

La multiplicidad de rayos durante la propagación en el trayecto Moscú - Habana

Raúl Martín Hernández⁽¹⁾, Lourdes Palacio Suárez⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto de Geofísica y Astronomía. Calle 212. No.2906 entre 29 y 31, Rpto. La Coronela. La Lisa, Ciudad de La Habana. Cuba

Recibido: enero-octubre, 2000	Aceptado: noviembre, 2000
-------------------------------	---------------------------

Resumen

Con la utilización de datos de Sondeo Inclinado de la ionosfera obtenidos en el circuito radioeléctrico en banda decamétrica Moscú-Habana durante los años 1987-1989 (baja y alta actividad solar del ciclo solar # 22) se caracteriza el comportamiento de la multiplicidad de rayos en este circuito (de gran extensión). Se muestran las dependencias horarias y estacionales del retardo relativo máximo y de la frecuencia asociada a éste; así como las distribuciones de ambos parámetros, encontrándose una fuerte dependencia con la hora del día, la estación del año y el nivel de actividad solar. Se determina que el rango para el cual la probabilidad de propagación monomodal es grande corresponde a frecuencias de trabajo superiores al 0,9 de la Frecuencia Máxima Observable.

Palabras clave: ionosfera, actividad solar.

Ray multiplicity in the Moscow - Havana propagation path

Abstract

Using the records of the oblique-incidence ionospheric sweep frequency sounding obtained over the path between Moscow and Havana in the period 1987-1989 (during cycle 22's low and high solar activity) ray multiplicity behavior is characterized. Hourly and seasonal dependence of relative maxima delay and associate frequency are shown; therefore the distributions of both parameters, a strongly dependence with time, season and level of solar activity was found. In the present study was established that for frequencies greater than 0,9 MOF the probability of monomodal propagation has a maximum.

Key words: ionosphere, solar activity.

Introducción

La efectividad y calidad del trabajo de los circuitos radioeléctricos en banda decamétrica, principalmente los utilizados para telegrafía y fototelegrafía, se ven influidos grandemente por la multiplicidad de rayos durante la propagación de las ondas por la ionosfera. La propagación por modo único proporciona el mejor canal de comunicación, puesto que limita el tiempo de distorsión para el circuito y de esta forma la interferencia entre símbolos radiotelegráficos (CCIR, 1986b).

La existencia de multiplicidad de rayos se debe fundamentalmente, a los siguientes factores:

- descomposición de la onda ionosférica en dos rayos (ordinario y extraordinario);
- existencia de irregularidades de la concentración electrónica en las capas de la ionosfera;
- diferencia de trayectorias para los rayos superiores e inferiores;
- existencia de irregularidades en la superficie terrestre donde se reflejan las ondas.

Esta multiplicidad de rayos es el resultado de viajar la onda de radio, desde el transmisor hasta el receptor, por diferentes caminos de distintas longitudes (modos de propagación), existiendo un retardo ($d t$) entre los mismos. La magnitud de este retardo puede alcanzar valores iguales o mayores que la duración de un símbolo elemental, creando interferencias.

Para seleccionar la frecuencia de trabajo es importante conocer el sector del diapásón de frecuencias para el cual se garantiza un determinado nivel de defensa contra la multiplicidad de rayos. Violar durante la transmisión de información la relación $s > d t$ provocaría la distorsión de la señal emitida y por tanto un error en la recepción. La magnitud y carácter de la distorsión depende en particular de las variaciones del retardo y este último está fuertemente relacionado con la frecuencia de trabajo (Ignatov, 1983).

La inmensa mayoría de los trabajos sobre multiplicidad de rayos han estado dirigidos a establecer su comportamiento en circuitos menores de cinco mil kilómetros de extensión en latitudes medias y altas (CCIR, 1986a, Dolujanov, 1971; Kalinin y Cherenkova, 1971; Bok e Ignatov, 1983). A mayor longitud del circuito más complejo se hace su estudio, sobre todo si el mismo pasa por las zonas de altas latitudes, atravesando el óvalo auroral o la región polar.

