ -4,4741e-5 & 0,0098 & -0,7383 & 21,9981 & -142,3524 \end{bmatrix}$$

(11)

$$A_{media,A340} =$$

$$\begin{bmatrix} -2,6220e-12 & 6,0886e-10 & -5,0686e-8 & 1,8074e-6 & -2,3633e-5 \\ 4,3848e-10 & -1,0231e-7 & 8,6113e-6 & -3,1465e-4 & 0,0044 \\ -2,3577e-8 & 5,5538e-6 & -4,7815e-4 & 0,0184 & -0,2872 \\ 3,9552e-7 & -9,2657e-5 & 0,0082 & -0,3431 & 6,9937 \\ -1,5225e-6 & 3,3690e-4 & -0,0312 & 1,7110 & -32,8066 \end{bmatrix}$$

$$A_{b3,A340} =$$

$$\begin{bmatrix} -1,2021e-12 & 2,7780e-10 & -2,2626e-8 & 7,4413e-7 & -7,5120e-6 \\ 1,7647e-10 & -4,0725e-8 & 3,3131e-6 & -1,0855e-4 & 0,0011 \\ -8,6470e-9 & 1,9871e-6 & -1,6099e-4 & 0,0052 & -0,0488 \\ 1,6123e-7 & -3,6656e-5 & 0,0029 & -0,0946 & 0,8204 \\ -8,5647e-7 & 1,8942e-4 & -0,0149 & 0,4826 & -5,5011 \end{bmatrix}$$

$$A_{b2,A340} =$$

$$\begin{bmatrix} -3,1880e-11 & 7,2724e-9 & -5,8454e-7 & 1,9069e-5 & -1,9707e-4 \\ 4,7229e-9 & -1,0775e-6 & 8,6761e-5 & -0,0028 & 0,0293 \\ -2,3471e-7 & 5,3437e-5 & -0,0043 & 0,1413 & -1,4541 \\ 4,4756e-6 & -0,0010 & 0,0812 & -2,6731 & 27,5448 \\ -2,5361e-5 & 0,0056 & -0,4459 & 14,8917 & -109,1083 \end{bmatrix}$$

4.5.3.5 Reflexión en tierra

La reflexión en tierra se modifica por el efecto Doppler en función de la velocidad de descenso de la aeronave (velocidad vertical), $v_{vert}(t)$. La desviación Doppler se calcula como sigue:

$$f_{tierra}(t) = \frac{v_{vert}(t)}{\lambda} \tag{12}$$

donde λ corresponde a la longitud de onda. Alrededor de la frecuencia media, que se calcula mediante la ecuación (12), el espectro Doppler de la reflexión en tierra se representa adecuadamente por medio de la distribución Gaussiana normalizada:

$$P_{Gr(dB)} = P_{g(dB)} + 20 \log_{10} \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{f^2}{2\sigma^2}} \right) \tag{13}$$

P_g corresponde a la potencia de la reflexión en tierra obtenida mediante el modelo de Markov, donde la desviación se calcula experimentalmente:

