

INFORME UIT-R M.739-1*

INTERFERENCIA DEBIDA A LOS PRODUCTOS DE INTERMODULACIÓN EN EL SERVICIO MÓVIL TERRESTRE ENTRE 25 Y 1000 MHz

(Programa de Estudios 7C/8)

(1978-1986)

1. Introducción

La intermodulación produce una degradación de la calidad en los servicios radioeléctricos cuando:

- se generan emisiones no esenciales en los transmisores;
- se generan emisiones no esenciales en elementos no lineales exteriores a los transmisores;
- o
- se generan productos de intermodulación dentro de banda en los pasos de radiofrecuencia de los receptores.

Estos casos se dan con una probabilidad y una gravedad variables. El diseño de los equipos o una elección cuidadosa de los canales puede contribuir a reducir su importancia, pero con la segunda de estas soluciones, es preciso tener en cuenta que mientras pueden suprimir una causa de intermodulación pueden agravar otra.

2. Transmisores

El último paso activo de un transmisor es normalmente un amplificador. La corriente en este paso experimenta repetidamente variaciones que van de amplitud cero a amplitud máxima, siendo probable que la impedancia del dispositivo activo de salida presente una pequeña proporción de no linealidad.

Si alguna otra señal de otra emisión está presente también en la salida de este paso, la no linealidad originará un número de productos cuyas frecuencias guardan una relación específica con las frecuencias de las señales deseada e interferente. Estos productos se denominan productos de intermodulación, y sus frecuencias pueden expresarse del modo siguiente:

$$f_i = C_1 \cdot f_1 + C_2 \cdot f_2 + \dots + C_n \cdot f_n \quad (1)$$

donde la suma $|C_1| + |C_2| + \dots + |C_n|$ es el orden del producto.

La frecuencia de los productos de intermodulación de orden impar puede estar relativamente cerca de la frecuencia de la señal deseada y acoplarse así, a través del circuito de salida, a la antena con una atenuación mínima.

Para poder calcular los efectos de estos productos de intermodulación, es necesario definir algunos términos.

2.1 Pérdida de acoplamiento, A_c

La pérdida de acoplamiento A_c en dB, es la relación entre la potencia emitida desde un transmisor y el nivel de potencia de esa emisión a la salida de otro transmisor que puede producir el producto de intermodulación no deseado.

Los valores típicos de la pérdida de acoplamiento, en una ubicación común, son del orden de 30 dB.

2.2 Pérdida de conversión de intermodulación, A_I

La pérdida de conversión de intermodulación, A_I , en dB, es la relación de niveles de potencia entre la señal interferente proveniente de una fuente externa y el producto de intermodulación, medidos ambos a la salida del transmisor.

Sin precauciones especiales, los valores típicos, respecto a productos de tercer orden ($2f_1 - f_2$), para los transmisores con semiconductores están comprendidos en la gama de 5 a 20 dB, en tanto que para los transmisores de válvulas se sitúan en la gama de 10 a 30 dB.

La pérdida total entre un transmisor que genera la emisión no esencial que da origen al producto de intermodulación, y un receptor que funciona en la frecuencia de este producto es:

$$A = A_c + A_I + A_p \quad (2)$$

donde A_p , en dB, es la atenuación de propagación del producto de intermodulación entre la salida del transmisor y la entrada del receptor considerados.

* Este Informe debe señalarse a la atención de la Comisión de Estudio 1.

Obsérvese que en la fórmula no se incluye el nivel de potencia del transmisor en el que se origina la intermodulación, pero este nivel puede tener un efecto sobre el valor de la pérdida de conversión de intermodulación A_I .

