

INFORME 266-7 *

**CARACTERÍSTICAS DE LA PROPAGACIÓN IONOSFÉRICA Y DEL RUIDO
QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO DE LOS SISTEMAS TERRENALES
DE RADIOCOMUNICACIONES Y EN LA PLANIFICACIÓN DEL SERVICIO
(Desvanecimientos)**

(Programa de Estudios DA/6)

(1953-1956-1959-1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986-1990)

1. Introducción

La experiencia ha demostrado que las informaciones relativas al valor medio de la señal recibida no bastan para planificar sistemas de radiocomunicación. Hay que considerar igualmente las variaciones en el tiempo, en el espacio y en frecuencia, agrupadas bajo el término general de desvanecimientos. La influencia de los desvanecimientos es determinante en el funcionamiento de los sistemas de radiocomunicación y en el tipo de modulación que se puede utilizar con eficacia. Para poder especificar la potencia de los transmisores hay que conocer la severidad y rapidez de los desvanecimientos, fijar las relaciones de protección contra interferencias y, si además se conoce la correlación de intensidades de campo recibido en diferentes antenas o en frecuencias distintas, determinar los sistemas de diversidad o de codificación más eficaces y económicos. En los Informes 413, 414 y 415 (Oslo, 1966) se analiza la importancia del desvanecimiento en la utilización de las frecuencias y se tratan sus diversos aspectos.

2. Causas generales de los desvanecimientos

El desvanecimiento puede deberse a diferentes efectos, como:

- el movimiento de la ionosfera y variaciones como consecuencia de la propagación por trayectos múltiples que causan desvanecimiento por interferencia;
- la rotación de los ejes de las elipses de polarización;
- las variaciones de la absorción ionosférica en función del tiempo;
- el enfoque y la desaparición temporal de la señal como consecuencia de una variación imprevista de la MUF [Davies, 1965].

En un trayecto de transmisión Norte-Sur de 8000 km de longitud, el desvanecimiento a largo plazo se ha atribuido a ondas de gravedad atmosféricas [Röttger, 1973].

Como también ha observado Davies [1965], el periodo del ciclo de desvanecimiento depende en gran parte de la causa del desvanecimiento. En consecuencia, el periodo en los casos de desvanecimiento por interferencia y por rotación de los ejes de polarización, puede ser del orden de una fracción de segundo a algunos segundos; el causado por enfoque puede ser de 15 a 30 minutos; el desvanecimiento por absorción ionosférica puede durar más de una hora; las variaciones imprevistas de la MUF son muy irregulares y se presentan tanto al comienzo como al final del periodo de desvanecimiento.

En la URSS se han efectuado experimentos para observar la frecuencia relativa de los desvanecimientos de señales reflejadas y dispersas procedentes de la ionosfera en trayectos de unos 1000 km de longitud [Kerblai y otros, 1974; Kerblai y otros, 1977; CCIR, 1978-82].

El desvanecimiento tiende a ser más rápido en altas frecuencias que en bajas frecuencias, porque un movimiento determinado de la ionosfera representa un desplazamiento de fase mayor en las longitudes de ondas cortas. El movimiento de las regiones ionizadas da lugar a un desvanecimiento selectivo y a la distorsión de la envolvente de modulación de la señal. El movimiento produce cambios en la longitud del trayecto y desplazamientos Doppler de la frecuencia de cada componente de la señal.

3. Periodos de muestreo

No siempre es indispensable, a los efectos del análisis de un sistema de comunicación, identificar los diferentes fenómenos que en él intervienen; en lugar de ello, es posible observar las series cronológicas resultantes y caracterizar las fluctuaciones del nivel de las señales en función del tiempo como un proceso aleatorio o estocástico [Brennan, 1961]. La interpretación de las series cronológicas exige, ante todo, la elección de un periodo de observación T_s lo bastante largo para incluir un número de fluctuaciones de nivel de la señal suficientemente grande. La elección de T_s , aunque algo arbitraria, se hace generalmente de manera que convenga a los objetivos del análisis. Así, para trayectos de ondas decamétricas, se han considerado convenientes muestras tomadas en periodos de unos minutos a una hora, cuando lo que interesaba era el desvanecimiento rápido; se han utilizado periodos de muestreo de un mes para evaluar las variaciones aleatorias de cada periodo medio de una hora en un día.

* Este Informe debe señalarse a la atención de las Comisiones de Estudio 3, 5, 8 y 10.

Resulta conveniente considerar por separado los desvanecimientos a corto plazo y a largo plazo. La componente de desvanecimiento a corto plazo incluye interferencias de fase entre componentes de propagación por trayectos múltiples, y variaciones rápidas de la intensidad de la señal producidas por irregularidades ionosféricas. La componente del desvanecimiento a largo plazo resulta de las variaciones aleatorias de la mediana a corto plazo de la intensidad de campo recibida. Por ejemplo, el desvanecimiento a largo plazo incluirá las variaciones de un día para otro de la intensidad de campo mediana medida diariamente durante una hora fija. Las variaciones a lo largo del día, estacionales y undecenales (del ciclo de actividad solar) tienen un carácter más sistemático y no suelen estar asociadas a los desvanecimientos.

4. Severidad y rapidez de los desvanecimientos de corto periodo

Los términos «severidad» y «rapidez» aquí utilizados se refieren a las características de las variaciones de amplitud de la señal recibida cuando el transmisor emite un tono de nivel constante.

4.1 Severidad del desvanecimiento

La función de distribución de amplitud de la señal $P(v_0)$ que se emplea convencionalmente da la probabilidad de encontrar una amplitud v mayor que v_0 . Está relacionada con la función densidad de probabilidad $p(v)$ por la fórmula:

$$P(v_0) = \int_{v_0}^{\infty} p(v) dv \quad (1)$$

Las funciones densidad de probabilidad que se obtienen analíticamente para describir la envolvente de una señal sujeta a desvanecimientos difieren entre sí de acuerdo con las diferentes hipótesis establecidas acerca de la estructura de los elementos que componen la señal. En uno de los modelos más utilizados se supone que, antes de captada, la señal recibida se compone de un elemento sinusoidal permanente y de una componente aleatoria de Rayleigh con una densidad de probabilidad de fase uniforme [McNicol, 1949; Bramley, 1951]. Se llega así a la función de densidad de probabilidad de Nakagami-Rice [Nakagami, 1943; Rice, 1944 y 1945].

$$p(v) = (2v/v_n^2) \exp[-(v_1^2 + v^2)/v_n^2] I_0(2v_1 v/v_n^2) \quad (2)$$

donde:

$I_0(x)$: función modificada de Bessel de orden cero,

v : (tensión de envolvente de la señal recibida)/ $\sqrt{2}$,

v_1 : valor r.m.s. (raíz cuadrada de la media cuadrática) de la tensión de la componente sinusoidal permanente,

v_n : valor r.m.s. de la tensión de la componente aleatoria.

La fig. 1 da la función de distribución de la amplitud de la señal correspondiente $P(v_0)$. Cada curva representa una probabilidad constante $P(v_0)$ de que se rebese el nivel v_0 (indicado en ordenadas). En abscisas figura la relación v_n/v_1 , que es el parámetro necesario para especificar una distribución particular de Nakagami-Rice. Por ejemplo, si la relación tensión r.m.s. aleatoria/tensión r.m.s. permanente es igual a 1 (o sea a 0 dB), un nivel 7,5 dB inferior al mediano será rebasado el 90% del tiempo.

Si $v_n/v_1 \gg 1$, la fórmula (2) se reduce a la función de densidad de Rayleigh:

$$p(v) = (2v/v_n^2) \exp(-v^2/v_n^2) \quad (3)$$

No obstante, la fig. 1 muestra que la distribución real se aproxima mucho a la de Rayleigh, a condición de que $v_n/v_1 > 2$ (6 dB).

Si $v_n/v_1 \ll 1$, en las proximidades de $v = v_1$, la fórmula (2) se reduce a la función de distribución normal o gaussiana:

$$p(v) = \frac{1}{v_n \sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{(v - v_1)^2}{v_n^2}\right] \quad (4)$$

La señal variará entonces simétricamente en torno al valor mediano v_1 con la desviación típica $v_n/\sqrt{2}$. La fig. 1 muestra que la distribución alrededor del valor mediano es casi simétrica a condición de que $v_n/v_1 < 0,1$ (-20 dB); por consiguiente, se la puede considerar aproximadamente normal, siempre que se satisfaga esta condición.

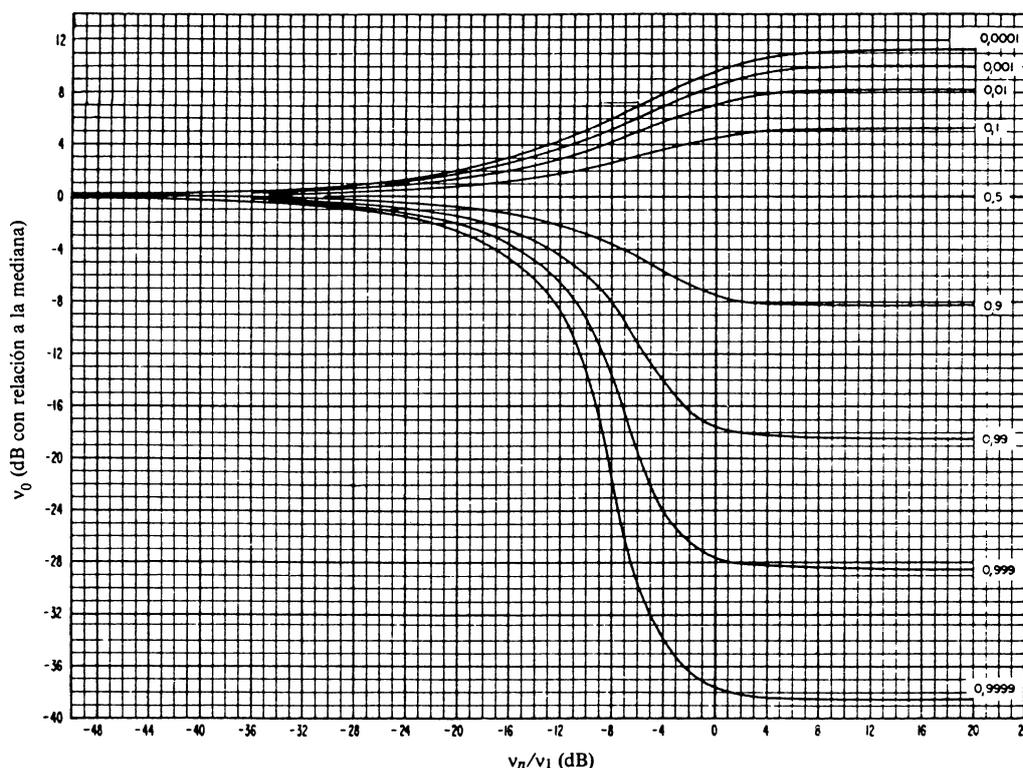


FIGURA 1 – Función de distribución $P(v_0)$ para la distribución de Nakagami-Rice

(Los valores de $P(v_0)$ están indicados en las curvas)

Si la intensidad de la señal se expresa en decibelios con relación a un nivel específico, la distribución mencionada en la fórmula (4) se denomina log-normal. Las funciones de densidad de probabilidad normal y log-normal, se pueden expresar mediante una fórmula:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \tag{5}$$

En el caso de la distribución normal, x es igual a $(v - v_m)$, mientras que en la distribución log-normal, en dB, x es igual a $20 \log(v/v_m)$, siendo v_m el valor mediano de v ; σ_x es la desviación típica de x .