Materiales y métodos

El Sondeo Inclinado de la Ionosfera con barrido en frecuencia es la forma más utilizada universalmente para la evaluación de un canal de comunicación y la determinación de la frecuencia de funcionamiento en un circuito radioeléctrico ionosférico (CCIR, 1986c). En el presente trabajo se utilizaron ionogramas de Sondeo Inclinado de la ionosfera del circuito radioeléctrico Moscú - Habana (~ 10000 Km), obtenidos en Cuba durante los años 1987-1989.

Del ionograma de Sondeo Inclinado es posible obtener la información que nos permita evitar la banda de mayor interferencia y seleccionar la gama de frecuencias donde exista la mayor probabilidad de propagación por modo único. Las características analizadas de la multiplicidad de rayos fueron:

- $d t$ retardo relativo máximo
- f_m frecuencia a la cual se observa $d t$
- $f_1 - f_2$ banda de frecuencias con modo único

La data experimental fue agrupada en tres estaciones: invierno (enero, febrero noviembre, diciembre); equinoccio (marzo, abril, septiembre, octubre) y verano (mayo, junio, julio, agosto), y cada una de ellas en dos niveles de actividad solar: baja ($R12 < 60$) y alta ($R12 > 140$).

Resultados y discusión

Variaciones temporales del retardo relativo máximo

Los pasos diarios de los valores medianos del retardo relativo máximo ($d t_m$) obtenidos experimentalmente en el circuito Moscú-Habana para las diferentes estaciones del año y niveles extremos de actividad solar se presentan en la Fig. 1. Además se muestran estos pasos para los años agrupados como un todo. En el trabajo el tiempo se indica en UT.

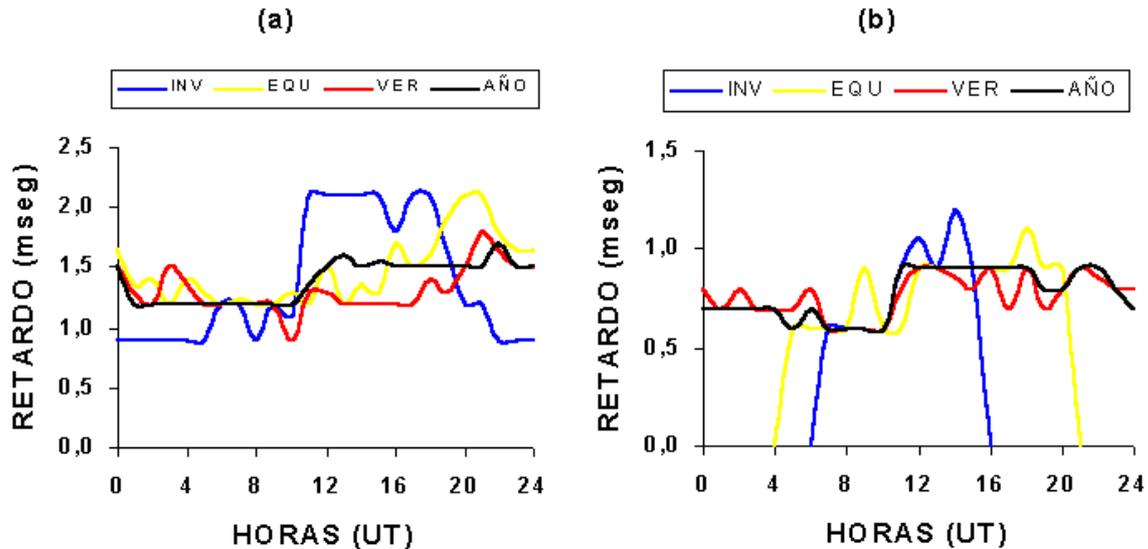


Fig. 1. Pasos diarios del retardo relativo máximo. a) Alta actividad solar b) Baja actividad solar

Como se observa en la figura, tanto los valores medianos horarios como sus variaciones se diferencian considerablemente, siendo en el período de alta actividad solar ($1,2 \leq d \leq 1,7$ mseg) aproximadamente el doble que en baja actividad solar ($0,6 \leq d \leq 0,9$ mseg).

Los resultados muestran un paso bien definido, estando los valores máximos de retardo en las horas diurnas, cuando la probabilidad de aparición de la multiplicidad de rayos de la señal es grande. Para las horas de la noche, el valor del retardo disminuye suavemente alcanzando el mínimo hacia la medianoche. Con el paso de las estaciones del invierno al verano el carácter de la variación diaria se va suavizando.