$$\sigma = 2,92 \text{ Hz} \tag{14}$$

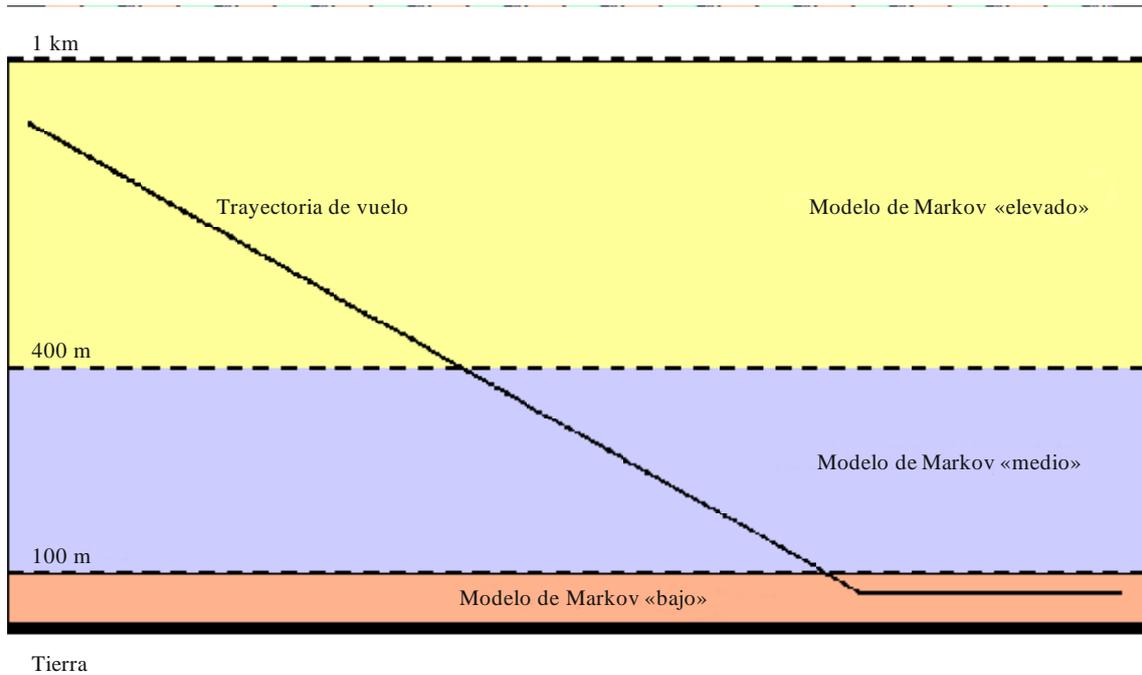
Para establecer un modelo de reflexión en tierra, la aproximación final se divide en tres zonas de altitud distintas (elevada, media y baja). En cada zona, la reflexión en tierra se caracteriza por un modelo de estado de Markov.

CUADRO 4

Regiones de altitud para el modelo de Markov

	De	A
Nivel «elevado»	1 000 m	400 m
Nivel «medio»	400 m	100 m
Nivel «bajo»	100 m	10 m