Además de las densidades de probabilidad mencionadas, ligadas a ciertas hipótesis teóricas (fenómenos estacionarios, movimiento aleatorio de elementos radiantes secundarios), existen otras que merecen ser tomadas en consideración, toda vez que contienen parámetros arbitrarios a los que se pueden asignar valores tales que las funciones de distribución concuerden perfectamente con los resultados experimentales. A este respecto, pueden señalarse la distribución en m [Nakagami, 1960] que es análoga a la distribución en χ^2 y a la distribución gamma, a menudo empleadas en estadística. La distribución en m se aproxima a una distribución de Nakagami-Rice cuando m es grande y a una distribución de Rayleigh cuando m se acerca a la unidad.

En condiciones reales, la señal recibida en un circuito de ondas decamétricas es por lo general el resultado de la interacción de varias señales. Si estas señales tienen amplitudes constantes arbitrarias y fases relativas aleatorias, la distribución de amplitud de la suma de las n señales individuales viene dada por la integral de Kluyver [CCIR, 1986-90a]. Específicamente, para $n = 2$, la distribución viene dada por:

$$\begin{aligned}
 p(\mu) &= 1 && \text{para } \mu < |\mu_1 - \mu_n| \\
 P(\mu) &= \frac{1}{\pi} \arccos \frac{\mu^2 - \mu_n^2 - \mu_1^2}{2\mu_1\mu_n} && \text{para } |\mu_1 - \mu_n| \leq \mu \leq (\mu_1 + \mu_n) \\
 p(\mu) &= 0 && \text{para } \mu > \mu_1 + \mu_n
 \end{aligned} \tag{6}$$

Si ambas amplitudes y fases de las señales contributorias son aleatorias, el desvanecimiento de cada una de las señales puede describirse mediante la ecuación (2). Para este caso, la distribución de amplitud de la suma ha sido calculada por Sergeev [1978a].

En ambos casos, las distribuciones se aproximan a la distribución de Rice-Nakagami o a la distribución de Rayleigh, respectivamente, si $n > 2$. Sin embargo, para $n = 2$, las diferencias son considerables. El Cuadro I muestra los niveles rebasados para un número de puntos de porcentajes especificados para la distribución de acuerdo con la ecuación (6) junto con los de las distribuciones teóricas examinadas anteriormente [Norton y otros, 1955].

Una evaluación alternativa de las funciones empíricas de la densidad de probabilidad de la envolvente de la señal, efectuada según el método [Dyakov y Kiyanovsky, 1981] en trayectos de uno y dos saltos [Gorshkova y otros, 1985] revela la imposibilidad de describir los datos experimentales mediante leyes teóricas individuales que tengan, o bien un solo parámetro de forma, o bien ningún parámetro. Es posible describir adecuadamente las funciones de densidad de probabilidades mediante una familia de distribuciones, para lo cual hay que emplear la familia de distribuciones β , que tiene dos parámetros de forma y describe virtualmente toda la variedad de las distribuciones empíricas de la envolvente de la señal [Dumbrava y otros, 1988].

CUADRO I

Distribución	ν_n/ν_1 (dB)	Nivel (en dB) con respecto al valor mediano, rebasado durante los siguientes porcentajes de tiempo			
		1%	10%	90%	99%
2 ondas de amplitudes constantes y fase relativa aleatoria	0	3,01	2,90	-13,10	-33,07
	-3	2,88	2,78	-9,87	-12,42
	-6	2,55	2,46	-6,23	-7,01
	-9	2,12	2,04	-3,97	-4,32
	-12	1,68	1,61	-2,59	-2,78
Nakagami-Rice	0	7,02	4,48	-7,53	-17,55
	-3	6,02	3,79	-6,28	-15,49
	-6	4,91	3,03	-4,57	-11,10
	-9	3,86	2,33	-3,17	-6,96
	-12	2,95	1,75	-2,18	-4,47
Rayleigh		8,22	5,21	-8,18	-18,39
Normal y log-normal		$2,326\sigma_x$	$1,282\sigma_x$	$-1,282\sigma_x$	$-2,326\sigma_x$

En los estudios relativos a la propagación radioeléctrica ocurre con frecuencia que se conoce el valor mediano mensual de la intensidad de la señal, pero se necesita la distribución de probabilidad de su valor instantáneo. La distribución de los valores medianos de la intensidad de la señal, expresados en decibelios, para un intervalo de tiempo especificado (por ejemplo, 1 h) en una serie de días sigue una distribución normal, con una desviación típica de σ dB. Es decir, estos valores medianos tienen una distribución log-normal. Si la distribución de los valores instantáneos alrededor del valor mediano durante cada periodo de tiempo es una distribución de Rayleigh, entonces la distribución total de probabilidad para todos los periodos puede obtenerse a partir de estas dos distribuciones [Spaulding, 1982]. La fig. 2 [Picquenard, 1974] muestra el nivel por debajo del cual la señal disminuye para determinados porcentajes del tiempo total, para valores de σ de hasta 20 dB. En los casos de propagación de la onda ionosférica sin interferencia, σ puede obtenerse de la ecuación para $\sigma_{S,N}$ de Sailors y otros [1977]. En el caso de relación señal/ruido elevada, en presencia de interferencia, puede utilizarse para σ la ecuación $\sigma_{S,N}$ de los mismos autores.

Spaulding [1982] ha presentado algoritmos para calcular la distribución total del desvanecimiento en amplitud para una señal con una o más componentes, cada una de las cuales tiene un desvanecimiento a corto plazo con una distribución de Rayleigh y un desvanecimiento a largo plazo con una distribución log-normal de valores medianos horarios.

Mediciones efectuadas en la banda 6 (ondas hectométricas) [Spaulding, 1982] parecen indicar que los valores medianos horarios de la intensidad de campo, para una hora nocturna determinada, de un día a otro, siguen una distribución log-normal, pero que el desvanecimiento a corto plazo en una hora puede desviarse con respecto a la distribución usualmente supuesta de Rayleigh.

Las propiedades de la distribución de la intensidad de campo de la onda ionosférica en las bandas B.km y B.lm (ondas kilométricas y hectométricas), indican que la distribución log-normal y la distribución de Rayleigh sólo se aplican a casos marginales; se dan ejemplos relativos a varios años y a diferentes estaciones del año que muestran leyes de distribución distintas en el caso de registros efectuados durante 30 y 60 minutos [Täumer y Sulanke, 1967 y 1968].

El examen de la información del CCIR y de otras publicaciones, así como los nuevos análisis de los datos disponibles de experimentos efectuados en el Reino Unido, dan los valores de las desviaciones de los deciles respecto a la mediana de las variaciones durante una hora de la intensidad de campo de la señal. De estos resultados se deduce una desviación del decil inferior respecto a la mediana horaria de la intensidad de campo de unos 6 dB, y una desviación del decil superior de unos 5 dB, lo que indica un mayor ajuste, como medida, con la distribución log-normal que con las distribuciones de Rayleigh o de Nakagami-Rice.

La distribución del desvanecimiento obtenida promediando cada una de las estimaciones experimentales a lo largo del periodo de 2 a 3 minutos depende de la estructura de rayos de la señal. A medida que aumenta el número de rayos la distribución se aproxima a la de Rayleigh. Además, a medida que el tiempo de observación aumenta hasta 30 minutos la distribución se aproxima a la de Rayleigh [Sergeev, 1978b], [Sergeev, Fiks, 1982]. Con intervalos de análisis más largos (de 30 a 60 min), la distribución se aproxima más a la log-normal que a la de Rayleigh. A menudo se define la gama de desvanecimientos como la diferencia (en dB) entre los niveles de la señal rebasados el 10% y el 90% del tiempo, y para trayectos largos en ondas decamétricas se han indicado valores de $13 \pm 3,2$ dB [Grosskopf, 1953] y de $16,6 \pm 3,2$ dB [Konopleva, 1964]. Los valores no parece que varíen mucho con la longitud del trayecto, en la gama de 1500-6000 km, con la hora del día o con la estación del año [Konopleva, 1964].

Para un trayecto más corto (650 km) y un intervalo de análisis de 10 minutos, se ha indicado una ley log-normal con una gama de desvanecimiento de unos 11 dB [Gibson, 1989].

Se señala que, si bien la forma de las distribuciones medidas puede diferir de la de Rayleigh, la gama de desvanecimientos observada es del mismo orden que el valor esperado de 13,4 dB para la distribución de Rayleigh. No obstante, con valores más altos de la señal, se ha observado que la gama de desvanecimientos disminuye por debajo del valor de Rayleigh debido quizá a una componente constante importante producida por una reflexión especular, en cuyo caso hay que aplicar distribuciones de tipo Nakagami-Rice. Las desviaciones de los deciles de los valores medianos de (2 a 10) minutos con respecto al valor mediano horario se estudiaron también en la URSS. Para los enlaces radioeléctricos que funcionan a $f/MUF \leq 0,85$ estas desviaciones son de 5 a 7,5 dB en latitudes medias y de 6,5 a 10 dB en las latitudes septentrionales [Kosikov, 1957; Khmel'nitsky, 1975]. Estudios realizados han demostrado que la intensidad de la fluctuación de la media horaria con relación a la mediana horaria depende del tiempo de promediación. Para un enlace de 3000 km de largo y de latitud media, las desviaciones cuadráticas medias con relación a la mediana horaria son 6, 5 y 2 dB para tiempos de promediación de 1, 2 y 15 min respectivamente [Malygin y Sergeev, 1982; Sergeev y otros, 1985].