Ejemplo

Frecuencia de la señal del transmisor que origina el producto de intermodulación:	f_1
Frecuencia de la señal del transmisor cuya emisión se acopla al transmisor (f_1):	f_2
Nivel de potencia del transmisor (f_2):	+ 10 dBW
Nivel supuesto de pérdida de acoplamiento A_c :	30 dB
Nivel supuesto de pérdida de conversión A_I :	15 dB
Nivel supuesto de la señal umbral del receptor:	-150 dBW
La pérdida total en el trayecto es igual a 10 dBW - (-150 dBW) = 160 dB.	
Si $A_c + A_I = 45$ dB, el valor requerido de A_p será de 115 dB.	

La fig. 1 muestra un ejemplo de las pérdidas en el trayecto de propagación para 100 MHz; en condiciones de espacio libre, se requiere una separación muy grande entre el transmisor que origina el producto de intermodulación y el receptor. Si el receptor es una estación móvil, esta separación se reduce considerablemente. Por tanto, puede llegarse a la conclusión que la explotación con dos frecuencias ofrece mejores condiciones para la reducción de los efectos de intermodulación entre transmisores, si la banda de frecuencias del receptor de la estación de base está alejada de la banda de frecuencias del transmisor.

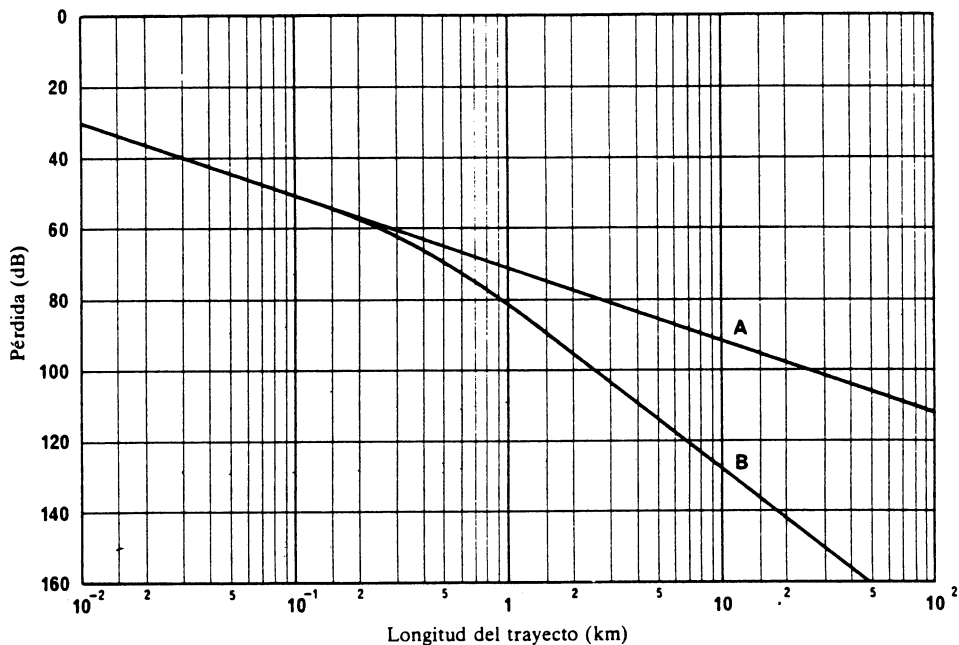


FIGURA 1 - Pérdida de propagación para trayectos cortos a 100 MHz (dipolos de $\frac{\lambda}{2}$)

Curvas A: Espacio libre
B: Recomendación 370-3; $h_1 = 37,5$ m, $h_2 = 2$ m

La intermodulación producida por dos o más transmisores móviles será tanto más intensa cuanto más cerca se encuentren los transmisores unos de otros, y sobre todo si la señal deseada procede de un móvil en el borde de la zona de servicio, circunstancia que puede darse con una cierta probabilidad (aunque quizá pequeña). La señal del móvil que sufra la interferencia será recibida en su estación de base como una señal de nivel muy variable (debido a desvanecimientos y enmascaramientos), pero independiente de la interferencia de intermodulación. Estas variaciones, muy pronunciadas e independientes, pueden hacer que la intermodulación alcance valores perjudiciales durante ciertos periodos de tiempo, incluso cuando su valor medio sea muy inferior al de la señal.