El comportamiento observado está condicionado evidentemente a la geometría del trayecto y a la iluminación en el mismo. En invierno y equinoccio, las horas para las cuales se observan los valores máximos del retardo se corresponden con las de mayor iluminación del circuito, lo que conlleva la existencia de mayores frecuencias críticas de las capas ionosféricas y mayor probabilidad de modos diferentes de propagación.

En el verano, estación para la cual el circuito está prácticamente iluminado todo el tiempo y por tanto es menor la variación de la frecuencia crítica de las capas, el máximo se corresponde con las horas de mayor ancho de la banda de frecuencias que se propagan en esa época (Martín et al., 2000) y por tanto, con las de mayor cantidad de modos.

Es interesante señalar que en el invierno el valor máximo del retardo relativo es mayor, lo que puede ser explicado por la anomalía estacional de invierno, que provoca valores de frecuencias críticas mayores para esta estación, y por tanto, la existencia de una mayor cantidad de modos.

Las distribuciones acumulativas del retardo relativo máximo observado en el circuito Moscú - Habana para las diferentes estaciones del año y para las fases extremas del ciclo de actividad solar se muestran en la Fig. 2. Las curvas se construyeron con los resultados de las observaciones horarias para cada estación y para todo el año. En el eje de las ordenadas se da la cantidad de casos, en por ciento, en que el valor del retardo es menor o igual al valor indicado en el eje de las abscisas.

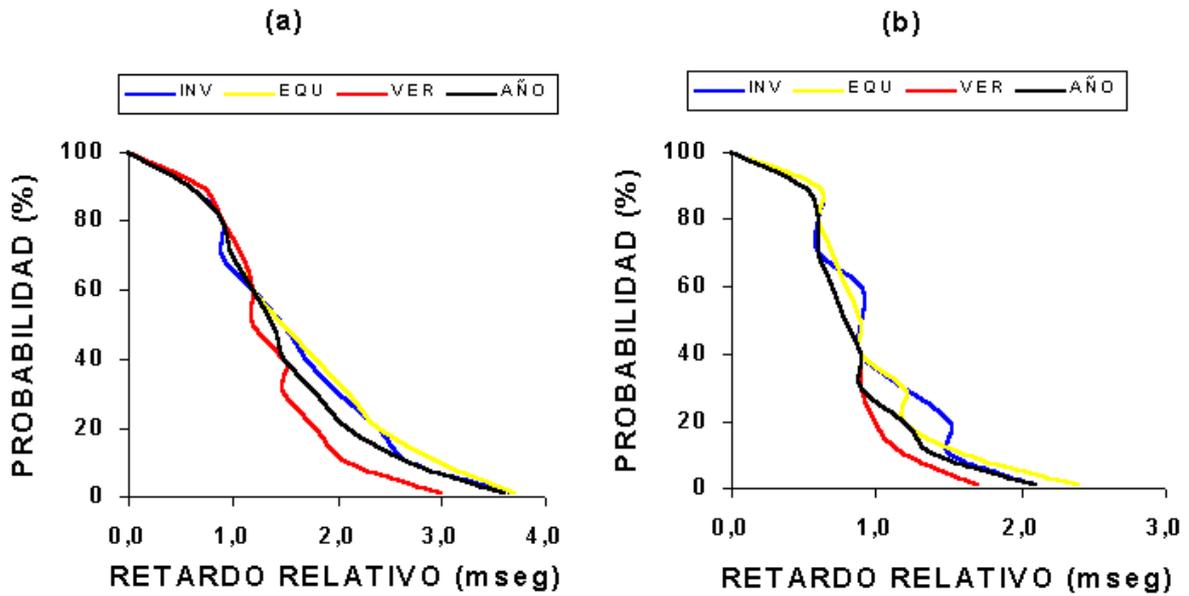


Fig. 2. Distribuciones acumulativas del retardo relativo máximo. a) Alta actividad solar; b) Baja actividad solar

TABLA I. Valores del retardo relativo máximo (mseg) obtenidos de los ionogramas de S.I.