En el Informe 322 figuran datos del ruido atmosférico basados en una red mundial de mediciones normalizadas en la que los valores medios se determinaron para un periodo de un cuarto de hora cada hora, tomándolos como representativos de la hora correspondiente. La hipótesis inherente al programa de mediciones es que, excluyendo las transiciones del alba y del crepúsculo y los periodos de tormenta locales, en general no se produce una variación significativa del ruido durante una hora.

El Informe 258 da información sobre el ruido artificial. La potencia media de ruido se expresa en función de la frecuencia según las categorías del entorno, a saber zona comercial, zona residencial y zona rural, junto con las correspondientes desviaciones de los deciles respecto de la mediana horaria de las variaciones durante una hora de la intensidad de campo, para una ubicación fija. En el cuadro II figuran los valores del decil superior para ondas decamétricas. Mientras que la variabilidad es algo menor en las zonas rurales para una frecuencia de 5 MHz, existe poca diferencia entre los otros resultados. La mediana de todos estos valores, que también es la mediana para las zonas residenciales, es de 10,0 dB.

CUADRO II – *Desviaciones del decil superior respecto de la mediana horaria de las intensidades de campo para el ruido artificial (dB)*

Frecuencia (MHz)	Categoría del entorno		
	Comercial	Residencial	Rural
5	11,0	10,0	5,9
10	10,9	8,4	9,0
20	10,5	10,6	7,8

4.2 Rapidez de los desvanecimientos

La rapidez de los desvanecimientos se puede caracterizar de diversas maneras [McNicol, 1949; Ratcliffe, 1956; Price, 1957; Rice, 1958]. Una descripción de los desvanecimientos que puede ser útil en cierto número de aplicaciones, la da la función de autocorrelación del canal en el tiempo o el espectro de potencia correspondiente.

Con ayuda de ciertas hipótesis teóricas (distribución normal de las velocidades de los elementos radiantes secundarios), la curva de la función de autocorrelación debiera ser una curva normal:

$$R(\tau) \approx R(0) \exp(-\tau^2/2\tau_0^2) \quad (7)$$

donde τ_0 es la constante de correlación en el tiempo (o coherencia) del canal con desvanecimiento. La densidad espectral de potencia correspondiente es proporcional a $\exp(-\tau_0^2 f^2/2)$, forma gaussiana con desviación típica de $1/\tau_0$. También se la conoce por anchura de banda de correlación (o coherencia) del canal con desvanecimiento.

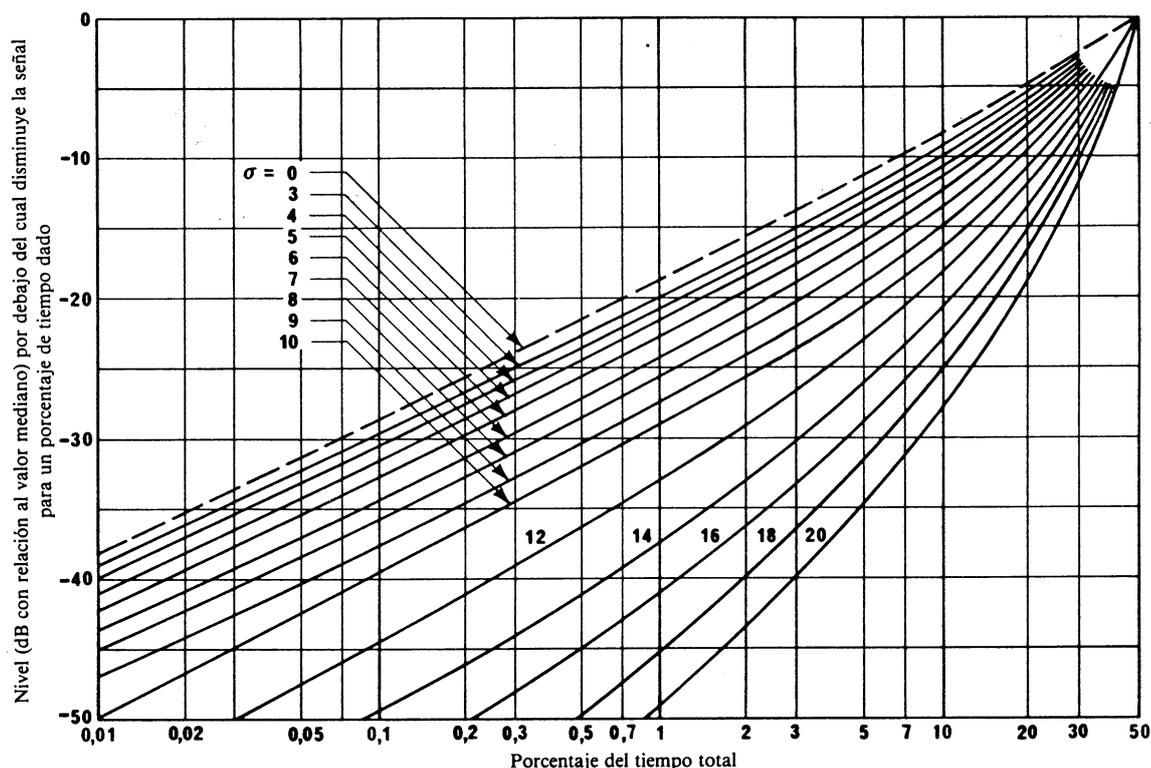


FIGURA 2 - Nivel por debajo del cual disminuye la intensidad de la señal cuando el valor instantáneo de la intensidad de la señal tiene una distribución de Rayleigh, pero los valores medianos diarios presentan una distribución log-normal, con una desviación típica de σ dB

Cabe preguntarse, sin embargo, si esta hipótesis sobre la distribución de las velocidades de los elementos radiantes secundarios está siempre justificada. Por ello conviene tomar en consideración la posibilidad de otras funciones de distribución de las velocidades, que pueden conducir a otras formas de la función de autocorrelación y a diferentes efectos de dispersión Doppler.

Otros parámetros se han utilizado a menudo para caracterizar la rapidez de los desvanecimientos. Cabe señalar, en primer lugar, el número de veces que la intensidad de campo pasa en sentido ascendente por cierto valor específico durante una unidad de tiempo.

Cuando los desvanecimientos de la señal se ajustan a la ecuación (2), la rapidez de los desvanecimientos para cualquier valor a nivel v , viene dada por:

$$N(v) = (f_n v \sqrt{4\pi}/v_n) \exp [-(v_1^2 + v^2)/v_n^2] I_0(2v_1 v/v_n^2) \quad (8)$$

donde

f_n : valor r.m.s. de la frecuencia de desvanecimiento obtenida a partir de:

$$f_n^2 = \frac{\int_0^\infty f^2 G(f) df}{\int_0^\infty G(f) df} = \frac{1}{4\pi^2 R(0)} \left. \frac{d^2 R(\tau)}{d\tau^2} \right|_{\tau=0} \quad (9)$$

En la fórmula (9), $R(\tau)$ es la función de autocorrelación, $G(f)$ es el espectro de potencia del proceso de desvanecimiento y f se mide por medio de la frecuencia en el centro de la banda [Rice, 1948].

En el caso particular de la distribución de Rayleigh, se puede introducir el valor mediano v_m , obteniéndose [Rice, 1958]:

$$N(v) = 2,95 f_n (v/v_m) \exp(-0,693 v^2/v_m^2) \quad (10)$$

si $v = v_m$, resultará que $N(v_m) = 1,47 f_n$. Se pueden deducir resultados similares a estos de distintas distribuciones del desvanecimiento de la señal, tales como las distribuciones normal y log-normal (fórmula (5)) u otras. El principal resultado es la proporcionalidad entre $N(v_m)$ y f_n .

En la República Federal de Alemania se ha utilizado para medir la rapidez de los desvanecimientos el nivel de intensidad de campo de la estación excedido durante el 90% del tiempo (registro de la intensidad de campo WWV (15 MHz)). Esta rapidez estaba comprendida entre 6 y 16 por minuto, siendo su valor medio de 11,25 por minuto.

La rapidez de los desvanecimientos de la señal por la interferencia depende de las características de los modos de propagación, que vienen determinadas en gran medida por la relación entre la frecuencia de trabajo y la frecuencia máxima utilizable [Sergeev 1974, 1975; Malygin y otros, 1982]. Los datos experimentales correspondientes a trayectos de latitud media con distancias de hasta 3000 km conducen a valores de la constante de tiempo de la correlación del desvanecimiento τ_0 de 2 a 18 s, que dependen de la frecuencia de trabajo y de la estación [CCIR, 1982-86a]. Las cifras más pequeñas se asocian con tiempos en los que hay varios trayectos del rayo (por ejemplo, en división magnetoiónica o en presencia del rayo Pedersen), o, en el caso de trayectos de más de un salto y una distancia de hasta 6000 km, con estructuras de rayos complejas, de un valor $\tau_0 = 3$ a 4 s, que no dependen de la frecuencia de trabajo.

En las regiones tropicales, durante determinado porcentaje de días, algunos trayectos por ondas decamétricas pueden sufrir desvanecimientos mucho más rápidos que otros trayectos de latitudes más altas [Osborne, 1952; Yeh y Villard, 1958; Bennington, 1960; Koster, 1963]. Este fenómeno está ligado a la dispersión por la capa F ecuatorial; normalmente comienza a las 20h00 (hora local) y dura de dos a cuatro horas. Es probable que afecte a los trayectos de transmisión cuyo punto de reflexión en la capa F se encuentre entre las latitudes magnéticas $\pm 15^\circ$. Se registran variaciones estacionales y variaciones debidas a la actividad solar, pero su naturaleza puede ser distinta según la orientación del trayecto. Los trayectos de gran longitud parecen más sujetos al fenómeno en la época de los equinoccios y de actividad solar máxima [Humby, 1959]. Además del aumento de la profundidad de los desvanecimientos, se han registrado variaciones breves de unos 20 a 30 Hz en la frecuencia, que pueden manifestarse en una frecuencia más baja, pero no en una más alta [Davies y Barghausen, 1964]. Se necesita mayor número de datos para poder determinar con más precisión las diversas características de los desvanecimientos.