3. Elementos exteriores no lineales

En la mayor parte de las ubicaciones, los elementos exteriores no lineales se encuentran en las uniones en mástiles, alimentadores y otras antenas que están estrechamente acopladas a los elementos radiantes de los transmisores cercanos.

Sería útil determinar las pérdidas de conversión para mástiles, etc., de distintas calidades, en función de la atenuación isótropa entre los transmisores y los mástiles, etc. Entonces sería posible establecer valores específicos utilizables en aplicaciones de ingeniería.

4. Receptores

La respuesta de intermodulación es la respuesta que se obtiene en la salida de un receptor, a partir de una señal dentro de banda generada en los pasos de RF del receptor. Esta señal dentro de banda resulta de la presencia de dos (o más) señales de alto nivel en una sección no lineal de los pasos de RF. Como en el caso de los transmisores, las señales interferentes (dos o más) deben tener frecuencias específicas tales que el producto de intermodulación caiga dentro de la banda de frecuencias aceptadas por el receptor.

Esta característica del receptor se registra normalmente como una medición única con el mismo nivel de señales interferentes y se expresa mediante la siguiente relación:

relación del nivel de estas dos señales iguales

al

nivel aparente del producto de intermodulación en la entrada del receptor.

Es posible, sin embargo, generar un producto de nivel similar aun cuando las señales interferentes sean desiguales.

En la fig. 2 se dan ejemplos (tres teóricos y uno medido) de la característica global de intermodulación de tercer orden de los receptores, y se muestra que la intermodulación puede muy bien ser un problema cuando una de las señales interferentes no es excesivamente alta. Las curvas de dicha figura pueden usarse para calcular otros niveles de productos de intermodulación cuando las señales interferentes no tienen valores iguales a los indicados.

Para un producto con una relación de frecuencia de la forma $(2f_1 - f_2)$, el nivel será proporcional al de la señal de frecuencia f_2 , pero variará según el cuadrado del nivel de la señal f_1 ; por ejemplo, el producto tendrá una amplitud de la forma $k \cdot V_1^2 \cdot V_2$, donde V_1 , V_2 son las amplitudes de las señales en las frecuencias f_1 y f_2 , respectivamente.

Cuando se utilice un receptor móvil en un sistema multicanal, estará sujeto a una respuesta de intermodulación debida a muchas señales de alto nivel uniformemente separadas. La República Popular de China ha sugerido la siguiente relación entre el nivel máximo admisible de la señal y la relación de rechazo de la respuesta de intermodulación del receptor [CCIR, 1982-86a]:

$$E_s + 3E_M \geq 3E_{I\max} + B + k(n,p)$$

donde:

E_s : nivel de la señal deseada (dB) por encima de la sensibilidad,

$E_{I\max}$: nivel máximo de la señal interferente (dB) por encima de la sensibilidad,

E_M : relación de rechazo (dB) de la intermodulación de tercer orden del receptor (para dos señales),

B : relación de protección RF (dB),

$k(n,p)$: constante cuyo valor depende del número de canales, n , y de la secuencia de los canales, p .

En el nuevo anexo I figura el procedimiento de obtención de esta fórmula y el cálculo de $k(n,p)$.

5. Reducción de los niveles de los productos de intermodulación en los transmisores

5.1 Pérdida de conversión de intermodulación

Es obvio que una reducción de la no linealidad, particularmente de los órdenes impares, mejorará el funcionamiento global y aumentará el valor de la pérdida de conversión de intermodulación A_I .

Como muestra el ejemplo del punto 2, es evidente que se necesita una mejora considerable antes de reducir la pérdida del trayecto correspondiente a valores aceptables.

5.2 Pérdida de acoplamiento

La pérdida de acoplamiento puede, por supuesto, incrementarse aumentando la distancia entre los correspondientes transmisores, pero no siempre puede ser posible hacerlo así eficazmente en un sitio determinado.

