

INFORME 923-1

**ELABORACIÓN DE PLANES DE FRECUENCIAS PARA LA TRANSMISIÓN
POR SATÉLITE DE PORTADORAS SCPC A TRAVÉS
DE TRANSPONEDORES NO LINEALES**

(Programa de Estudios 17A/8)

(1982-1986)

1. Introducción

En los sistemas de telecomunicación por satélite se transmiten varias portadoras monocanal SCPC por un solo transpondedor. Para la utilización eficaz de la potencia del satélite, el transpondedor funcionará en la región no lineal, en cuyo caso, el ruido de intermodulación influye en la calidad de la señal.

Los productos de intermodulación que caen en los intervalos de frecuencias de los canales ocupados pueden reducirse colocando debidamente los canales en la anchura de banda disponible. La separación por el procedimiento de Babcock [Babcock, 1953], es un ejemplo típico de este método, en el que los canales están completamente exentos de ruido de intermodulación de tercer orden. Sin embargo, ese plan de frecuencias sin intermodulación no será necesariamente deseable en razón de la utilización ineficaz de la anchura de banda disponible, sobre todo cuando hayan de acomodarse bastantes canales. Por ejemplo, para acomodar 20 canales, se requeriría una anchura de banda de más de 10 veces la de un plan que utilizara intervalos de frecuencia adyacentes [Hirata y Yasuda, 1976]. Por tanto, es preciso desarrollar planes de frecuencia que economicen anchura de banda y una idea para obtener esos planes es permitir que caigan en los canales algunos productos de intermodulación, siempre que la degradación de la calidad de la señal sea aceptable.

Un planteamiento lógico y eficaz para llevar a la práctica tal idea es minimizar el número de productos de intermodulación de tercer orden que caen en el canal más desfavorable [Hirata, 1978]. Por canal más desfavorable se entiende aquí un canal concreto en que cae el mayor número de los productos de intermodulación de tercer orden. En el presente Informe se considera la asignación de frecuencias sobre la base de este planteamiento, denominada en adelante asignación de frecuencias con intermodulación mínima.

2. Portadoras SCPC de igual nivel**2.1 Relación entre la anchura de banda asignada y los productos de intermodulación**

Teóricamente es difícil determinar planes de frecuencias con intermodulación mínima. Sin embargo, el número mínimo obtenible de productos de intermodulación que caen en el canal más desfavorable pueden estimarse mediante el límite inferior derivado teóricamente.

La fig. 1 muestra los límites inferiores derivados teóricamente del número de productos de intermodulación de tercer orden del tipo $(f_1 + f_2 - f_3)$ que caen en el canal más desfavorable en función de la anchura de banda asignada y del número de canales que han de acomodarse. En dicha figura, el número de productos de intermodulación, que es proporcional a la potencia de ruido de intermodulación, se normaliza por medio del número obtenido en el canal más desfavorable por un plan que utilizará intervalos de frecuencias adyacentes. El resultado se expresa entonces en dB. Para fines prácticos, este último plan se denomina en adelante plan de separación igual mínima. La anchura de banda asignada también se normaliza mediante la requerida para el plan de separación igual mínima. Esa figura implica que el número de productos de intermodulación que caen en el canal más desfavorable pueda reducirse aproximadamente a la mitad, en comparación con el caso del plan de separación igual mínima, cuando la totalidad de la anchura de banda ocupada es un 50% mayor que la requerida para la separación igual mínima.

2.2 Plan de frecuencias con intermodulación mínima

El plan de frecuencias con intermodulación mínima se ha obtenido para fines prácticos mediante cálculos de computador. En el caso de un reducido número de canales, la solución óptima puede lograrse examinando todas las combinaciones posibles. En el cuadro I se muestran los resultados obtenidos cuando el número de canales K es 10.

Cuando se trata de un gran número de canales, la solución casi óptima — que puede no ser óptima pero considerarse muy próxima — puede obtenerse mediante un planteamiento iterativo [Okinaka y otros, 1982]. En el cuadro II se muestran los resultados obtenidos, donde K es 20 en IIa) y 40 en IIb) respectivamente.