5. Variaciones de largo periodo

En el caso de las variaciones de largo periodo, la componente aleatoria se estudia generalmente tomando los valores medianos horarios y evaluando la distribución de amplitud en un largo periodo. Normalmente, y para simplificar, se admite que las variaciones de largo periodo tienen una distribución log-normal; este método proporciona con frecuencia una buena aproximación de la distribución real. Un estudio muy completo de las variaciones de largo periodo realizado en la República Federal de Alemania [Grosskopf, 1953; 1955a y b] ha demostrado que las curvas de distribución correspondientes a una rotación solar, casi seguían la ley log-normal en el 50% de los 28 periodos de rotación estudiados; el 25% podía dividirse en dos grupos de distribución log-normal, válido cada uno para una gama dada de valores de intensidad de campo. El resto sólo se podía reducir a la distribución log-normal dividiéndolo en un número más elevado de grupos parciales.

Algunos países han estudiado resultados sobre la dispersión de las variaciones de largo periodo. Expresados en función de la desviación típica σ_x de la distribución log-normal (ecuación (5)), los mencionados análisis han dado un resultado medio de 8 dB; ciertas indicaciones demuestran que los valores nocturnos pueden ser mayores que los diurnos. En la URSS se han efectuado experimentos en trayectos de ondas decamétricas de 1500, 3000 y 6000 km, durante todas las estaciones del año y horas del día. Se han obtenido valores comprendidos entre 5 y 10 dB [Konopleva, 1964]. Las variaciones sistemáticas estacionales o entre el día y la noche parecen relativamente pequeñas. Los resultados en el Reino Unido para los trayectos Accra-Reino Unido, Bombay-Reino Unido y Colombo-Reino Unido han dado valores de unos 5,5 a 7 dB. En algunas regiones pueden registrarse valores más elevados. Por ejemplo, en trayectos que pasan por las regiones polares de fuerte absorción pueden registrarse valores de 10 o más dB.

Los análisis de Bradley y Vernon [1982], basados en estudios teóricos, y el examen de los datos medidos indican que la variabilidad latitudinal de las desviaciones de los deciles es mayor que la dependencia respecto de la frecuencia. Los diferentes datos no concuerdan puesto que algunas mediciones muestran una reducción de las desviaciones de los deciles al aumentar la frecuencia, mientras que otras muestran un aumento.

Se han realizado en la URSS [Khmelnitsky, 1970a y 1975; Bogdanov y Segal, 1967; Blagoveshchensky, 1981] estudios del desvanecimiento a largo plazo en enlaces radioeléctricos que funcionan a frecuencias no demasiado próximas a la MUF (hasta 0,85) en latitudes medias y septentrionales. En las latitudes medias las desviaciones de los deciles son de 4 a 5 dB en trayectos inferiores a 3000 km y de 6,5 a 10 dB en trayectos superiores a 3000 km. En las latitudes septentrionales, las desviaciones de los deciles son de 7,5 a 12 dB y de 12,5 a 15 dB, respectivamente.

Otros estudios efectuados en trayectos situados en latitudes medias bajas han demostrado que la máxima desviación típica (12 a 15 dB) se observa a frecuencias próximas a la MUF. Durante el periodo invernal se observa un aumento en los valores inferiores de la MUF a distancias de 4.000 - 5.000 km, la desviación típica es variable, oscilando entre 1 y 15 dB aproximadamente. Para trayectos de longitud inferior a 3.700 km y f/MUF entre 0,3 a 0,85, $\bar{\sigma} = 3,4$ dB; si f/MUF está entre 0,85 a 1,15, $\bar{\sigma} = 5,2$ dB; para distancias de 3.700 a 7.500 km y f/MUF está entre 0,3 a 0,85, $\bar{\sigma} = 4,8$ dB [CCIR, 1986-90b].

Los resultados de las mediciones de la intensidad de campo en ondas decamétricas efectuadas en China, de 1983 a 1984 en 5 trayectos (con distancias de 1.000 a 7.000 km, frecuencias 5 a 15 MHz) muestran que el valor medio de las desviaciones típicas mensuales de desvanecimiento a largo plazo (fluctuaciones de un día a otro) es 4,4 dB [CCIR, 1986-90c].

En la URSS se ha elaborado una metodología para calcular las distribuciones de amplitudes de los desvanecimientos lentos así como sus características, teniendo en cuenta las fluctuaciones de la MUF [Chernov, 1989]. Se ha obtenido una expresión analítica para la densidad de distribución, que puede comprender de uno a tres máximos, según los parámetros reales de la fluctuación de la MUF y de las fluctuaciones de los niveles de señal cuando la diferencia entre la MUF y la frecuencia de trabajo es importante.

En la República Federal de Alemania se han realizado también recientemente estudios basados en unos 40 000 valores mensuales horarios y en las desviaciones de los deciles de las mediciones de intensidad de señales en ondas decamétricas, que abarcan trayectos de un solo tramo y de múltiples tramos en todas las latitudes [CCIR, 1982-86b]. El desvanecimiento a largo plazo no parece variar considerablemente con la longitud del trayecto, la hora del día, la estación del año o el número de manchas solares. Existe, sin embargo, una dependencia importante respecto de la relación entre la frecuencia de la onda y la MUF básica mediana mensual.

El Suplemento al Informe 252 proporciona unos valores representativos de las desviaciones de los deciles inferior y superior respecto de la mediana mensual de las variaciones diarias de la intensidad de campo de la señal. Los valores se han determinado a partir de los datos medidos y se muestran por separado para longitudes de trayecto inferiores o superiores a 2500 km, en función de la hora local del punto medio del trayecto, la estación del año y la latitud geomagnética de dicho punto medio. En el Informe 432 figura información sobre las variaciones a largo plazo en las bandas B.km y B.hm

El Informe 322 da los valores de las correspondientes desviaciones de los deciles de la potencia de ruido atmosférico en función de la frecuencia, la estación del año y la hora local.

En la actualidad no se dispone de la información referente a la variabilidad de un día a otro del ruido artificial, si bien pueden esperarse ciertos cambios según los esquemas de actividad, por ejemplo, una reducción del ruido en los días festivos.

6. Márgenes contra el desvanecimiento en la planificación del servicio

Un método de planificación del servicio que utilice los análisis de compatibilidad exigirá:

- comparar la intensidad de la señal deseada con el ruido para establecer si se consigue una calidad de recepción deseada en ausencia de interferencia, y
- comparar con las señales interferentes en el mismo canal y en el canal adyacente para determinar si son perjudiciales.

Las estimaciones de las medianas mensuales deben aumentarse con los márgenes apropiados contra el desvanecimiento. Estos han de considerarse por separado dependiendo de si el ruido de fondo es de tipo atmosférico o artificial o si se trata de una señal interferente, aunque en cualquier caso dependen de:

- los desvanecimientos durante una hora y de un día a otro de la señal deseada,
- el desvanecimiento durante una hora y de un día a otro del ruido de fondo,
- la correlación entre las intensidades de la señal deseada y del ruido de fondo, y
- la fracción de tiempo durante la que se ha de lograr la calidad de recepción deseada.



Cuando viene dada la mediana mensual de la relación entre la señal deseada y el ruido de fondo para una recepción satisfactoria, es conveniente en primer lugar evaluar la intensificación o el margen contra el desvanecimiento $F_{b,90}$ necesario para obtener una calidad de recepción deseada durante el 90% del tiempo en presencia de desvanecimientos durante una hora y de un día a otro tanto de las señales como del ruido de fondo. Los márgenes contra el desvanecimiento para otros porcentajes de tiempo podrán expresarse entonces en términos de $F_{b,90}$.

Suponiendo que las variaciones durante una hora y de un día a otro de los desvanecimientos de las señales deseadas y del ruido de fondo no guardan correlación, $F_{b,90}$ puede expresarse aproximadamente por [CCIR, 1982-86c]:

$$F_{b,90} = \sqrt{S_{wh}^2 + S_{dd}^2 + B_h^2 + B_d^2} \quad \text{dB} \quad (11)$$

donde:

- S_{wh} : desviación del decil inferior de la señal deseada respecto a la mediana horaria de las variaciones durante una hora de la intensidad de campo (dB);
- S_{dd} : desviación del decil inferior de la señal deseada respecto a la mediana mensual de las variaciones diarias de la intensidad de campo (dB);
- B_h : desviación del decil superior del ruido de fondo respecto a la mediana de las variaciones durante una hora de la intensidad de campo (dB);
- B_d : desviación del decil superior del ruido de fondo respecto a la mediana mensual de las variaciones diarias de la intensidad de campo (dB).

En la Primera Reunión de la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones para la planificación de las bandas de ondas decamétricas atribuidas al servicio de radiodifusión (CAMR HFBC(1)) Ginebra, 1984, se adoptó, para el desvanecimiento a corto plazo de la señal, una desviación del decil superior de 5 dB y una desviación del decil inferior de -8 dB. Para el desvanecimiento a largo plazo de la señal, las desviaciones del decil se consideraban una función de la relación entre la frecuencia de funcionamiento y la MUF básica indicada en el cuadro III.

CUADRO III – Desviaciones del 90% y del 10% con respecto a la mediana mensual predicha de la intensidad de campo de la señal (dB), derivadas de la variabilidad de un día a otro

Latitud geomagnética corregida (°)	< 60°		≥ 60°	
	90%	10%	90%	10%
≤ 0,8	-8	6	-11	9
1,0	-12	8	-16	11
1,2	-13	12	-17	12
1,4	-10	13	-13	13
1,6	-8	12	-11	12
1,8	-8	9	-11	9
2,0	-8	9	-11	9
3,0	-7	8	-9	8
4,0	-6	7	-8	7
> 5,0	-5	7	-7	7

(¹) Si cualquier punto de la parte del círculo máximo que pasa por el transmisor y el receptor y que está comprendido entre puntos de control situados a 1000 km de cada extremo del trayecto alcanza una latitud geomagnética corregida de 60° o más, se utilizarán los valores correspondientes a las latitudes ≥ 60°.

En principio, los márgenes contra el desvanecimiento deben tener también en cuenta la velocidad de éste que puede afectar a la calidad de recepción, aunque todavía no se dispone de los datos para ello. Los márgenes contra el desvanecimiento $F_{b,x}$ para $x\%$ del tiempo vienen dados en términos de $F_{b,90}$ mediante la fórmula:

$$F_{b,x} = c \cdot F_{b,90} \quad \text{dB} \quad (12)$$

Los valores de c para valores de x en la gama de 50 a 90% para una distribución log-normal de la relación señal/ruido de fondo, una distribución de Rayleigh y distribuciones compuestas intermedias son muy similares, aproximándose a los valores del cuadro IV.