EPOCA		DISTRIBUCION (%)									
		10	20	30	40	50	60	68	70	80	90
AÑO DE BAJA		1.4	1.2	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5
AÑO DE ALTA		2.7	2.1	1.8	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8
BAS	VER	1.2	1.0	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5
	EQU	1.6	1.2	1.2	0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6
	INV	1.5	1.5	1.2	0.9	0.9	0.9	0.8	0.6	0.6	0.6
AAS	VER	2.1	1.8	1.5	1.4	1.2	1.2	1.2	1.1	0.9	0.7
	EQU	3.0	2.4	2.1	1.8	1.5	1.2	1.2	1.1	0.9	0.7
	INV	2.7	2.4	2.0	1.8	1.5	1.2	0.9	0.9	0.9	0.6

Como se ve de la figura y de la Tabla I los valores del retardo dependen de la época del año y del nivel de actividad solar. Así, si para baja actividad solar se alcanzan valores de retardo de 1,2 mseg en aproximadamente el 20% de los casos, ese mismo valor se alcanza en alta actividad solar cerca del 60%

Comportamiento de fm

La variación diaria del valor mediano de la frecuencia para la cual se observa el retardo relativo máximo, fm, en las diferentes épocas del año y los niveles bajo y alto de actividad solar se muestran en la Fig. 3. En la misma se destaca un paso bien marcado de este parámetro, estando el mismo estrechamente relacionado con las condiciones de iluminación en el circuito y el nivel de actividad solar. Se observa además, que con el paso de las estaciones de verano a invierno el porcentaje de casos en que se alcanza ese valor de retardo varía del 10 al 30 en baja y del 50 al 65 en alta actividad solar.

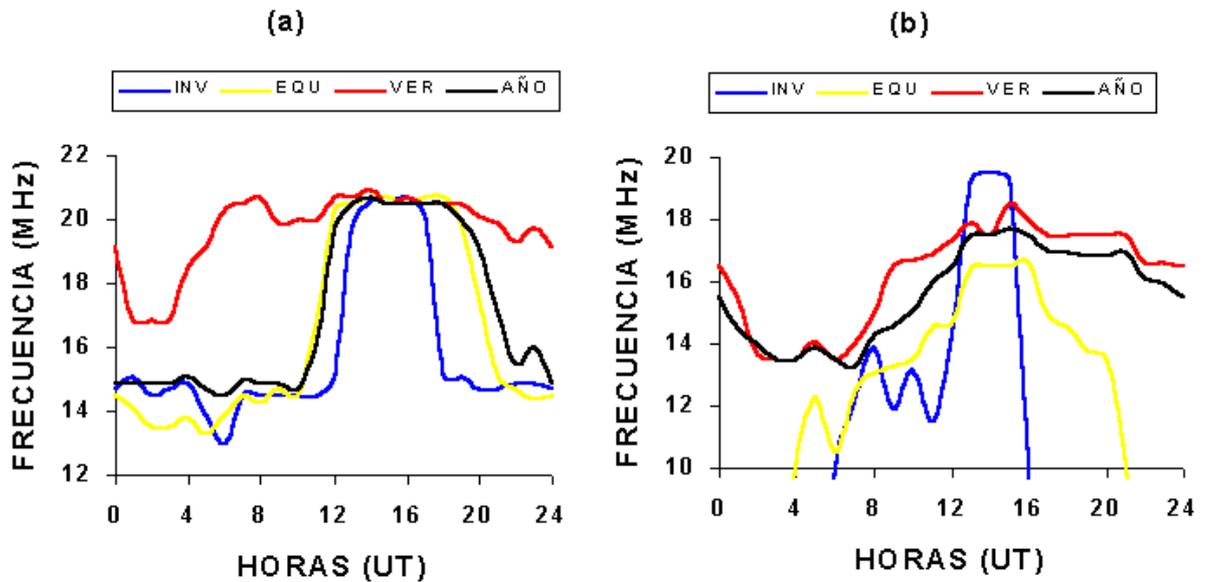


Fig. 3. Pasos diarios de la frecuencia asociada al retardo relativo máximo. a) Alta actividad solar; b) Baja actividad solar

El comportamiento de la relación entre el valor mediano de la frecuencia para la cual se observa el retardo relativo máximo y la Frecuencia Máxima Observada en el circuito, f_m/MOF , muestra (Fig. 4) una variación bastante irregular oscilando los valores entre 0,6 y 1,0 en invierno y equinoccio, para cualquier actividad solar, mientras en verano se nota una variación más suavizada con valores comprendidos entre 0,8 y 0,96. Es interesante hacer notar que los valores f_m/MOF obtenidos en este circuito son superiores a los mostrados por Jodzha-Axmedov y Kashurko (1978) para trayectos del orden de cinco mil kilómetros, lo que confirma la suposición hecha por estos autores de que esa relación aumenta con la longitud del trayecto.