Podrían usarse aisladores de ferrita en los circuitos de salida del transmisor en que se genera el producto de intermodulación, pero las unidades que actualmente se producen no suministran mucho más de 25 dB de pérdida adicional y la no linealidad inherente a los propios aisladores impide el uso de unidades múltiples. Para suprimir los productos no deseados, pueden ser necesarios filtros además de esos aisladores. Los aisladores son igualmente eficaces independientemente de la separación de frecuencia entre f_1 y f_2 .

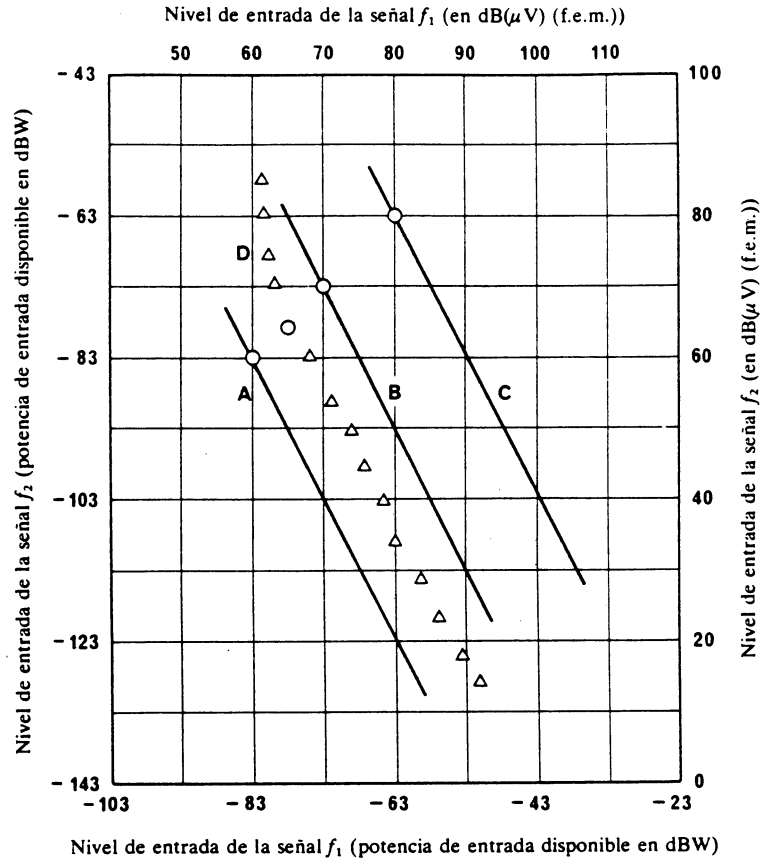


FIGURA 2 - Característica de intermodulación del receptor

Niveles de señales de entrada interferentes que generan conjuntamente un producto de nivel constante.

Curvas A, B y C: Características deducidas basadas en un valor único registrado de la característica de intermodulación de tercer orden del receptor, es decir, para $(2f_1 - f_2)$.

Curvas A: Basada en un valor único, con ambos niveles de entrada a un nivel de $60 \text{ dB}(\mu\text{V})$ (f.e.m. sobre 50 ohmios).

B: Basada en un valor único, con ambos niveles de entrada a un nivel de $70 \text{ dB}(\mu\text{V})$ (f.e.m. sobre 50 ohmios).

C: Basada en un valor único, con ambos niveles de entrada a un nivel de $80 \text{ dB}(\mu\text{V})$ (f.e.m. sobre 50 ohmios).

D: Valores medidos para un receptor para el que se alcanza el criterio especificado con iguales niveles de señales de entrada de valor $65,5 \text{ dB}(\mu\text{V})$ (f.e.m. sobre 50 ohmios).