CUADRO IV – Valores del parámetro c

x (%)	c
50	0
60	0,18
70	0,36
80	0,63
90	1

7. Correlación de las señales en el espacio, en el tiempo, en frecuencia y en polarización

El estudio de la correlación entre dos señales recibidas en función de su separación en el espacio, en el tiempo, en frecuencia o en polarización puede proporcionar información útil para establecer un sistema de telecomunicación en presencia de desvanecimientos.

Además de la utilización de una mayor potencia de transmisión etc., otra solución [Stein, 1966] consiste en el empleo de técnicas de modulación y recepción menos sensibles al desvanecimiento. Harto conocidas son las técnicas que combinan múltiples receptores y que se conocen como recepción por diversidad. Según los distintos mecanismos de propagación, existen varios medios para obtener señales en las que los periodos de desvanecimiento sean independientes entre sí, tales como:

- diversidad en el espacio,
- diversidad en frecuencia,
- diversidad de ángulo de llegada,
- diversidad de polarización,
- diversidad en el tiempo (repetición de señales),
- diversidad por trayectos múltiples (Rake).

De ellas, las dos últimas son principalmente para la transmisión digital.

Un análisis pormenorizado de los métodos de caracterización de canales y de diversidad iría más allá del objeto de este Informe. No obstante, cabe advertir que la mayoría de los análisis de métodos de diversidad se han basado hasta ahora en el desvanecimiento lento, no selectivo. Sin embargo, en los últimos años, se ha prestado gran atención a los desvanecimientos rápidos, no selectivos. Balser y Smith [1962] han obtenido datos muy valiosos sobre la propagación ionosférica por trayectos múltiples utilizando sondas por impulsos de incidencia oblicua, con longitudes de impulso del orden de 10 a 100 μ s.

Datos representativos permiten llegar a la conclusión de que la transmisión en serie de información digital a través de grandes distancias, por la ionosfera, a velocidades superiores a unos 100 ó 200 impulsos por segundo, si no se toman medidas específicas para limitar la propagación por trayectos múltiples, tiende a presentar graves problemas de interferencia entre símbolos [Stein, 1966].

Los operadores tratan de reducir al mínimo estos efectos indeseables de propagación por trayectos múltiples utilizando frecuencias próximas a la MUF. Otro procedimiento para abordar este problema ha sido el empleo de sistemas de antenas de gran directividad, ajustables automáticamente, como el sistema MUSA [Polkinghorn, 1940], que discrimina ciertos trayectos de saltos múltiples en favor de otros.

Para caracterizar el grado de aproximación al desvanecimiento lento no selectivo, el *factor de dispersión* es un parámetro útil [Stein, 1966]. Para un impulso de información de longitud T , el desvanecimiento es esencialmente no selectivo si la dispersión en una transmisión por trayectos múltiples T_M satisface la expresión:

$$T_M \ll T \quad (13)$$

Similarmente, si la dispersión Doppler (la anchura del espectro de potencia recibido con la portadora sin modular) es B_D , para que el desvanecimiento sea esencialmente lento deberá cumplirse la desigualdad:

$$T \ll 1/B_D \quad (14)$$

En consecuencia, para que el desvanecimiento sea lento y no selectivo, T deberá satisfacer ambas expresiones (13) y (14) por lo que el factor de dispersión L , que viene dado por:

$$L = B_D T_M \quad (15)$$

deberá ser:

$$L \ll 1 \quad (16)$$

7.1 Recepción por diversidad

En lo que respecta a la recepción por diversidad, Stein [1966] enumera entre los métodos lineales más comunes, aplicables tanto a la recepción de transmisiones digitales, como a la recepción sin distorsión de transmisiones analógicas, los siguientes:

- combinación de señales seleccionadas,
- combinación de señales que tienen la relación máxima de intensidades,
- combinación de señales sobre la base de ganancias iguales.

Stein también trata de otros métodos más elaborados: diversidad orientada por la decisión, para la transmisión digital, en la que no se considera importante la fidelidad de la señal y, en su lugar, se establece como objetivo único la proporción mínima de errores.

Debe mencionarse que las pruebas limitadas, realizadas en el Reino Unido, relativas a la recepción por diversidad espacial de transmisiones telefónicas, sólo dieron por resultado pequeñas ventajas en las condiciones de la prueba. La anchura de banda de correlación fue demasiado baja; la amplitud «instantánea» de la portadora reducida resultó ser un indicador deficiente de la transmisión por la banda de frecuencias vocales. En cambio, la recepción por diversidad es muy eficaz en transmisiones telefónicas con modulación de amplitud y doble banda lateral (con portadora transmitida), y en señales telegráficas típicas.

Normalmente, en la propagación ionosférica, la limitación más importante es la dispersión por trayectos múltiples T_M . Puede definirse una anchura de banda Δf como la inversa de T_M :

$$\Delta f = 1/T_M$$

que es similar a la «anchura de banda de coherencia», o a la «anchura de banda con desvanecimiento uniforme» o a la «anchura de banda con desvanecimiento selectivo» [Stein y Jones, 1967]. En la propagación ionosférica, la dispersión por trayectos múltiples se debe a:

- las diferencias de tiempo de propagación de los rayos O y X,
- las diferencias de tiempo de propagación de los rayos superior e inferior,
- las diferencias de tiempo de propagación en la propagación multimodo,
- las diferencias de tiempo de propagación debidas a irregularidades (F difuso, etc.),
- el ensanchamiento del impulso en el caso de reflexión normal debido a la dispersión.

Pickering [1975] calculó, tanto la dispersión por trayectos múltiples, como la dispersión Doppler, relativas al canal ionosférico por ondas decamétricas. Los resultados de dichos cálculos condujeron a la creación del «factor de reducción Doppler» que puede compararse con el «factor de reducción por trayectos múltiples» de Bailey [1959] y Salaman [1962] y que puede utilizarse para determinar la frecuencia de trabajo adecuada para un determinado enlace por ondas decamétricas.

Las primeras investigaciones sobre recepción por diversidad en el espacio, en polarización y en frecuencia se realizaron antes de 1940. Sin embargo, sólo a partir de 1947 comenzaron a desarrollarse ampliamente los métodos matemáticos necesarios para las investigaciones sobre los aspectos teóricos y empíricos de la recepción por diversidad [Briggs y otros, 1950; Booker y otros, 1950; Glazer y Farber, 1953; Ratcliffe, 1956].

Basándose en un modelo sencillo, aunque no totalmente satisfactorio, de la dispersión por una ionosfera no homogénea y variable en el tiempo, se puede establecer una función de correlación en el espacio $\rho(d)$, reducida a la unidad cuando $d = 0$, para demostrar la relación de dependencia existente entre señales de ondas continuas en dos antenas separadas por una distancia d [Bramley, 1951; Grisdale y otros, 1957; Brennan, 1960; Khmelnsky, 1960]:

$$\rho(d) = \exp[-d^2/2x^2] \quad (17)$$

El parámetro x es una función de la dimensión estructural de la heterogeneidades ionosféricas, de la longitud del trayecto y de la frecuencia. A la distancia $d = x$, la correlación es de 0,61 y de 0,37 para la distancia $d = x\sqrt{2}$. La experiencia y la teoría demuestran que todas las ventajas de la diversidad están ya prácticamente obtenidas para la más corta de las distancias. Por ejemplo, para dos señales con desvanecimientos independientes ($\rho = 0$), la mejora que se obtiene con la recepción por diversidad es de 14 a 15 dB al nivel de fiabilidad del 99,9%. Para $\rho = 0,61$, esta mejora es de 13 dB. Parece justificado, pues, designar la distancia $d = x\sqrt{2}$ por la expresión «distancia de separación de diversidad» o «distancia de correlación».

Las pruebas realizadas en el Reino Unido en la gama 6-18 MHz, a distancias de 2000 a 17 000 km, han permitido obtener valores de x comprendidos entre 150 y 400 m, correspondientes a distancias de correlación comprendidas entre 210 y 560 m (es decir, 10 a 15 longitudes de onda). Estas conclusiones se han visto confirmadas por los registros de la estación WWV en 15 MHz hechos en la República Federal de Alemania. Además, se ha demostrado que las distancias de separación requeridas cuando la reflexión especular predomina en la ionosfera son mucho mayores que en presencia de una componente aleatoria importante.

En numerosas mediciones hechas en Estados Unidos de América en frecuencias inferiores a las de las ondas decamétricas, la distancia de correlación obtenida en 540 kHz fue de $29,4\lambda \pm 17,1\lambda$ [Brennan y Phillips, 1957], mientras que en 85 kHz [Bowhill, 1957] se registraron dos periodos de desvanecimiento distintos, uno de 7 min y otro de 1,5 min. La distancia de correlación fue estimada en 5 km en el primer caso y en 1 km en el segundo.

La diversidad de polarización en la gama de 6 a 18 MHz ha sido estudiada en Estados Unidos de América y en el Reino Unido. Las antenas estaban situadas en la misma ubicación, pero dispuestas de modo que pudieran recibir ondas con polarizaciones mutuamente perpendiculares. El resultado fue idéntico al logrado por diversidad en el espacio con una separación equivalente de 240 a 480 m [Grisdale y otros, 1957].

Los experimentos realizados en Australia y Nueva Guinea con emisiones de incidencia vertical en las bandas de ondas hectométricas y decamétricas, indican que un sistema con diversidad de polarización reduciría considerablemente el desvanecimiento y la distorsión.

7.2 Correlación de frecuencias

Para la transmisión de información se requiere siempre una banda de frecuencias. Puede demostrarse que, para el análisis, basta con determinar los efectos de la transmisión simultánea de dos tonos de frecuencias distintas [Stein, 1966]. En la práctica, cuando las frecuencias tienen una separación suficiente, la correlación cruzada de las fluctuaciones del desvanecimiento en las dos frecuencias tiende a cero. La ausencia de correlación en el desvanecimiento de tonos de frecuencias distintas se denomina *desvanecimientos selectivos*.

Un trabajo clásico de Potter [1930] se refiere a una investigación sobre el desvanecimiento selectivo, utilizando señales multifrecuencia en un trayecto transoceánico. Otros trabajos se efectuaron en el decenio de 1950 [Briggs, 1951; Price y Green, 1958].

