

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R P.1321-4
(09/2013)

**Factores de propagación que afectan a los
sistemas con técnicas de modulación digital
en ondas kilométricas y hectométricas**

Serie P
Propagación de las ondas radioeléctricas



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 el Anexo 1 a 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, 2014

© UIT 2014

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.1321-4

Factores de propagación que afectan a los sistemas con técnicas de modulación digital en ondas kilométricas y hectométricas

(Cuestión UIT-R 225/3)

(1997-2005-2007-2009-2013)

Cometido

La presente Recomendación facilita información sobre las características de propagación de las ondas de superficie y las ondas ionosféricas en bandas de ondas kilométricas y hectométricas que pueden afectar la utilización de métodos de modulación digital en esas bandas.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que los métodos de modulación digital en ondas kilométricas y hectométricas se estudian actualmente;
- b) que se requiere información sobre las características de propagación en dichas frecuencias al elaborar métodos de modulación,

recomienda

tomar en consideración la información presentada en el Anexo 1 al elaborar métodos de modulación digital para la radiodifusión en ondas kilométricas y hectométricas.

Anexo 1**1 Introducción**

La mayoría de los servicios de radiodifusión que utilizan bandas de ondas kilométricas y hectométricas se basan en las características del modo de propagación de las ondas de superficie (véase la Recomendación UIT-R P.368). El margen de cobertura, en horario diurno y sin interferencias, está limitado por la intensidad de ruido radioeléctrico, descargas atmosféricas y actividades humanas, (véase la Recomendación UIT-R P.372), así como por la relación señal/ruido requerida. En horario vespertino y nocturno, adquieren importancia los modos de onda ionosférica, (véase la Recomendación UIT-R P.1147). Para la modulación de amplitud analógica dichos modos limitan la cobertura, ya que la interferencia de onda entre la onda de superficie y los modos de onda ionosférica, que son variables y sufren retardos de fase, da por resultado una calidad de señal insatisfactoria. Las señales de onda ionosférica que provienen de otras transmisiones distantes pueden agregar también importantes interferencias nocturnas, limitando probablemente la cobertura del servicio a las bandas en las que la onda de superficie proporciona una señal suficientemente intensa. No se consideran en el presente Anexo los aspectos de interferencia producida por otras señales.

Los métodos de modulación digital pueden verse afectados también por la presencia de modos de señal con retardo, pero un diagrama de modulación adecuado puede neutralizar o incluso aprovechar dicho efecto. Este Anexo presenta algunos modelos sumamente sencillos para este ámbito de trayectos múltiples y que, según se espera, convendrán al diseño de métodos de modulación. Según qué método de modulación se escoja, pueden requerirse métodos de predicción más detallados para cumplir con las tareas de planificación del servicio.

2 Modos de propagación

2.1 Modo de onda de superficie

Es posible que la onda de superficie no siempre sea constante (véase el § 4). Como se indica en la Recomendación UIT-R P.368, la amplitud de la señal depende de la distancia y las características eléctricas de la superficie. Además, la amplitud de la señal tampoco se mantiene constante ante pequeños cambios de ubicación (desde varios centenares de metros).

2.2 Modos de onda ionosférica

En horario diurno, la atenuación de la señal en la parte inferior o región D de la ionosfera impide efectivamente la propagación de las ondas ionosféricas. En este Anexo, la atención se concentra en las condiciones nocturnas, en que la propagación de ondas ionosféricas puede ser importante.

La capa E de la ionosfera se desintegra después de la puesta del sol, pero la frecuencia crítica, f_oE , se encontrará en la banda de radiodifusión de ondas hectométricas al menos durante cierto tiempo en las primeras horas de la noche. Las señales en frecuencias inferiores a la frecuencia crítica serán reflejadas siempre por la capa E y se admitirán también reflexiones múltiples. Las señales en frecuencias mayores quizás continúen reflejándose en la capa E, alcanzando particularmente distancias mayores, pero algunas señales atravesarán la capa E para reflejarse en la región F superior. Aplicando un modelo sencillo para la capa E, la Fig. 1 ilustra los modos disponibles de señal para tres frecuencias en la banda de ondas hectométricas, indicando cómo la disponibilidad de modos varía con la extensión de la superficie y a lo largo del tiempo después de la puesta del sol. Estos modos sufrirán retardos temporales respecto del modo de onda de superficie.