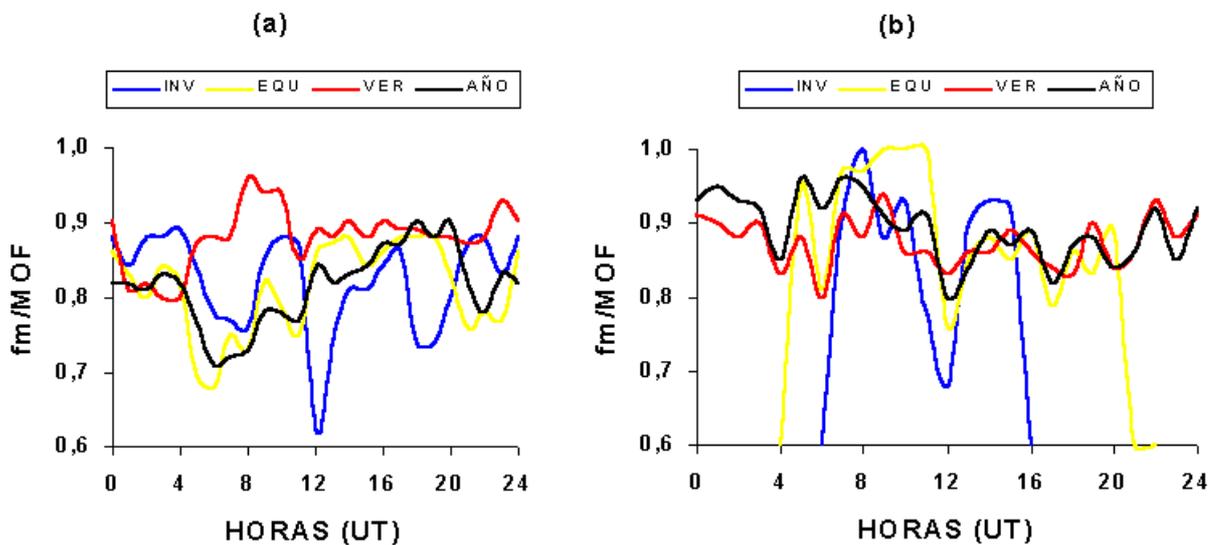


Fig. 4. Variación diaria de la relación f_m/MOF . a) Alta actividad solar; b) Baja actividad solar

Con el fin de determinar las frecuencias en las que con mayor probabilidad se corresponde el retardo relativo máximo se construyeron - con los valores del parámetro f_m/MOF - los histogramas correspondientes a cada estación y nivel de actividad solar (Fig. 5). El análisis de los histogramas muestra que el valor más probable, con excepción del invierno de baja actividad solar, está entre 0,8 y 0,9. Las distribuciones acumulativas correspondientes muestran que valores de f_m superiores a 0,9 MOF se alcanzan en un 29% de casos en baja actividad solar y solamente en un 6% en el período de alta. Para el invierno de baja, el valor señalado se sobrepasa en un 56% de los casos.