También pueden usarse filtros de cavidad resonante y en la fig. 3 se dan ejemplos de sus respuestas teóricas. Pueden usarse en serie o en combinaciones serie-paralelo más complejas pero en todos los casos su funcionamiento depende de la separación de frecuencia entre f_1 y f_2 . Tienen la ventaja que también atenuarán el nivel del producto de intermodulación en la entrada a la antena o en la línea de transmisión y aumentará así A_I .

Son filtros eficaces y económicos los resonadores coaxiales de cavidad, tanto en su forma pura de un cuarto de longitud de onda, como con grados variables de modificación para reducir la longitud total y mejorar el valor del Q cargado. El resonador debe ser resistente, de fácil sintonización y sumamente eficaz en cuanto a pérdida de transmisión, y proporcionar un alto grado de separación en las frecuencias requeridas. Los resonadores para uso con transmisores deben tener un bajo coeficiente de temperatura y buena conductividad térmica para que no influyan en su calidad de funcionamiento los cambios de la temperatura ambiente ni el calentamiento debido a pérdidas de transmisión. Para mantener la longitud de los conductores centrales se puede recurrir a la compensación de temperatura. La resistencia física es necesaria para evitar las variaciones de los parámetros técnicos que pudieran causar los golpes o las deformaciones. Sus características físicas y mecánicas de diseño deben prevenir también la formación de descargas eléctricas o los efectos de corona. Los conductores centrales de tipo telescópico ajustable permiten variar la frecuencia de resonancia en más menos un 15%, normalmente, de la frecuencia nominal.

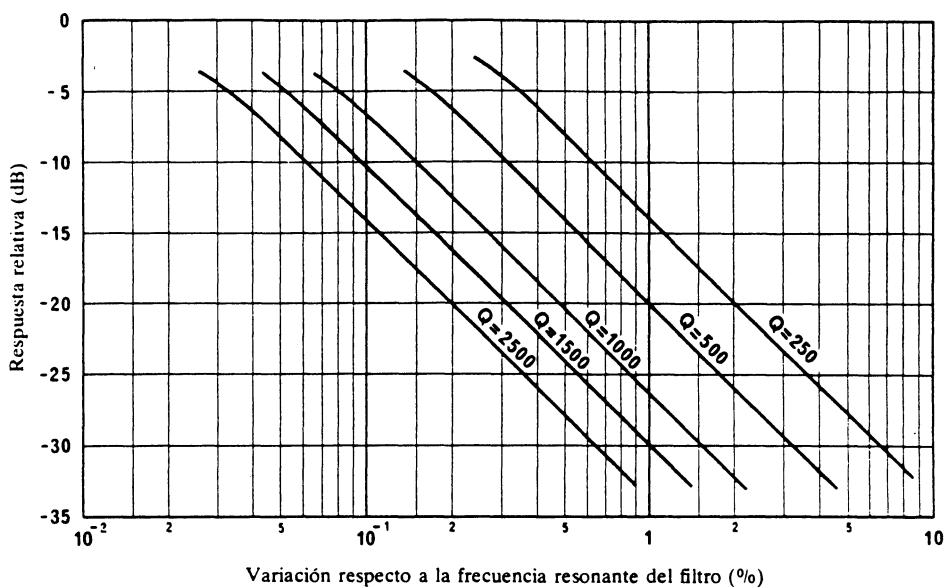


FIGURA 3 – Respuesta teórica de los filtros paso-banda de cavidad resonante

Para valores del Q cargado, entre 250 y 2500.

Nota. — El factor Q en ausencia de carga debe tener un valor por lo menos cinco veces mayor que el cargado y, preferentemente 10 veces mayor.