La constante de correlación de frecuencias (el radio de correlación) del desvanecimiento selectivo varía generalmente en razón inversa al retardo máximo entre rayos. En trayectos de hasta 3000 km en latitudes medias, la constante de correlación de frecuencias del desvanecimiento varía entre 250 y 7500 Hz, dependiendo de la relación entre la frecuencia de la onda y la MUF básica, alcanzando el valor máximo cuando esa relación se encuentra en la gama de 0,6 a 0,8 [Malygin y Sergeev, 1984].

Sin embargo, para un trayecto de 650 km, el coeficiente de correlación es típicamente 0,67 para separaciones de frecuencia de hasta 10 kHz [Gibson, 1989].

En China se han realizado otros estudios (de 1983 a 1984) en cinco trayectos. El análisis del desvanecimiento a largo plazo de las intensidades de campo de diferentes frecuencias ($\Delta f \geq 900$ kHz) que transmiten simultáneamente muestra que el valor promedio de los coeficientes de correlación es 10%, con 18,4% para los mismos trayectos y 3,1% para diferentes trayectos, con desviaciones típicas de 35,1, 36,7 y 32,5%, respectivamente. La prueba estadística muestra que el desvanecimiento para diferentes trayectos puede ser considerado como básicamente no correlacionado, mientras que para los mismos trayectos existe cierta correlación [CCIR, 1986-1990c].

7.3 Correlaciones vinculadas con los márgenes de desvanecimiento utilizados en la planificación del servicio

Debe mejorarse la expresión aproximada (11) de los márgenes contra el desvanecimiento, $F_{b,90}$ para tener en cuenta la correlación entre la señal deseada y la intensidad del ruido de fondo. Se necesita información similar sobre el desvanecimiento de un día a otro; asimismo, se precisan datos sobre la correlación entre las señales y el ruido. Es probable que el desvanecimiento de un día a otro de la señal esté correlacionado con separaciones más grandes, tanto espaciales como de frecuencia, que el desvanecimiento durante una hora. Mediciones preliminares [Gibson, 1989] indican un elevado coeficiente de correlación (> 99,9%) para las variaciones de un día a otro a frecuencias separadas por hasta 10 kHz, pero no arrojan correlaciones notables para una separación de 20 a 100 km entre los sitios de recepción.

7.4 *Características de la señal relacionadas con la codificación*

En las aplicaciones modernas de telecomunicaciones digitales, las configuraciones con diversidad se emplean invariablemente con codificación de las señales. La forma básica de codificación es la de corrección de errores sin canal de retorno (FEC) [Wu, 1971; Diffie y Hellman, 1976; Fang, 1975]. Para este tipo de codificación se establecen varias hipótesis comunes en cuanto a las características del canal ionosférico. La señal recibida suele representarse con una componente de ruido blanco gaussiano aditivo, un desvanecimiento instantáneo poco profundo (< a 4 dB) y un desvanecimiento ocasional profundo (> a 4 dB).

Ciertos parámetros revisten gran importancia: el número de bits durante el desvanecimiento profundo n_1 , y el número de bits durante el desvanecimiento instantáneo n_2 ; ambos guardan relación con la velocidad de transmisión de datos del canal y con la dinámica de la ionosfera. Las técnicas de codificación FEC y de diversidad en el tiempo para este tipo de canal corresponden esencialmente a dos categorías. En la primera categoría, se utilizan dispositivos de entrelazado para dispersar los bits transmitidos durante el desvanecimiento profundo de manera que cada error de bit parezca ser independiente de los demás. Se aplica entonces un código de corrección FEC bastante potente para corregir la mayoría de esos errores. En la segunda categoría se utiliza un código FEC de corrección de errores suficientemente potente para corregir la mayoría de los errores durante el periodo sin desvanecimiento profundo a fin de obtener un canal satisfactorio durante el periodo sin desvanecimiento. Wu [1971], Diffie y Hellman [1976] y Fang [1975] dan más detalles.

8. **Caracterización de canales para señales moduladas**

Se ha hecho un riguroso desarrollo matemático de la teoría que abarca la caracterización de canales considerados como filtros que varían en función del tiempo [Zadeh y Desoer, 1963]. Este desarrollo empírico de la caracterización de canales radioeléctricos exige un estudio del medio ambiente radioeléctrico global, más completo que el que ha sido posible hacer debido a las limitaciones con que se han planteado los experimentos de propagación realizados hasta la fecha. Aunque varios investigadores [Green, 1963; Bello, 1963 y 1964] han desarrollado gran parte de los conocimientos teóricos fundamentales, queda aún mucho por hacer.

Ha habido otras aportaciones en este campo [Turin, 1956; Brennan, 1959; Barrow, 1963; Staras, 1956; Pierce y Stein, 1960; Wozencraft, 1961; Baghdady, 1961; Bello y Nelin, 1963].

Para la caracterización de canales se han utilizado varios modelos, y el Informe 549 trata detalladamente de los simuladores de la propagación ionosférica en ondas decamétricas. Watterson y otros [1970] describen un modelo y su confirmación experimental. Su trabajo también incluye una amplia bibliografía. A continuación se reproduce el resumen de este trabajo, como ejemplo típico de esta materia:

«Resumen. — A fin de confirmar la validez y las limitaciones de anchura de banda de un modelo de canal ionosférico estacionario en ondas decamétricas, se efectuaron y analizaron mediciones especiales de propagación ionosférica en ondas decamétricas. En el modelo, la señal de entrada (transmitida) se aplica a una línea ideal de retardo que tiene varios puntos de derivación con retardos ajustables, uno para cada componente de la señal. Cada señal retardada se modula en amplitud y fase según una función de ganancia para cada una de las derivaciones de la banda de base y las señales retardadas y moduladas se suman (con ruido aditivo) para formar así la señal de salida (recibida). Las especificaciones estadísticas para las funciones de ganancia de las derivaciones se basaron en tres hipótesis: 1) que cada función de ganancia de las derivaciones es una función gaussiana compleja que produce desvanecimiento Rayleigh; 2) que las funciones de ganancia de las derivaciones son independientes, y 3) que cada función de ganancia de las derivaciones tiene un espectro que, en general, es la suma de dos funciones gaussianas de frecuencia, una para cada componente magnetoiónica. Se realizaron pruebas estadísticas con datos obtenidos mediante mediciones diurnas y nocturnas, que confirmaron la validez de las tres hipótesis y, en consecuencia, la validez del modelo. Para aplicaciones prácticas, el modelo puede considerarse válido para una anchura de banda igual a aproximadamente un cuarto de la inversa del valor efectivo (ponderado) de las dispersiones de tiempo en las componentes modales ionosféricas. El modelo debe ser útil tanto para análisis teóricos de las características de sistemas de telecomunicación como para diseños de simuladores de canales.»

Se ha seguido otro método consistente en el estudio de modelos de trayectos de propagación que permiten una mayor precisión en la evaluación cuantitativa de las posibilidades de transmisión de información [Konopleva y Khmel'nitsky, 1970; 1972]. Debe verificarse la precisión de este método y la posibilidad de basar los cálculos en las características de canales reales; en lo que respecta a la variación de los parámetros tanto de la señal deseada [Khmel'nitsky, 1970b] como interferente [Khmel'nitsky, 1969] debe comprobarse en circuitos de diversa orientación y longitud.

En España, se han efectuado mediciones de la respuesta impulsiva de un canal en la banda de ondas decamétricas [CCIR, 1982-86d], concluyéndose que este método resulta válido para caracterizar estos tipos de canales e incluso podría aplicarse al análisis de canales en otras bandas de frecuencias.

9. Interés de otros estudios

Convendría proseguir los estudios sobre lo expuesto en los § 7 y 8 precedentes, especialmente en lo que respecta a trayectos ionosféricos en distintas partes del mundo.

Por ejemplo, entre las causas físicas de los desvanecimientos, parece que deberían estudiarse más a fondo los efectos de enfoque y desenfoque [Fok, 1950; Liakhova, 1965; Rawer, 1952; Kerblai, 1963]. Estos fenómenos se manifiestan con notable periodicidad, lo que permite creer que puede hacerse de ellos una descripción más satisfactoria que la que actualmente se obtiene con modelos estadísticos aleatorios.

Para mejorar los conocimientos sobre la severidad y la rapidez de los desvanecimientos, es preciso completar la teoría estadística aleatoria con cierto número de métodos teóricos a fin de poder tratar el problema, importante desde el punto de vista práctico, de los desvanecimientos de larga duración y de los aumentos de la intensidad de campo ligados a las irregularidades de la ionosfera. Los métodos de autocorrelación deberían ser de utilidad en el estudio de los fenómenos situados entre los fenómenos periódicos y los fenómenos aleatorios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAGHDADY, E. J. [1961] *Lectures on Communication System Theory*. Capítulos 5 y 6, McGraw-Hill, New York, NY, Estados Unidos de América.
- BAILEY, D. K. [1959] The effect of multipath distortion on the choice of operating frequencies for high-frequency communication circuits. *IRE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-7, 397-405.
- BALSER, M. y SMITH, W. B. [1962] Some statistical properties of pulsed oblique HF ionospheric transmissions. *NBS J. Res.*, Vol. 66D, 6, 721-730.
- BARROW, B. B. [1963] Diversity combination of fading signals of unequal mean strengths. *IEEE Trans. Comm. Systems*, Vol. CS-11, 73.
- BELLO, P. A. [1963] Characterization of randomly time-variant linear channels. *IEEE Trans. Comm. Systems*, Vol. CS-11, 360-393.
- BELLO, P. A. [1964] Measurement of the complex time-frequency channel correlation function. *NBS J. Res.*, Vol. 68D, 1161-1165.
- BELLO, P. A. y NELIN, B. D. [1963] The effect of frequency selective fading on the binary error probabilities of incoherent and differentially coherent matched filter receivers. *IEEE Trans. Comm. Systems*, Vol. CS-11, 170.
- BENNINGTON, T. W. [1960] Equatorial ionospheric effects. *Wireless World*, Vol. 66, 10, 501-506.
- BLAGOVESHCHENSKY, D. V. [1981] Rasprostraneniye dekametrovykh radiovoln v vysokikh shirotakh (Propagación de las ondas decamétricas en latitudes altas), 180. Nauka Publishing House, Moscú, URSS.