La Recomendación UIT-R P.1147 proporciona predicciones relativas a la potencia de señal compuesta para los modos disponibles de ondas ionosféricas, por lo que no contiene la información necesaria sobre las amplitudes relativas de los distintos modos. En cambio, la Recomendación UIT R P.684 sí suministra la información, aunque en primera instancia concebida para frecuencias inferiores a 500 kHz. Indica en particular valores del coeficiente de reflexión ionosférica bajo condiciones de manchas solares mínimas según resultados experimentales y aplicando determinadas hipótesis contenidas en dicha Recomendación.

3 Dispersión en el tiempo por trayectos múltiples

Aplicando los sencillos modelos de propagación arriba mencionados, la Fig. 2 indica los valores medios esperados de intensidad de campo y los retardos relativos en el tiempo correspondientes a tres extensiones, 100, 200 y 500 km, y a dos frecuencias, 700 kHz y 1 MHz. Las intensidades de campo corresponden a 1 kW p.i.r.e. y no consideran el efecto del diagrama de radiación vertical de la antena transmisora, el cual podría reducir el nivel de las señales de las ondas ionosféricas a distancias más cortas.

El modo que se muestra a 0 ms corresponde a la onda de superficie y se presentan intensidades de campo para tres valores de conductividad de la superficie, 5 S/m (mares), 10^{-2} (superficie de buena calidad) y 10^{-3} (superficie de baja calidad).

Los componentes correspondientes a las ondas ionosféricas están marcados con el modo correspondiente y los niveles representan aproximadamente las intensidades medianas de campo registradas cuatro horas después de la puesta del sol bajo condiciones de manchas solares mínimas.