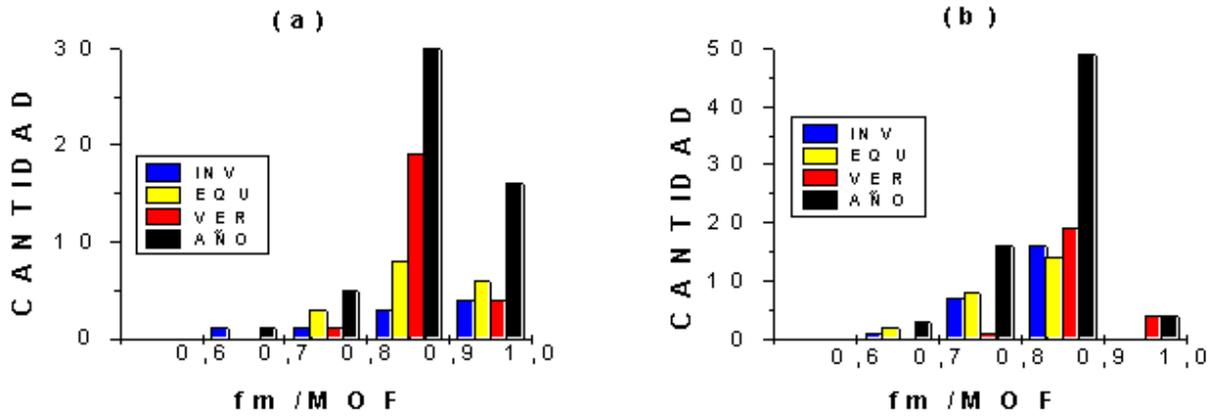


Fig.5 . Histogramas de fm/MOF. a) Alta actividad solar; b) Baja actividad solar

Las observaciones realizadas en el circuito Moscú - Habana muestran (Fig. 6) que el valor del retardo depende grandemente de la relación fm/MOF. Se observa que con el aumento de ésta el retardo disminuye. Esta regularidad concuerda con lo expresado en la literatura con respecto a circuitos de menor extensión (Kalinin y Cherenkova, 1971; Ignatov, 1986).

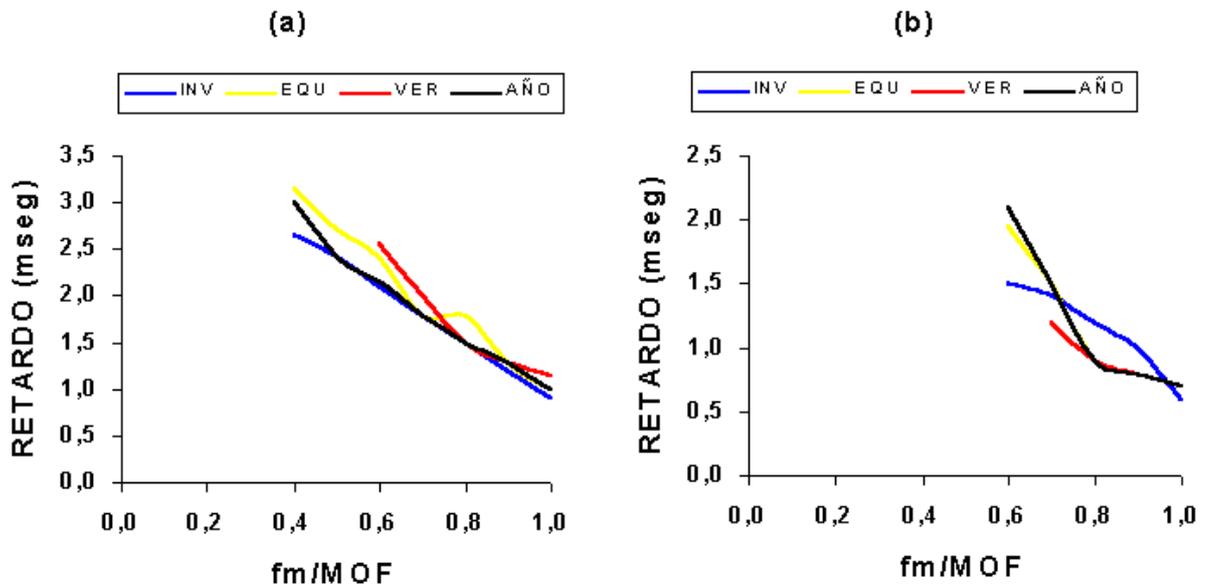


Fig. 6. Dependencia del valor de retardo relativo máximo con la relación fm/MOF. a) Alta actividad solar; b) Baja actividad solar.

El ionograma de Sondeo Inclinado permite determinar de forma directa la banda, dentro de la gama de frecuencias que se propagan en un circuito determinado, para la cual existe solamente un modo de propagación (modo único). La variación diaria de esa banda observada en el circuito Moscú - Habana se muestra en la Fig. 7. Los valores de frecuencia están normalizados con la MOF correspondiente a la hora. Se nota que en general la banda es estrecha.