- BOGDANOV, S. E. y SEGAL, G. F. [1967] Statisticheskie svoystva srednikh znachenii napryazhonosti poly a korotkovolnovykh signalov (Características estadísticas de los valores medios de la intensidad de campo en el caso de señales de onda corta). Colección de Documentos del NIIR, 3, (47).
- BOOKER, H. G., RATCLIFFE, J. A. y SHINN, D. H. [1950] Diffraction from an irregular screen with applications to ionospheric problems. *Phil. Trans. Roy. Soc. (Londres), Series A*, 242, 579.
- BOWHILL, S. A. [1957] Ionospheric irregularities causing random fading of very low frequencies. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 11, 91-101.
- BRADLEY, P. A. y VERNON, A. [1982] Decile deviations of HF daily signal strengths. GIT 6/1 Doc. 218.
- BRAMLEY, E. N. [1951] Diversity effects in spaced-aerial reception of ionospheric waves. *Proc. IEE*, 98, Part III, 19-25.
- BRENNAN, D. G. [1959] Linear diversity combining techniques. *Proc. IRE*, Vol. 47, 6, 1075-1102.
- BRENNAN, D. G. [1960] The extrapolation and interpolation of spatial correlation functions. *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, 296-305. Ed. W. C. Hoffman, Pergamon Press, New York/Oxford.
- BRENNAN, D. G. [1961] Probability theory in communication system engineering (Chapter 2); Analysis of long-term variability (Chapter 20). *Lectures on Communication System Theory*. Ed. E. Baghdady, McGraw-Hill, New York, NY, Estados Unidos de América.
- BRENNAN, D. G. y PHILLIPS, M. L. [1957] Phase and amplitude variability in medium frequency ionospheric transmission. Lincoln Lab., MIT, TR-93.
- BRIGGS, B. H. [1951] An investigation of certain properties of the ionosphere by means of a rapid frequency change experiment. *Proc. Phys. Soc.*, Vol. 64B, Parte 3, 375B, 255-274.
- BRIGGS, B. H., PHILLIPS, G. J. y SHINN, D. H. [1950] The analysis of observations on spaced receivers of the fading of radio signals. *Proc. Phys. Soc.*, Vol. 63B, Parte 2, 362B, 106-121.
- CHERNOV, Yu. A. [1989] - Raspredelenie medlennykh zamiraniy VCh signala vblizi MPCh. (Distribution of slow fades of HF signal near the MUF). Proceedings of NIIR, No. 2.
- DAVIES, K. [1965] Ionospheric radio propagation. NBS Monograph No. 80.
- DAVIES, K. y BARGHAUSEN, A. F. [1964] The effect of spread F on the propagation of radio waves near the equator. AGARD Ninth Meeting of the Ionospheric Research Committee, Copenhagen, Dinamarca.
- DIFFIE, W. y HELLMAN, M. E. [1976] New directions in cryptography. *IEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 22, 644-654.
- DUMBRAVA, Z.F., GORSHKOVA, E.Z., KIYANOVSKY, M.P. y MASHKOVA, E.A. [1988] - Approksimatsiya empiricheskikh raspredeleniy amplitudy dekametrovogo signala. (Approximation of the empirical distribution of the HF signal amplitude.) Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike solntsa, Moscú, Nauka, No. 80.
- DYAKOV, A.V. y KIYANOVSKY, M.P. [1981] - Metodika alternativnoi otsenki prinadlezhnosti statisticheskoi vyborki k konkretnym zakonom raspredeleniya. (Alternative evaluation of statistical selection as a specific distribution law.) Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike solntsa, Moscú, Nauka, No. 55.
- FANG, R. J. [1975] DIVEC, a combined diversity and error control scheme. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 5, 105-133.
- FOK, V. A. [1950] Obobchtchenie otrajatelnykh formul na sluchai otrajeniia proizvolnoi volny ot poverkhnosti proizvolnoi formy (Generalización de las fórmulas de reflexión al caso de la reflexión de una onda arbitraria sobre una superficie de forma arbitraria). *Journ. Eksp. Teoret. Fisiki*, 20, 961.
- GIBSON, A. J. [1989] - Measurements of fading on HF communication links. Proc. 6th Intl. Conf. on Antennas and Propagation (ICAP 89), IEE Conf. Pub. No. 301 (Part 2) 23-30.
- GLAZER, J. y FARBER, L. [1953] Evaluation of polarization diversity performance. *Proc. IRE*, Vol. 41, 1774-1778.
- GORSHKOVA, E.Z., DUMBRAVA, Z.F., DYAVOK, A.V., KIYANOVSKY, M.P. y PISAREVA, L.Y. [1985] - Alternativnaya otsenka prinadlezhnosti empiricheskikh raspredeleniy k konkretnym teoreticheskim zakonom. (Alternative evaluation of empirical distributions as specific theoretical laws.) Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike solntsa, Moscú, Nauka, No. 73.

- GREEN, P. E., hijo [1963] Time-varying channels with delay spread. *Monograph on Radio Waves Circuits*. Ed. S. Silver, Elsevier, Londres, Reino Unido.
- GRISDALE, G. L., MORRIS, J. G. y PALMER, D. S. [1957] Fading of long-distance radio signals and a comparison of space- and polarization-diversity reception in the 6-18 Mc/s range. *Proc. IEE*, Vol. 104B, 13, 39-51.
- GROSSKOPF, J. [1953] Statistical studies of short-wave transmission paths. *NTZ*, 6, 373-378.
- GROSSKOPF, J. [1955a] Feldstärkemessungen im Kurzwellenbereich, I. Teil (Mediciones de la intensidad de campo en la banda de ondas decamétricas. 1ª parte). *NTZ*, 8, 114.
- GROSSKOPF, J. [1955b] Feldstärkemessungen im Kurzwellenbereich, II. Teil (Mediciones de la intensidad de campo en la banda de ondas decamétricas. 2ª parte). *NTZ*, 8, 146.
- HUMBY, A. M. [1959] Equatorial sunset effect. *Wireless World*, Vol. 65, 7/8, 343-345.
- KERBLAĬ, T. S. [1963] Vliiania gorizontalnykh gradientov elektronnoi kontsentratsii v ionosphere na velichinou MPTCH (Influencia de los gradientes horizontales de la concentración electrónica de la ionosfera en el valor de la MUF). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 3, 772.
- KERBLAĬ, T. S., NOSOVA, G. N., ALLBERDIEV, D. y POROSNAYA, A. P. [1974] O kharaktere zamiraniia signala pri razlichnykh sposobakh rasprostraneniia radiovoln (Características del desvanecimiento de la señal según el modo de propagación). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 14, 6, 1024.
- KERBLAĬ, T. S., NOSOVA, G. N., MINULLIN, R. G. y KURGANOV, R. A. [1977] Periodi fluktuatsii signalov obuslovlennikh ionosfernimi rasseianiem i otrazheniem ot sloia Es na chastotakh 27.8 i 40.3 MHz (Periodos de fluctuación de la señal causada por la dispersión ionosférica y por las reflexiones en la capa Es, para frecuencias de 27,8 y 40,3 MHz). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 17, 2, 231.
- KHMELNITSKY, E. A. [1960] *Raznessennyi priem i opredelenie ego effektivnosti* (Recepción por diversidad y evaluación de su eficacia). Sviiazizdat, Moscú, URSS.
- KHMELNITSKY, E. A. [1969] Verayatnost sboya na kv liniyakh svyazi pri pomekhakh ot sosednykh po chastote stantsii (Probabilidad de error en los circuitos de ondas cortas debido a la interferencia de estaciones que transmiten en frecuencias adyacentes). *Elektrosviaz*, 4, 22-30.
- KHMELNITSKY, E. A. [1970a] Sravneniie eksperimentalnykh i raschotnykh znachenii urovnya signala v KV diapazone (Comparación entre los valores experimentales y calculados de los niveles de la señal en la gama de onda corta). *Elektrosviaz*, 6, 45-51.
- KHMELNITSKY, E. A. [1970b] Otsenka kachestva kv kanala svyazi dlya peredachi diskretnykh signalov (Evaluación de la calidad de un canal de ondas cortas para la transmisión de señales discretas). *Elektrosviaz*, 10, 18-32.
- KHMELNITSKY, E. A. [1975] Otsenka realnoi pomekhozashchishchennosti priyema signalov v KV diapazone (Evaluación de la protección efectiva contra la interferencia en recepción de la señal para la gama de onda corta). Sviiaz, Moscú, URSS.
- KONOPLEVA, E. N. [1964] Confiabilidad de las comunicaciones y relación señal/ruido necesaria en los canales radioeléctricos por ondas métricas, (en ruso). *Elektrosviaz*, 5, 3-8.
- KONOPLEVA, E. N. y KHMELNITSKY, E. A. [1970] Vozmozhnye sostoyaniya kv kanala svyazi po usloviyam rasprostraneniya radiovoln (Posibles estados de un canal de ondas cortas en función de las condiciones de propagación). *Elektrosviaz*, 12, 19-24.
- KONOPLEVA, E. N. y KHMELNITSKY, E. A. [1972] Modeli rasprostraneniya radiovoln na kv liniyakh svyazi neoptimalnoi protyazhennosti (Modelos de propagación para circuitos de ondas cortas de longitud no óptima). *Elektrosviaz*, 1, 33-38.
- KOSIKOV, K. M. [1975] Zamiranie signala (Desvanecimiento de la señal). Colección de Documentos del NIIR, 2(6), 42-45.
- KOSTER, J. R. [1963] Some measurements on the sunset fading effect. *J. Geophys. Res.*, Vol. 68, 2571-2578.
- LIAKHOVA, L. N. [1965] Otsenka effekta fokoussirovki pri rasprostraneniia radiovoln po rikochetirouemoi traiektorii (Evaluación del efecto de enfoque cuando las ondas radioeléctricas se propagan a lo largo de una trayectoria compuesta de varios saltos). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 5, 351.
- MALYGIN, V. B. y SERGEEV, O. I. [1982] Rezultaty eksperimentalnoi otsenki korrelyatsionnoi i spektralnoi funktsii ogibayushchei KV-signala (Resultados de una evaluación experimental de las funciones de correlación y espectrales de la envolvente de señales de ondas decamétricas). *NIIR Proc.*, 2.
- MALYGIN, V. B. y SERGEEV, O. I. [1984] Otsenka intervalov chastotnoy korrelyatsii ogibayushchei KV-signala pri razlichnykh usloviyakh rasprostraneniya (Evaluación de los intervalos de correlación de frecuencias de la envolvente de las señales de ondas decamétricas para distintas condiciones de propagación). *Radiotekhnika*, 10.
- MALYGIN, V. B. y SERGEEV, O. I. y CHERNOV, Yu. A. [1982] Otsenka mnogoluchevosti KV-Signala po rezultatam impulsnogo naklonnogo zondirovaniya (Evaluación de las características multirayecto de las señales de ondas decamétricas con los resultados obtenidos por sondeo de incidencia oblicua por impulsos) *Radiotekhnika*, Vol. 37, 5.
- McNICOL, R. W. E. [1949] The fading of radio waves of medium and high frequencies. *Proc. IEE*, Part III, 96, 517-524.
- NAKAGAMI, M. [1943] Statistical character of short-wave fading. *J. Inst. Elec. Comm. Engrs. Japan*, 27, 145.
- NAKAGAMI, M. [1960] The m-distribution: a general formula of intensity distribution of rapid fading. *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, 3-36. Ed. W. C. Hoffman, Pergamon Press, New York/Oxford.