FIGURA 1
Modos de propagación disponibles

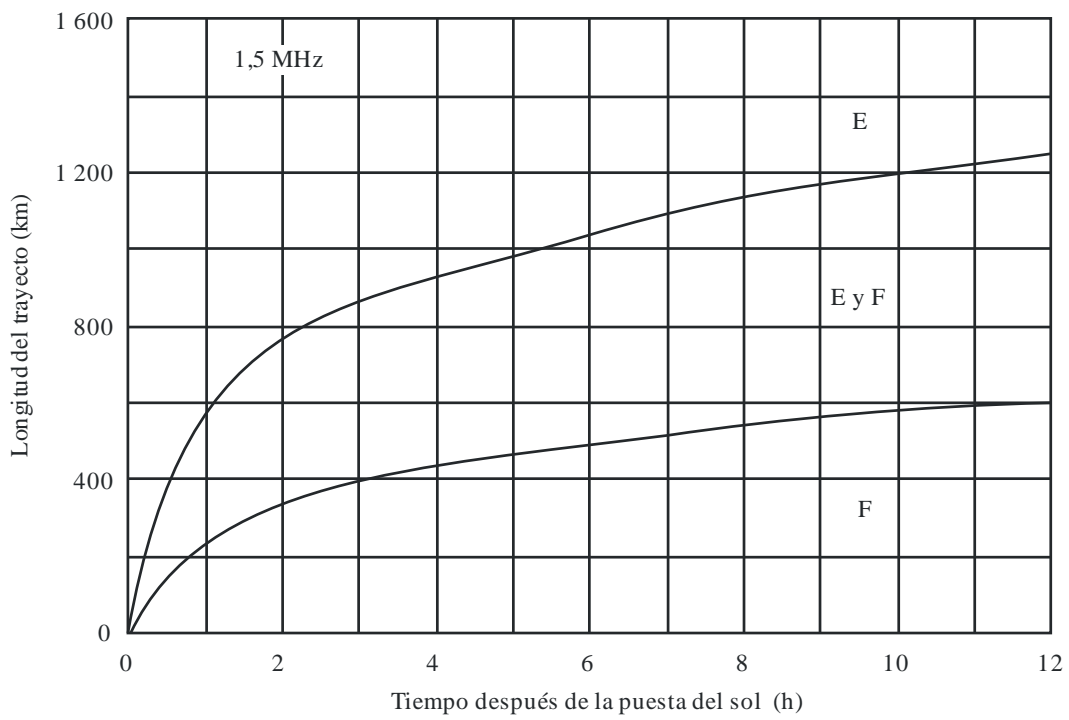
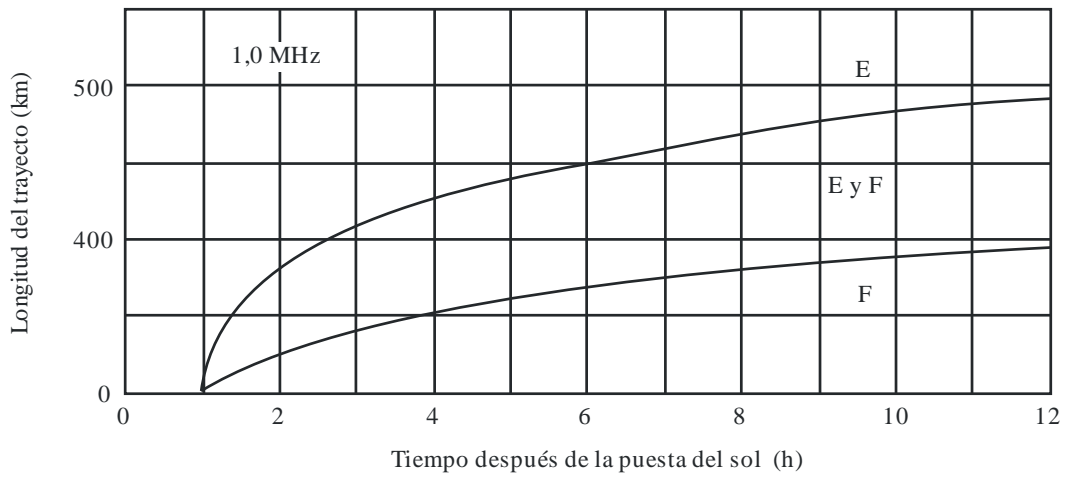