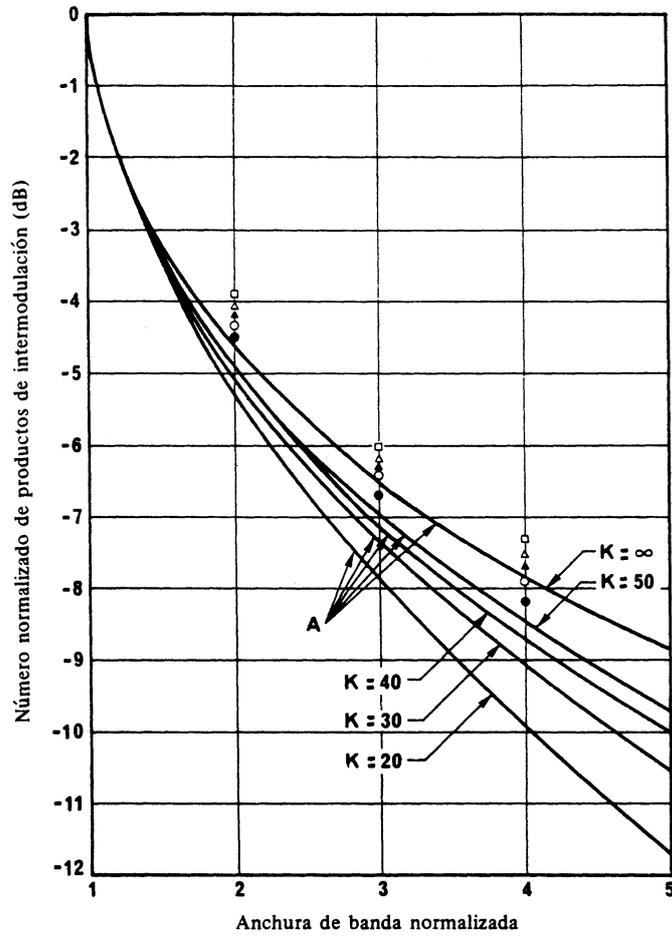


FIGURA 1 – Relación entre el número de productos de intermodulación que caen en el canal más desfavorable y la anchura de banda asignada

Resultados obtenidos:

● : $K = 20$

○ : $K = 30$

▲ : $K = 40$

△ : $K = 50$

□ : $K = 100$

A: Límites inferiores

K: Número de canales de señal

CUADRO I — Planes óptimos de frecuencias con intermodulación (IM) mínima (número de canales, $K = 10$)

| Número de intervalos de frecuencia | Anchura de banda normalizada | Número normalizado de productos IM (dB) | Intervalos de frecuencia asignados |
|------------------------------------|------------------------------|---|------------------------------------|
| 11 | 1,1 | -1,0 | 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11 |
| 12 | 1,2 | -1,7 | 1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12 |
| 13 | 1,3 | -2,4 | 1, 2, 3, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 13 |
| 14 | 1,4 | -3,0 | 1, 2, 3, 4, 6, 7, 10, 12, 13, 14 |
| 15 | 1,5 | -3,5 | 1, 2, 3, 4, 7, 8, 11, 13, 14, 15 |
| 16 | 1,6 | -3,9 | 1, 2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 15, 16 |
| 17 | 1,7 | -4,3 | 1, 2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 16, 17 |
| 18 | 1,8 | -4,7 | 1, 2, 3, 5, 7, 10, 13, 16, 17, 18 |
| 19 | 1,9 | -5,2 | 1, 2, 3, 5, 9, 12, 14, 17, 18, 19 |
| 20 | 2,0 | -5,4 | 1, 2, 3, 6, 8, 12, 15, 18, 19, 20 |
| 21 | 2,1 | -5,7 | 1, 2, 3, 5, 10, 14, 15, 18, 20, 21 |

Las curvas de la fig. 1 muestran los números normalizados de productos de intermodulación presentados en los cuadros I y II. Comparando los resultados con sus límites inferiores, se observa que el número de productos de intermodulación que caen en el canal de señal más desfavorable de los planes de frecuencias de mínima intermodulación, puede estimarse eficazmente utilizando la curva correspondiente al límite inferior para $K = \infty$ mostrado en la fig. 1.

3. Portadoras SCPC de niveles múltiples

En los futuros sistemas por satélite quizás sea conveniente efectuar la explotación con estaciones terrenas móviles conformes a normas diferentes, con diferentes valores de G/T . Una posibilidad sería transmitir las señales destinadas a los diferentes tipos de estación terrena con distintos niveles de p.i.r.e. desde el satélite. Incluso dentro de los sistemas que utilicen un solo tipo de estación terrena móvil, podrían utilizarse diferentes niveles de potencia de la portadora desde el satélite para diferentes servicios.

Sin embargo, la inclusión de un gran número de portadoras con diferentes niveles de potencia en un mismo transpondedor no lineal de satélite, disponiendo las portadoras en asignaciones de canal seleccionadas arbitrariamente, podría conducir fácilmente a situaciones en las que el ruido de intermodulación producido por ciertos canales de relativamente alta potencia deja inutilizables varios canales de relativamente baja potencia.