- NORTON, K. A., VOGLER, L. E., MANSFIELD, W. V. y SHORT, P. J. [1955] The probability distribution of the amplitude of a constant vector plus a Rayleigh distributed vector. *Proc. IRE*, Vol. 43, 1354-1361.
- OSBORNE, B. W. [1952] Note on ionospheric conditions which may affect tropical broadcasting after sunset. *J. Brit. Inst. Radio Engrs.*, 12, 110.
- PICKERING, L. W. [1975] The calculation of ionospheric Doppler spread on HF communication channels. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-23, 526-537.
- PICQUENARD, A. [1974] *Radio Wave Propagation*. Halsted Press, John Wiley and Sons, Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- PIERCE, J. N. y STEIN, S. [1960] Multiple diversity with non-independent fading. *Proc. IRE*, Vol. 48, 1, 89-104.
- POLKINGHORN, F. A. [1940] A single-sideband Musa receiving system for commercial operation on transatlantic radiotelephone circuits. *Proc. IRE*, Vol. 28, 4, 157-170.
- POTTER, R. K. [1930] Transmission characteristics of a short-wave telephone circuit. *Proc. IRE*, Vol. 18, 581-648.
- PRICE, R. [1957] The autocorrelogram of a complete carrier wave received over the ionosphere at oblique incidence. *Proc. IRE*, Vol. 45, 879-880.
- PRICE, R. y GREEN, P. E. [1958] A communication technique for multipath channels. *Proc. IRE*, Vol. 46, 555-570.
- RATCLIFFE, J. A. [1956] Some aspects of diffraction theory and their application to the ionosphere. *Reports on Progress in Physics*, 19, 188, Proc. Physical Society, Londres, Reino Unido.
- RAWER, K. [1952] Calculation of sky-wave field strength. *Wireless Engineer*, Vol. 29, 287-301.
- RICE, S. O. [1944, 1945] Mathematical analysis of random noise. *BSTJ*, Vol. XXIII, 282 y Vol. XXIV, 46.
- RICE, S. O. [1948] Statistical properties of a sine wave plus random noise. *BSTJ*, Vol. XXVII, 109-157.
- RICE, S. O. [1958] Distribution of the duration of fades in radio transmission: Gaussian noise model. *BSTJ*, Vol. XXXVII, 3, 581-635.
- RÖTTGER, J. [1973] Langperiodisches Fading von Kurzwellensignalen (Desvanecimientos de largo periodo de señales en ondas cortas). *Kleinheubacher Berichte*, 16, 167-178.
- SAILORS, D. B., KUGEL, C. P. y HAYDON, G. W. [1977] Predicting the compatibility of high frequency sky-wave communication systems. *IEEE Trans. Electromag. Compt.*, Vol. EMC-19, 332-343.
- SALAMAN, R. K. [1962] A new ionospheric multipath reduction factor (MRF). *IRE Trans. Comm. Systems.*, Vol. CS-10, 220-221.
- SERGEEV, O. I. [1974] Rezultaty eksperimentalnoi otsenki kharakteristik vybrosov KV-signalov (Resultados de la evaluación experimental de las características de los desvanecimientos bruscos de ondas decamétricas). *NIIR Proc.*, 2.
- SERGEEV, O. I. [1975] Rezultaty izmereniya skorosti interferentsionnykh zamiraniy KV-signalov pri razlichnykh usloviyakh rasprostraneniya (Resultados de la medición de la rapidez de los desvanecimientos de las señales de ondas decamétricas producidos por la interferencia para diferentes condiciones de propagación). *NIIR Proc.*, 1.
- SERGEEV, O. I. [1978a] - Rezultaty teoreticheskogo issledovaniya raspredeleniya ogibayushchei interferentsionnykh zamiraniy KV signala (Results of theoretical studies of the distribution of the interference fading envelope of SW signals), *Trudy NIIR*, 1.
- SEERGEV, O. I. [1978b] - Eksperimentalnye otsenki raspredeleniya ogibayushchei KV signala (Evaluaciones experimentales de la distribución de la envolvente de la señal de ondas cortas), *Trudy NIIR*, 4, páginas 13-18.
- SERGEEV, O. I., DOTOLEV, V. G., ZHILTSOV, A. U., PELEVIN, Y. V. y CHERNOV, Y. A. [1985] K voprosu ob eksperimentalnoi otsenke srednego urovnya ogibayushchei KV-signalov (Sobre la evaluación experimental del nivel de la envolvente de las señales de ondas decamétricas). *NIIR, Proc.*, 4.
- SERGEEV, O. I. y FIKS, Y. A. [1982] - Otsenka veroyatnosti oshibok y radiokanale s zamiraniyami pri ogranichenom intervale nablyudeniya (Estimación de la probabilidad de error en un canal radioeléctrico sujeto a desvanecimiento con un intervalo de observación limitado), *Elektrosvyaz*, 9.
- SPAULDING, A. D. [junio de 1982] Fading signals in the MF band. National Telecommunications and Information Administration Report 82-102. NTIS Accession No. PB 82-262916. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Estados Unidos de América.
- STARAS, H. [1956] Diversity reception with correlated signals. *J. Appl. Phys.*, (Lett.), Vol. 27, 1, 93-94.
- STEIN, S. [1966] PART III of *Communication Systems and Techniques*. Por Schwartz, Bennett and Stein, McGraw-Hill, Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- STEIN, S. y JONES, J. J. [1967] *Modern Communication Principles*. McGraw-Hill, Nueva York y Londres.
- TÄUMER, F. y SULANKE, H. [1967 y 1968] Die Eigenschaften von Häufigkeitsverteilungen der Raumwellenfeldstärke im Frequenzbereich von 150-1600 kHz (Características de la distribución de la intensidad de campo de la onda ionosférica en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas). *Techn. Mitt. RFZ*, Vol. 11, 4, 192-195 y Vol. 12, 1, 32-39.
- TURIN, G. L. [1956] Communication through noisy, random-multipath channels. *IRE Nat. Conv. Record*, Parte 4, 154.
- WATTERSON, C. C., JURUSHEK, J. R. y BENSEMA, W. D. [1970] Experimental confirmation of an HF channel model. *IEEE Trans. Comm. Tech.*, Vol. 18, 792-803.

- WOZENCRAFT, J. M. [1961] Sequential reception of time-variant transmission. Ch. 12 *Lectures on Communication Theory*. Ed. E. Baghdady, McGraw-Hill, Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- WU, W. W. [1971] Applications of error-coding techniques to satellite communications. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 1, 183-219.
- YEH, K. C. y VILLARD, O. G. [1958] A new type of fading observable on high-frequency radio transmission propagated over paths crossing the magnetic equator. *Proc. IRE*, Vol. 46, 1968-1970.
- ZADEH, L. A. y DESOER, C. A. [1963] *Linear System Theory*. McGraw-Hill, Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Documentos del CCIR

[1978-82]: 6/63 (URSS).

[1982-86]: a. 6/187 (URSS); b. Doc. 6/54 (Alemania (República Federal de)); c. GIT 6/12 Doc. D14 (GIT 10/5 Doc. 58); d. 6/212 (España).

[1986-90]: a) 6/182 (República Federal de Alemania); b) 6/37 (URSS); c) 6/237 (China).

INFORME 892-2 *

**CÁLCULO DE LA FIABILIDAD DE LOS SISTEMAS RADIOELÉCTRICOS
EN ONDAS DECAMÉTRICAS**

(Programa de Estudios DB/6)

(1982-1986 - 1990)

1. Introducción

El parámetro básico facilitado por casi todos los métodos de predicción de la propagación en ondas decamétricas es la potencia de la señal o la intensidad de campo previstas. Sin embargo, como se señala por ejemplo en el Informe 729 y en el suplemento al Informe 252, los datos sobre la intensidad de campo no son suficientes para cuantificar por completo la calidad de funcionamiento de un servicio radioeléctrico.

Un parámetro de un sistema radioeléctrico en ondas decamétricas que resulta conveniente utilizar como factor de calidad es la fiabilidad prevista. La fiabilidad se define, en general, como la probabilidad de que el sistema alcance un rendimiento especificado.

En el apéndice I figuran definiciones más específicas de los diferentes tipos de fiabilidad. En el Informe 657 se examina la compatibilidad de circuitos, en función de la fiabilidad.

Las fiabilidades previstas son útiles a la hora de optimizar el diseño de las antenas y de seleccionar las combinaciones preferidas de frecuencias y potencias de transmisión necesarias para alcanzar el rendimiento deseado. Por ello, se requieren métodos precisos para estimar las fiabilidades y aplicar estas estimaciones al evaluar el funcionamiento de sistemas radioeléctricos.

En este Informe se describen los diversos métodos de cálculo empleados. La mayoría de los mismos recurren a hipótesis o aproximaciones dado que no se dispone de datos suficientes sobre la correlación entre los diferentes modos que pueden existir simultáneamente en un circuito dado.

Las fiabilidades examinadas en este Informe constituyen una jerarquía, tal como se indica en la Figura 1. En el punto 3 se examina la fiabilidad de modo, en los puntos 4 y 5 la fiabilidad del circuito, en el punto 6 la fiabilidad de recepción y en el punto 7 la fiabilidad del servicio. Las fiabilidades del trayecto y de las comunicaciones, que tienen importancia en las redes de ondas decamétricas, se examinan en el punto 9.

* Este Informe debe señalarse a la atención de las Comisiones de Estudio 3, 8 y 10.