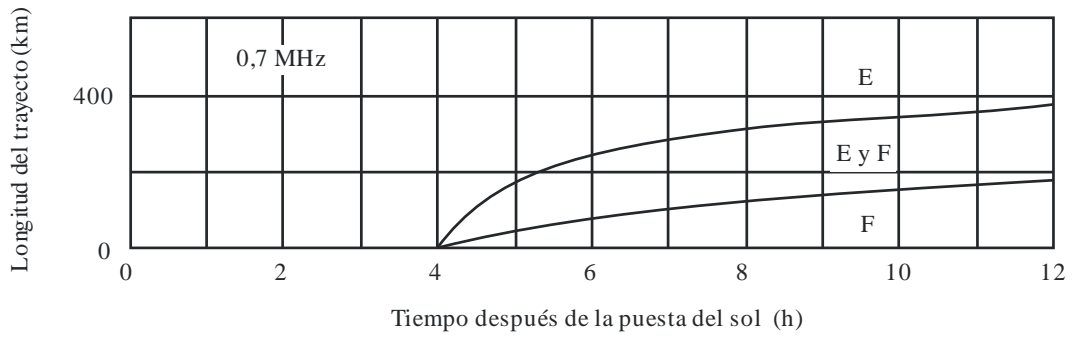
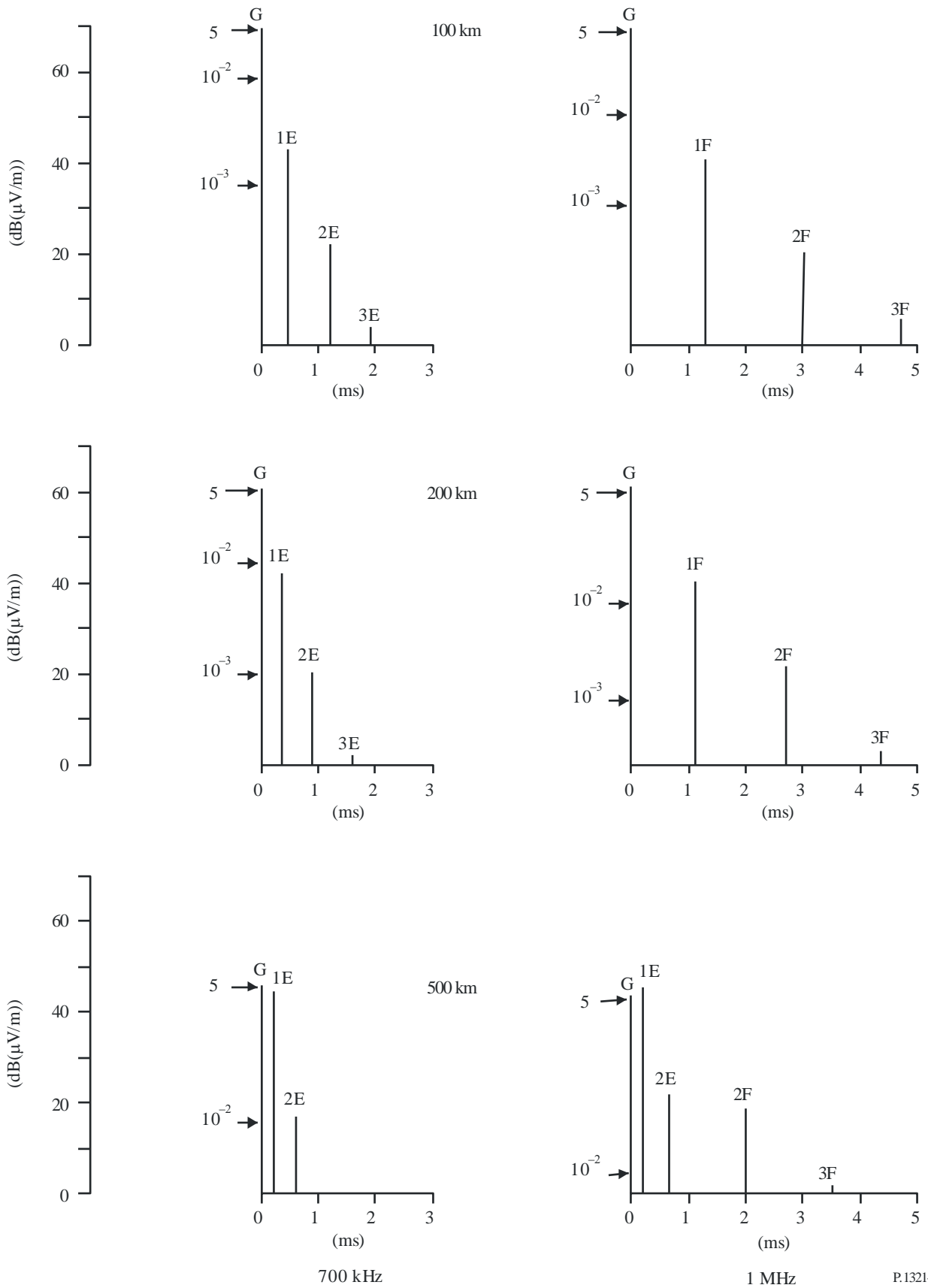
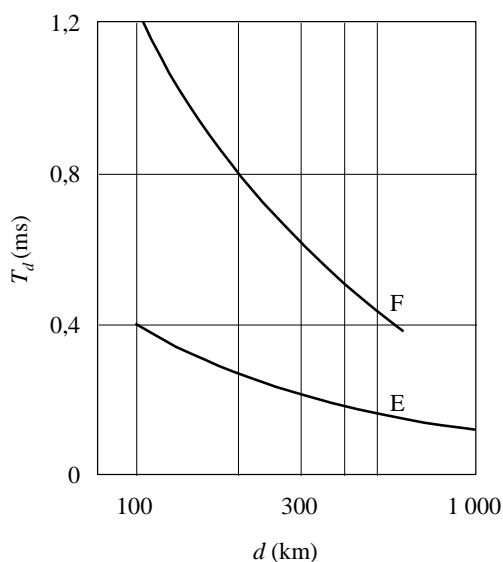