Se pueden fabricar resonadores eficaces y económicos con aluminio de gran conductividad para unidades mayores, y con cobre o latón plateado para unidades más pequeñas. Los límites superiores de Q que se pueden obtener con un resonador de cavidad están determinados por limitaciones prácticas de tecnología mecánica. El valor del Q no cargado crece con el diámetro, pero la sensibilidad de sintonía y el coeficiente de temperatura se hacen más críticos. No obstante, se pueden hacer resonadores prácticos y satisfactorios con una capacidad de soportar potencias de hasta 250 vatios, para la banda, por ejemplo, de 150 a 170 MHz, que tengan un Q cargado de hasta 18 000, con un diámetro de 0,58 m y una longitud de 0,63 m, con una discriminación de 35 dB en una frecuencia distante un 1% de la frecuencia de resonancia.

No es corriente emplear resonadores de cavidad para valores de Q_0 inferiores aproximadamente a 1000, porque hay técnicas más satisfactorias, por ejemplo, los resonadores helicoidales, que se pueden acoplar para formar filtros más pequeños pero relativamente eficaces. En los cuadros I y II se relacionan los tipos de filtro que pueden elegirse y sus respectivos costos.

CUADRO I – Tamaños y costos de resonadores (150-174 MHz)

1	2	3	4	5	6
Referencia	Q_0	Q_L	Atenuación a 1% de F_0 (dB)	Diámetro (m)	Costo relativo de resonadores prácticos
A	920	100	7	0,03	1,0
B	2300	250	14	0,07	1,7
C	4600	500	20	0,14	2,8
D	6900	750	24	0,21	3,3
E	9200	1000	26	0,29	3,9
F	11700	1250	28	0,37	4,6
G	13800	1500	30	0,46	5,3
H	16100	1750	32	0,53	6,8
I	18400	2000	35	0,58	7,1

CUADRO II – Costos relativos de resonadores prácticos para otras frecuencias

Frecuencia resonante (MHz)	Altura de cavidad (m)	Q no cargado					
		920	2300	4600	6900	9200	13 800
50- 60	1,55	*	*	8,7	12,0	14,7	+
60- 80	1,15	*	*	5,5	7,3	10,6	14,9
95-110	0,85	*	3,3	4,1	5,2	6,4	10,7
120-150	0,68	*	2,6	3,3	4,2	5,0	8,9
150-174	0,63	1,0	1,7	2,8	3,3	3,9	5,3
160-180	0,52	0,9	1,5	2,4	2,9	3,4	4,6
400-500	0,24	0,8	1,0	1,5	2,0	2,2	3,0

Nota. – Los signos en columnas en lugar de valores significan:

* Superior con resonador helicoidal.

+ Una sola cavidad de grandes dimensiones y relativamente poco económico.

Comparados con el costo total del equipo radioeléctrico de una estación base, los filtros de cavidad resonante son un medio económico y eficaz de reducir las emisiones no deseadas y de prevenir o minimizar las interferencias.

5.3 Identificación de la fuente de un producto de intermodulación

La frecuencia de la intermodulación de tercer orden resultante de la interacción de dos transmisores puede expresarse ya sea como $2f_1 - f_2$ o $2f_2 - f_1$.

Si el producto es $2f_1 - f_2$, la mezcla se genera dentro del transmisor que funciona en f_1 , o cerca del mismo.

Inversamente, si el producto es $2f_2 - f_1$, la mezcla se genera dentro del transmisor que funciona en f_2 , o cerca de éste.

En el caso de las transmisiones con modulación de frecuencia o modulación de fase, se duplica la excursión causada por la modulación cuando se genera un segundo armónico. Así pues, si la modulación en uno de los productos de intermodulación parece ser excesiva, es probable que sea transferida de la señal f_1 de una mezcla $2f_1 - f_2$.

6. Reducción de los productos de intermodulación en los receptores

Como en el caso de los transmisores, una reducción en la no linealidad de un receptor mejorará su funcionamiento.

Para reducir el nivel de un producto de intermodulación puede usarse la atenuación a la entrada del receptor. Los niveles de estos productos están relacionados con los niveles de las señales que los producen, de modo tal que la atenuación (en dB) de cada producto de orden n será, en la mayoría de los casos, n veces la atenuación (en dB) de la señal deseada.