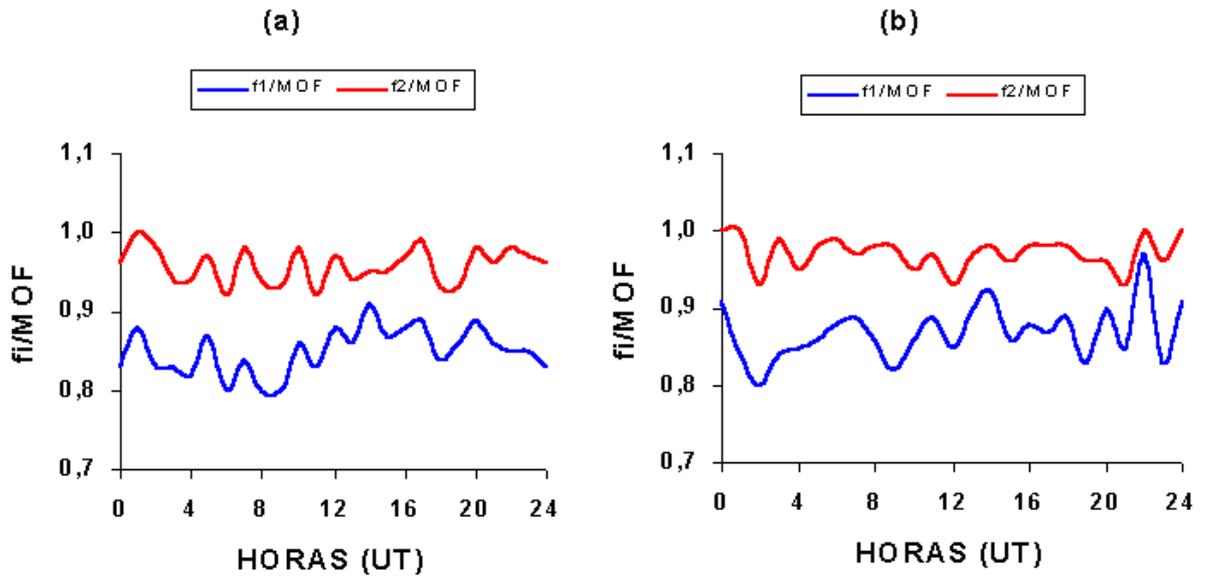


Fig. 7. Variación diaria de la banda de frecuencia monomodal. a) Alta actividad solar; b) Baja actividad solar. f1 y f2 valores menor y mayor de la banda

Para determinar los intervalos de frecuencia donde la probabilidad de propagación por modo único sea alta y la probabilidad de existencia de retardos máximos sea baja, se construyeron las distribuciones acumulativas de $f1/MOF$ y $f2/MOF$ ($f1$ y $f2$ valores menor y mayor de frecuencia en la banda monomodal). Los valores obtenidos se tabularon conjuntamente con los resultados de las distribuciones acumulativas de la relación f_m/MOF (Tabla II).

Tabla II. Tabulación de las distribuciones acumulativas de f_m/MOF , $f1/MOF$ y $f2/MOF$

	ESTACION	INTERVALO	f_m	$f1$	$f2$
B A J A C T I V I D A D S O L A R	INV	$0,91 < f/MOF < 1,0$	56	89	11
	EQU		60	53	0
	VER		91	96	8
	AÑO		75	81	6
	INV	$0,92 < f/MOF < 1,0$	67	100	11
	EQU		60	60	0
	VER		91	96	17
	AÑO		77	85	10
	INV	$0,93 < f/MOF < 1,0$	89	100	11
	EQU		60	73	0
	VER		96	96	25
	AÑO		83	90	15
	INV	$0,94 < f/MOF < 1,0$	89	100	22
	EQU		60	80	7
	VER		100	96	41
	AÑO		85	92	27

A L T A C T I V I D A D S O L A R	INV	0,88 < f/MOF < 1,0	96	62	4
	EQU		100	71	0
	VER		58	62	4
	AÑO		85	65	3
	INV	0,89 < f/MOF < 1,0	100	75	8
	EQU		100	79	4
	VER		70	75	4
	AÑO		90	76	6
	INV	0,09 < f/MOF < 1,0	100	88	8
	EQU		100	84	13
	VER		84	88	8
	AÑO		94	86	10
	INV	0,91 < f/MOF < 1,0	100	91	9
	EQU		100	100	12
	VER		83	96	16
	AÑO		94	96	13

Del análisis de la Tabla II pueden seleccionarse para el período de baja actividad solar, frecuencias de trabajo, f , que cumplan: $0,93 < f/MOF \leq 1,0$; intervalo en el que es posible encontrar retardos máximos en un 17 % de los casos y modo único en el 85 %; mientras para la fase de alta actividad solar, puede considerarse: $0,9 < f/MOF \leq 1,0$ donde los valores son del 6 % y del 90 % para el retardo y modo único, respectivamente.