FIGURA 2
Ejemplos de dispersión del retardo en el tiempo



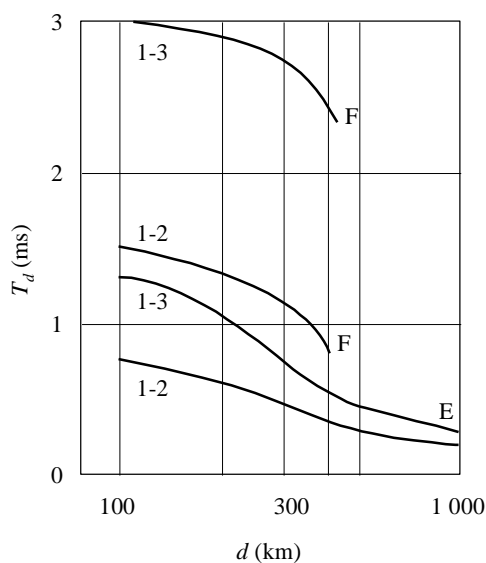
La Fig. 3 indica el retardo de los modos de propagación de ondas ionosféricas con un solo salto en las regiones E y F respecto de la onda de superficie para distancias mayores de 1 000 km, mientras que la Fig. 4 proporciona los retardos relativos entre los modos de onda ionosférica con una reflexión o con reflexiones múltiples.

FIGURA 3
Retardo relativo de una señal de onda ionosférica respecto de una señal de onda de superficie



P.1321-03

FIGURA 4
Retardo recíproco de señales de onda ionosférica para diferentes números de reflexiones en la ionosfera



P.1321-04

La gama de las distancias para las cuales las amplitudes relativas a la señal de onda de superficie y de onda ionosférica son similares es de especial interés, puesto que el desvanecimiento presente en dicha zona es particularmente severo. Se ha denominado «zona de desvanecimiento oscuro» y suele indicar el límite del alcance de una radiodifusión de buena calidad en ondas hectométricas.

4 Variabilidad

4.1 Variaciones temporales de la señal durante el día

4.1.1 Variaciones estacionales

La intensidad de campo de las ondas terrenales puede variar con la temperatura invernal. La variación media anual (es decir, la diferencia entre los valores medianos mensuales de la intensidad de campo en los meses de invierno y verano) para la banda 500-1 000 kHz figura en el Cuadro 1 para latitudes del hemisferio norte donde la temperatura media en enero es inferior a 4° C aproximadamente.

CUADRO 1

Temperatura media en el mes de enero en el hemisferio norte, (°C)	4	0	-10	-16
Variación de la intensidad de campo en los meses de invierno y verano (dB)	4	8	13	15

En ondas kilométricas, la gama de variación de la intensidad de campo en latitudes medias con clima continental (mediciones efectuadas en Europa continental y la región Siberiana) depende de la distancia y la frecuencia, según el parámetro $q = d \cdot f^{1/2}$, donde d es la distancia (km) y f es la frecuencia (MHz). Los valores de $q < 500$, aproximadamente, indican la variación de las ondas de superficie, y los valores superiores, $q > 500$, se refieren a las ondas ionosféricas.

Figuran a continuación las fórmulas correspondientes a las gamas de variación:

- para trayectos con pequeña proporción de zona boscosa:

$$U_{s/w} = 3 + 2 \times 10^{-5} \times q^2 + 0,005q \quad \text{dB}$$

- para trayectos con gran proporción de zona boscosa:

$$U_{L/w} = 6,409 \times \ln(q) - 21,124 \quad \text{dB}$$

Aquí, los índices s/w y L/w representan una pequeña proporción de zona boscosa (aproximadamente hasta el 30%) y una gran proporción de zona boscosa (más del 50%), respectivamente.

4.1.2 Variación del valor mediano de la hora de una día a otros

La desviación cuadrática media (σ_L para ondas kilométricas y σ_M para ondas hectométricas) de los valores medianos horarios de la intensidad de campo respecto a los valores medianos mensuales en ondas kilométricas depende de la longitud del trayecto, mientras que en ondas hectométricas depende de la frecuencia.

En ondas kilométricas, en latitudes medias con una proporción media de zona boscosa, la dependencia es:

$$\sigma_L = 0,073 d^{0,5} + 0,00122 d \quad \text{dB}$$

En ondas hectométricas, el error cuadrático medio (ECM) con frecuencia para trayectos de 20 km y 120 km sin división en estaciones, es:

$$\sigma_M = 0,0018f + 0,6 \quad \text{dB}$$

En estas ecuaciones, σ_L , σ_M son el valor cuadrático medio en dB, d es la distancia en km, f es la frecuencia en kHz.