Un atenuador de 3 dB, por ejemplo, reducirá en 9 dB un producto de tercer orden, y en 3 dB la señal deseada. Ello también puede usarse con fines de prueba, para establecer que el producto de intermodulación se genera en el receptor.

También pueden usarse filtros de cavidad resonante, ya sea como filtros de supresión en la frecuencia f_1 y/o f_2 , o como filtros de paso de banda en la frecuencia de la señal deseada. De nuevo la eficacia de estos filtros depende de las separaciones de frecuencia implicadas.

7. Reducción de la interferencia debida a la intermodulación mediante una disposición especial de las frecuencias

Las frecuencias que han de utilizarse pueden disponerse de tal modo que no se utilice un receptor en la frecuencia del producto de intermodulación en una zona donde las señales interferentes pueden producir un producto de intermodulación de nivel suficiente para perturbar el servicio. Si este nivel coincide con el de máxima sensibilidad del receptor, éste no puede usarse para distancias de hasta dos kilómetros desde la ubicación de la estación de base que funciona en las frecuencias f_1 y f_2 . Esto se aplica incluso cuando las estaciones que emplean las frecuencias f_1 y f_2 están separadas por varios kilómetros, lo cual significa que la estación de base en el canal en que se genera el producto de intermodulación puede estar ubicada fuera de la zona de servicio de las estaciones explotadas en las frecuencias f_1 y f_2 lo que conduce a una utilización muy deficiente del espectro de frecuencias.

En sistemas que utilizan cierto número de canales de frecuencias, la mayoría de los casos de intermodulación perjudicial en el transmisor de base y en el receptor móvil dentro del sistema pueden atenuarse utilizando juegos de canales pares en las estaciones de base. Esto significa que los canales de cada estación de base están distribuidos de modo uniforme con una separación de frecuencias constante. En este caso, los productos de intermodulación dentro de la banda utilizada, en una zona de servicio, coinciden con ciertos canales del juego, y la relación entre la señal deseada y el producto de intermodulación en un receptor móvil es independiente de la distancia y de las características de propagación.

8. Reducción de la interferencia debida a la intermodulación mediante otros medios

Si se utiliza la señalización de tono continuo, el receptor funcionará solamente en presencia de este tono de señalización y en este caso sólo es necesario asegurar que la señal deseada en el canal donde se manifiesta el producto, rebasa el nivel de un producto no deseado de f_1 y f_2 en una cantidad mayor a la relación de protección requerida. Esto puede garantizarse al máximo situando el transmisor de la estación base, en cuyo canal se manifiesta el producto, en la misma ubicación o cerca de las estaciones que utilizan las frecuencias f_1 y f_2 . En estas condiciones, se reduce la necesidad de filtros o de otros dispositivos en el transmisor o en el receptor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Documentos del CCIR

[1982-86]: a. 8/3 China (República Popular de).

ANEXO I

RESPUESTA DE INTERMODULACIÓN DEL RECEPTOR EN UN SISTEMA MULTICANAL

1. Número de productos de intermodulación de tercer orden en un sistema multicanal

En un sistema de n canales con intervalos iguales y siendo n un número par ($n \geq 4$), el número de productos de intermodulación de tercer orden, S_p , que caen en cada canal es el que se muestra en la fig. 4 [Morinaga, 1972], que incluye los tipos $2A - B$ y $A + B - C$, denominados tipo III-1 y tipo III-2, respectivamente. Del canal 1 al canal n , cada canal tiene $\left(\frac{n}{2} - 1\right)$ productos de tipo III-1 y los productos restantes son del tipo III-2. Los productos de tipo III-2 están 6 dB por encima de los de tipo III-1. Dado que hay 3 señales interferentes, esto es únicamente válido cuando $n \geq 4$.