Conclusiones

Del estudio del comportamiento de la multiplicidad de rayos observado en el circuito radioeléctrico en banda decamétrica Moscú - Habana durante el período 1987-1989 se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La magnitud del retardo relativo máximo provocado por la propagación multimodal depende de la estación del año y el nivel de actividad solar, siendo mayor en invierno y durante alta actividad solar.
- Existe un paso diario marcado para los valores del retardo relativo máximo, encontrándose en las horas diurnas (UT) los valores mayores. Ello se explica por la geometría del circuito y las condiciones de iluminación del mismo.
- El valor del retardo relativo máximo disminuye con el aumento de la relación f/MOF , lo que concuerda con lo reportado en la literatura para circuitos de menor extensión.
- La frecuencia a la cual corresponde el retardo relativo máximo presenta un paso diario que se asemeja al seguido por la Frecuencia Máxima Observada en el circuito y está condicionado por la iluminación del mismo.
- La variación de la relación f/MOF es bastante irregular con el transcurso del día, siendo el rango de variación menor en el verano que en las restantes estaciones. Además, esta variación, es independiente del nivel de actividad solar y se encuentra -en general- con mayor probabilidad entre los valores de 0,8 y 0,9.
- Las frecuencias de trabajo, f , en este circuito deben seleccionarse, para evitar en lo mayor posible la propagación multimodal, de la siguiente forma:
 $0,93 < f < 1,0$

Bibliografía

- Bok, V. Ia. y B.S. Ignatov (1983). Algunos resultados del estudio de la multiplicidad de rayos en líneas de radio de diferentes longitudes [en ruso]. En Trabajos del Instituto de Investigaciones Científicas del Artico y la Antártida. Sondeo Inclinado de la Ionosfera. Tomo 390, 103-108
- CCIR (1986a). Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones. XIII Asamblea Plenaria. Recomendaciones e informes del CCIR. Volumen 6, Informe 266-6.
- CCIR (1986b). Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones XIII Asamblea Plenaria. Recomendaciones e informes del CCIR. Volumen 6, Informe 889-1.
- CCIR (1986c). Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones XIII Asamblea Plenaria. Recomendaciones e informes del CCIR. Volumen 6, Informe 249-6.
- Dolujanov, M. P. (1971). Procesos fluctuantes en la propagación de las ondas de radio [en ruso]. Editorial Comunicaciones, Moscú.
- Ignatov, V. S. (1983). Valoración del retardo relativo máximo de las señales de radio en un año de mínima actividad solar [en ruso]. En Trabajos del Instituto de Investigaciones Científicas del Artico y la Antártida. Sondeo Inclinado de la Ionosfera. Tomo 390, 96-102
- Ignatov, V. S. (1986). Variación del retardo relativo máximo de las señales de radio en el ciclo de actividad solar [en ruso]. En Trabajos del Instituto de Investigaciones Científicas del Artico y la Antártida. Investigaciones Geofísicas en Latitudes Altas. Tomo 405,171-181
- Jodsha-Axmedov, Ch.L. y M.C. Kashurko (1978). Variación de la multiplicidad de rayos en la propagación de las ondas de radio [en ruso]. En Trabajos del Instituto de Investigaciones Científicas del Artico y la Antártida. Sondeo Inclinado de la Ionosfera. Tomo 351, 54-56
- Kalinin, A.I. y E.L. Cherenkova (1971). Propagación de ondas de radio y trabajos en líneas de radio [en ruso]. Editorial Comunicaciones, Moscú.
- Martín, R. y Lourdes Palacio (2000). "Propagación de las ondas de radio en el trayecto Moscú - Habana. [en el próximo volumen]