4.2 Variaciones de una señal durante el día de un lugar a otro

En ondas hectométricas, los cambios de nivel de una señal entre localizaciones separadas por distancias del orden de 1 km alcanzan valores de desviación típica similares en diferentes partes del mundo. La distribución de probabilidad coincide prácticamente con una ley log-normal con desviación cuadrática media $\sigma = 3,7$ dB, como se indica en la Fig. 5.

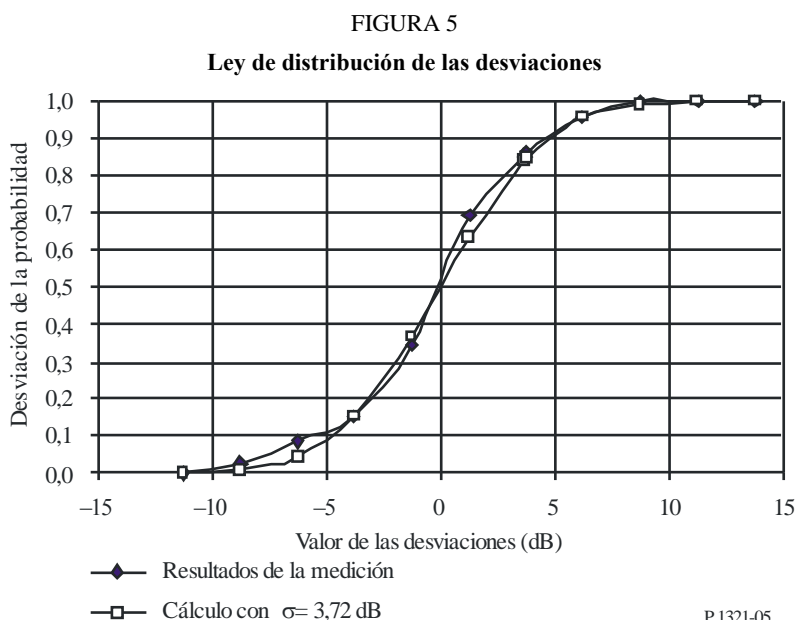
En calles y zonas bajo condiciones urbanas, la desviación típica también alcanza valores próximos a 4 dB. En partes de la ciudad con elevado índice de construcción, especialmente a pequeñas distancias del transmisor (hasta 1 km), la desviación típica aumenta y llega hasta 7-8 dB. En el interior de los edificios, y sólo excepcionalmente, la absorción adicional puede llegar a 20 dB.

4.3 Variaciones de una señal durante la noche

Los modos de ondas ionosféricas registrarán a largo plazo variaciones de unas noches a otras, donde los valores medianos horarios presentan una distribución logarítmica normal con un margen semi-interdecilo que va de 3,5 a 9 dB. En el curso de una hora, el desvanecimiento de los distintos modos presenta también una distribución logarítmica normal; se conocen pocos datos de mediciones, pero cabe suponer un valor típico de la desviación en cerca de 3 dB. La frecuencia de desvanecimiento se cifra entre 10 y 30 desvanecimientos/hora.

El Apéndice 1 al Anexo 1 desarrolla la distribución de desvanecimientos de la señal para los casos en que se requiere conocer la amplitud compuesta de los modos de onda de superficie y de onda ionosférica, es decir, cuando los modos no pueden separarse en el sistema receptor.

El desplazamiento de frecuencia que se produce con los modos de propagación por onda ionosférica, debido al efecto Doppler sobre la reflexión en las capas ionosféricas en movimiento, será reducido.



4.4 Características de excesos y desvanecimientos en los canales ionosféricos en ondas kilométricas y hectométricas

Para el análisis y la planificación de los sistemas de radiocomunicaciones con modulación digital en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas, las características de los valores medios y la dispersión de la señal parecen estar insuficientemente descritas. Es necesario tener en cuenta propiedades más detalladas de los excesos y desvanecimientos y, en particular, debe conocerse la distribución de probabilidad de las duraciones de los excesos y desvanecimientos para diversos

niveles de la relación señal/interferencia. Las características estadísticas de los excesos y desvanecimientos se obtuvieron para un periodo de dos años en dos enlaces, uno de ondas kilométricas (1 550 km a 155 kHz) y uno de ondas hectométricas (860 km a 539 kHz), y se indican en el siguiente Apéndice 2. Los resultados se refieren a latitudes geográficas medias del hemisferio oriental y a una actividad solar (número de manchas solares) moderada (SSN \approx 40).