FIGURA 7
 Perfil del modelo de reflexión en tierra



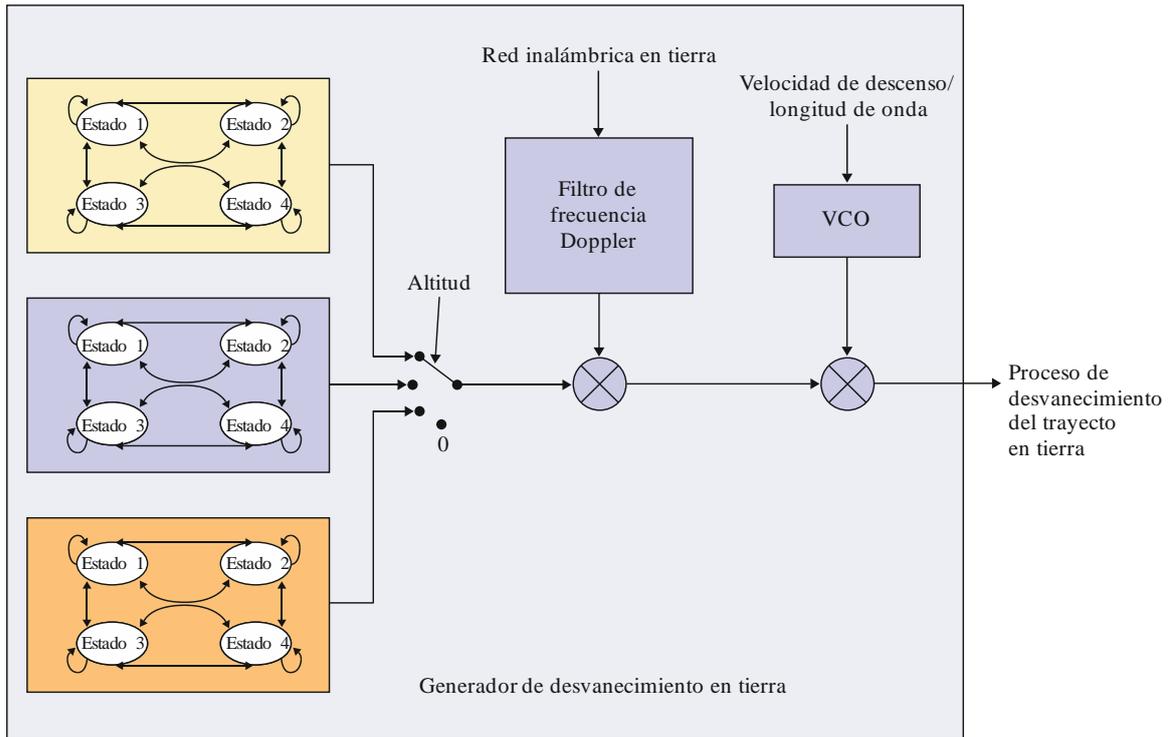
P0682-0 7

CUADRO 5
 Estados del modelo de Markov
 de desvanecimiento en tierra

Estado	Potencia (dB)
1 ⁽¹⁾	< -25
2	-23
3	-19
4	-15

⁽¹⁾ Ausencia de reflexión en tierra.

FIGURA 8
Esquema de un módulo generador de desvanecimiento en tierra



P.0682-08

Las probabilidades de transición de Markov se obtienen a partir de los datos de medición cuantificados. La matriz de transición P , donde $P_{x,y}$ es la probabilidad de cambio del estado x al estado y , se determina para cada región de altitud de forma independiente.

El proceso de desvanecimiento en tierra se genera a partir de un modelo de Markov dependiente de la altitud para una frecuencia de muestreo de 25,4 Hz. Cabe señalar que dichas probabilidades de transición son válidas únicamente para esta frecuencia. Las altitudes de transición se indican en el Cuadro 4 y se muestran en la Fig. 7.

Los estados de potencia saliente del modelo se muestran en el Cuadro 5 y se ilustran en la Fig. 8.

Las mediciones dieron lugar a las siguientes matrices de probabilidad de transición:

$$P_{400-1500} = \begin{bmatrix} 0,9866 & 0,0087 & 0,0047 & 0 \\ 0,6087 & 0,3043 & 0,0870 & 0 \\ 0,2143 & 0,3571 & 0,4286 & 0 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3334 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_{100-400} = \begin{bmatrix} 0,9842 & 0,0130 & 0,0028 & 0 \\ 0,6667 & 0,2222 & 0,0889 & 0,0222 \\ 0,0667 & 0,1167 & 0,5000 & 0,3166 \\ 0 & 0 & 0,3279 & 0,6721 \end{bmatrix}$$

$$P_{10-100} = \begin{bmatrix} 0,9645 & 0,0310 & 0,0045 & 0 \\ 0,7308 & 0,1538 & 0,1154 & 0 \\ 0,6250 & 0,1250 & 0,2500 & 0 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3334 & 0 \end{bmatrix}$$

(15)

$$P_{0-10} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

donde P_{x-y} corresponde a la probabilidad de transición en la región de altitud $h(t) \geq x$ y $h(t) < y$.

Cabe indicar que este modelo de Markov permite describir un aterrizaje en el aeropuerto de Graz (Austria). Esa región está dominada por bosques, praderas y algunas calles. Las condiciones meteorológicas, el entorno, la geometría del vuelo y muchos otros parámetros pueden influir en las características del eco en tierra. Por consiguiente, estas cifras deben considerarse parámetros que el usuario ha de adaptar si se quieren aplicar en otros tipos de regiones. Igualmente, toda aproximación en agua (salada) o una región con numerosos canales daría lugar a resultados bastante diferentes.

El tiempo de propagación de la reflexión en tierra es una función del ángulo de elevación de la trayectoria que se puede calcular fácilmente si se parte del supuesto de que alrededor del aeropuerto el medio es plano

$$\tau_{tierra}(t) = \frac{2 \cdot h(t) \cdot \text{sen}(\theta)}{c} \quad (16)$$

donde:

- c : velocidad de la luz
 - $h(t)$: altitud de la aeronave
 - θ : ángulo de elevación.
-