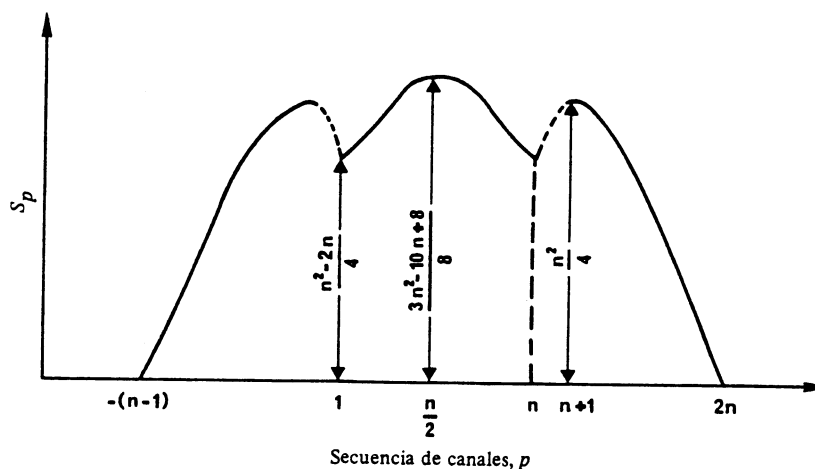


FIGURA 4

Habida cuenta de que $S_{p \text{ máx}}$ con un número impar de n sigue siendo igual o inferior al correspondiente a un número par de n , para el análisis siguiente puede considerarse que n es un número par.

2. Productos de intermodulación en un sistema multicanal

Habida cuenta de que los productos de intermodulación de tercer orden, S_p , son aleatorios en fase, el nivel de los productos de intermodulación en cada canal será $k(n,p)$ (dB) superior al valor de la sensibilidad.

Para los canales centrales:

$$\begin{aligned} k(n,p)_{\max} &= 20 \log \sqrt{\left[\frac{3n^2 - 10n + 8}{8} - \left(\frac{n}{2} - 1 \right) \right] \times 2^2 + \left(\frac{n}{2} - 1 \right) \times 1^2} \\ &= 10 \log \frac{1}{2} (3n - 7) (n - 2) \end{aligned}$$

Para los canales en el borde:

$$\begin{aligned} k(n,p)_{\min} &= 20 \log \sqrt{\left[\frac{n^2 - 2n}{4} - \left(\frac{n}{2} - 1 \right) \right] \times 2^2 + \left(\frac{n}{2} - 1 \right) \times 1^2} \\ &= 10 \log \frac{1}{2} (2n - 3) (n - 2) \end{aligned}$$

3. Influencia en sistemas con canales adyacentes

Debido a la presencia de la intermodulación de tercer orden, el espectro de frecuencia se extiende tres veces, razón por la cual un sistema de n canales influirá en una anchura de banda correspondiente a $3n$ canales.

De modo similar:

$$\begin{aligned} k'(n,p)_{\max} &= 20 \log \sqrt{\left(\frac{n^2}{4} - \frac{n}{2} \right) \times 2^2 + \frac{n}{2} \times 1^2} \\ &= 10 \log \frac{1}{2} n (2n - 3) \\ k'(n,p)_{\min} &= 0 \end{aligned}$$

4. Si $E_{I \max} > E_M$ (es decir, cuando el nivel máximo de la señal interferente rebasa la relación de rechazo de la intermodulación), el nivel de los productos de intermodulación de tercer orden (en dB) aumentará en 3 ($E_{I \max} - E_M$). Así pues, el nivel del producto de intermodulación (E_I) será:

$$E_I = k(n,p) + 3 (E_{I \max} - E_M)$$

Para un funcionamiento satisfactorio del sistema

$$E_s - E_I \geq B$$

y por consiguiente:

$$E_s + 3 E_M \geq 3 E_{I \max} + B + k(n,p)$$

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MORINAGA, T. [marzo de 1972] Mobile Communication – Theory and Design. *Electron. Comm. Academy of Japan*, 85-91.