En el Apéndice 2 aparecen en los Cuadros 3 y 4 el número de excesos y desvanecimientos por hora en cada enlace. Las Figuras 6 y 7 representan los diagramas de dispersión del número de duraciones en exceso (%) para el umbral mediano en cada enlace.

5 Conclusiones

La Recomendación UIT-R P.1407 define un conjunto de parámetros que sirven para la descripción de los efectos de la propagación por trayectos múltiples. Observando atentamente la Fig. 2 podrá determinarse que la «ventana de retardo», que contiene digamos más del 98% de la energía total, es inferior a 3 ms. Puede observarse que, bajo ciertas circunstancias, la componente inicial de propagación por trayectos múltiples no será la de mayor amplitud.

Apéndice 1 al Anexo 1

La amplitud de señal compuesta e , correspondiente a la combinación de una señal constante de onda de superficie y una señal de onda ionosférica de distribución logarítmica normal, se obtiene mediante la suma de potencias, tal como sigue:

$$e = \sqrt{e_e^2 + e_i^2}$$

en que e_e y e_i representan, respectivamente, los niveles de los componentes de onda de superficie y de onda ionosférica, generalmente expresados en $\mu\text{V/m}$.

La componente de onda ionosférica, e_i , presenta una distribución logarítmica normal, tal como se describe en la Recomendación UIT-R P.1057, ecuación (6). Para mayor comodidad se simula también la componente de onda de superficie con distribución logarítmica normal, y el resultado final se obtiene colocando su desviación típica en 0 dB.

La combinación de dos distribuciones logarítmicas normales resulta en otra distribución logarítmica normal en la que el nivel medio es la suma de los respectivos niveles medios (medidos en amplitud, no en decibelios) y la varianza es la suma de ambas varianzas.

Para una distribución logarítmica normal (véase la Recomendación UIT-R P.1057), las desviaciones media y típica de los niveles de señal ($\mu\text{V/m}$) están dadas por:

$$\text{Media} = e^m \cdot e^{\sigma^2/2}$$

$$\text{Desviación típica} = \sqrt{e^{2m} \cdot e^{\sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)}$$

donde m representa el valor medio y σ el valor típico de la desviación de la distribución logarítmica normal.

Aplicando estas consideraciones es posible evaluar los parámetros correspondientes a una distribución combinada. El Cuadro 2 contiene ejemplos de resultados para los cuales la desviación típica del componente de onda ionosférica de distribución logarítmica normal se fija en 3 dB.

CUADRO 2

e_i/e_e	Nivel medio relativo a la media del componente de onda de superficie	Desviación típica
0,5 (- 6 dB)	+1,3 dB	0,72 dB
1 (0 dB)	+4,4	1,35
2 (+6 dB)	+5,7	2,0

Apéndice 2 al Anexo 1

CUADRO 3

Número de excesos y desvanecimientos por hora de un enlace en ondas kilométricas

	Hora del día (hora)									
	18	19	20	21	22	23	24	01	02	
Nivel de umbral	18	19	20	21	22	23	24	01	02	
Valor mediano (exceso)	2,3	2,7	3,1	3,7	4,1	4,6	4,4	3,9	3,5	
Decilo inferior (desvanecimiento)	1,5	1,75	2	2,3	2,6	2,6	2,3	2	1,7	
Decilo superior (exceso)	1,6	1,8	1,9	2,1	2,25	2,4	2,4	2,3	2,2	

CUADRO 4

Número de excesos o desvanecimientos por hora en un enlace en ondas hectométricas

	Hora del día (hora)										
	18	19	20	21	22	23	24	01	02	03	
Nivel de umbral	18	19	20	21	22	23	24	01	02	03	
Valor mediano (exceso)	1,8	2	2,3	2,7	2,9	3,2	3,5	3,5	3	2,7	
Decilo inferior (desvanecimiento)	1,5	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,5	2,4	2,3	2,1	
Decilo superior (exceso)	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,1	2	1,8	

Distribución del valor mediano de la duración en exceso en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas

Para aproximar las características estadísticas del valor mediano de las duraciones de nivel en exceso en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas puede utilizarse la siguiente distribución:

$$P_k = 0,38 \cdot e^{-d t^2/r^2} + 0,62 \cdot e^{-0,5 t^2/q^2} + 0,62 \cdot e^{-bt/r} \cdot \left(1 - e^{-0,5 t^2/q^2}\right) \quad (1)$$

donde t (min) es mayor o igual a 0 y d, b, q y r son parámetros seleccionados.

Distribución para la duración en exceso del decilo superior y las duraciones del desvanecimiento del decilo inferior en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas

La distribución de probabilidad de la duración del desvanecimiento para los umbrales del decilo superior e inferior queda bien descrita mediante una distribución Gamma:

$$p_G = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda t}, \quad P_G = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot \int t^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda t} dt \quad (2)$$

siendo:

- p_G : distribución de probabilidad
- P_G : distribución acumulativa
- t : duración (min)
- λ y α : parámetros seleccionados.

El Cuadro 5 indica la distribución y los valores de los parámetros para diversos niveles umbral.

CUADRO 5

Distribución y parámetros para varios umbrales

Banda	Nivel umbral	Exceso o desvanecimiento	Distribución	Parámetros
Ondas kilométricas	Nivel mediano	Exceso	Ecuación (1)	$b = 0,32, d = 3,0, q = 4,0, r = 3,8$
Ondas kilométricas	Decilo inferior	Desvanecimiento	Ecuación (2)	$\alpha = 2,00, \lambda = 0,67$
Ondas kilométricas	Decilo superior	Exceso	Ecuación (2)	$\alpha = 2,20, \lambda = 0,67$
Ondas hectométricas	Nivel mediano	Exceso	Ecuación (1)	$b = 0,3, d = 0,8, q = 1,8, r = 2,2$
Ondas hectométricas	Decilo inferior	Desvanecimiento	Ecuación (2)	$\alpha = 3,30, \lambda = 1,13$
Ondas hectométricas	Decilo superior	Exceso	Ecuación (2)	$\alpha = 2,95, \lambda = 0,7$

Los datos experimentales para valores medianos de la duración en exceso en ondas kilométricas y hectométricas difieren de manera insignificante en aproximadamente 1 minuto (5 minutos para las ondas kilométricas y 4 minutos para las ondas hectométricas).

FIGURA 6

Número de duraciones en exceso (%) por hora para el umbral mediano en un enlace en ondas kilométricas y distribución integral

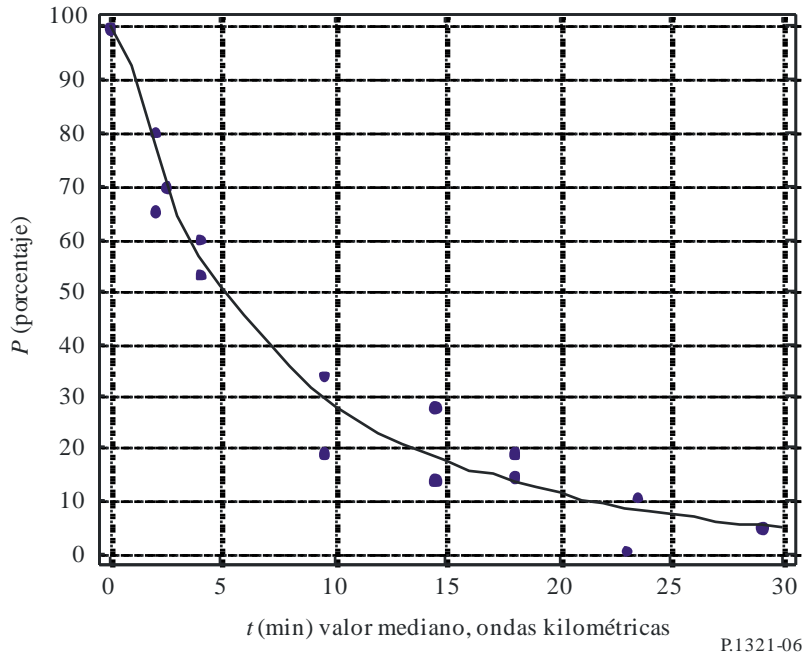


FIGURA 7

Número de duraciones en exceso (%) por hora para el umbral mediano en un enlace en ondas hectométricas y distribución integral