Se podría evitar tal situación mediante un plan de frecuencias cuidadosamente elaborado en el cual el ruido de intermodulación entre canales esté distribuido de manera que sea proporcional a la potencia portadora del canal.

En el presente punto se describen brevemente varios planes de frecuencias para portadoras multinivel.

3.1 Alternativas del plan de frecuencia de distintos niveles

En un plan de frecuencias capaz de acomodar fácilmente portadoras de distinto nivel se asignan portadoras a los canales elegidos de una serie de canales separados por igual, mediante el procedimiento de Babcock [Babcock, 1953; Edwards y otros, 1969]. Los canales asignados resultantes están totalmente exentos de ruido de intermodulación de tercer orden, por lo que pueden utilizarse para portadoras de cualquier nivel de potencia. Sin embargo, en general, los planes de Babcock no son prácticos, a menos que el número de asignaciones de portadoras requerido sea pequeño, debido al ineficaz uso que hacen tales planes de la anchura de banda disponible.

CUADRO II - Planes casi óptimos de frecuencias con intermodulación mínima

a) $K = 20$

| Número de intervalos de frecuencias | Anchura de banda normalizada | Número normalizado de productos IM (dB) | Intervalos de frecuencias asignados |
|-------------------------------------|------------------------------|---|---|
| 40 | 2 | -4,5 | 1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 16, 17, 19, 24, 26, 27, 32, 34, 36, 37, 38, 39, 40 |
| 60 | 3 | -6,7 | 1, 2, 3, 6, 9, 12, 13, 19, 22, 27, 32, 41, 43, 47, 54, 55, 56, 58, 59, 60 |
| 80 | 4 | -8,2 | 1, 2, 3, 4, 8, 11, 16, 28, 30, 41, 45, 52, 57, 61, 62, 70, 73, 76, 79, 80 |
| 100 | 5 | -9,5 | 1, 2, 3, 5, 10, 17, 29, 31, 42, 45, 48, 65, 67, 80, 85, 89, 90, 96, 98, 100 |

b) $K = 40$

| Número de intervalos de frecuencias | Anchura de banda normalizada | Número normalizado de productos IM (dB) | Intervalos de frecuencias asignados |
|-------------------------------------|------------------------------|---|--|
| 80 | 2 | -4,2 | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 13, 16, 18, 22, 24, 25, 27, 28, 32, 35, 39, 43, 45, 46, 48, 52, 61, 62, 64, 65, 66, 70, 71, 72, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80 |
| 120 | 3 | -6,3 | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 15, 17, 22, 31, 32, 34, 39, 45, 55, 57, 65, 67, 70, 77, 78, 82, 88, 91, 96, 97, 100, 105, 109, 111, 112, 113, 116, 117, 118, 119, 120 |
| 160 | 4 | -7,6 | 1, 2, 3, 5, 7, 8, 10, 13, 20, 21, 25, 30, 31, 37, 40, 45, 56, 58, 66, 70, 71, 72, 79, 92, 104, 108, 115, 117, 126, 132, 136, 145, 148, 151, 152, 154, 156, 158, 159, 160 |
| 200 | 5 | -8,7 | 1, 2, 3, 4, 6, 9, 10, 13, 20, 26, 32, 38, 45, 54, 58, 71, 75, 83, 85, 86, 104, 106, 117, 128, 132, 144, 146, 161, 164, 175, 176, 184, 185, 190, 192, 194, 195, 198, 199, 200 |

Con planes «Babcock múltiples» puede obtenerse mayor eficacia a expensas de que los productos de intermodulación de tercer orden caigan en canales asignados. Por ejemplo en el caso de un sistema de dos niveles, tales planes se forman colocando dos planes de Babcock idénticos uno a continuación de otro en frecuencia, pero separados por una cantidad aproximadamente igual a la anchura de banda de uno de los planes idénticos, que se denominará en lo sucesivo «plan Babcock de doble nivel». Ahora bien, el aumento de densidad de la portadora da lugar a algunos productos de intermodulación de tercer orden que caen en canales asignados. Como puede verse, en un plan de « n » portadoras, precisamente $(n/2) - 1$, los productos de tercer orden caen en cada uno de los canales asignados cuando actúan todas las portadoras. Como ese plan proporciona todavía una reducción considerable del número de productos de tercer orden en cada uno de los canales asignados con respecto a aquel que puede obtenerse con separaciones de canal uniformes o aleatorias, el efecto de intermodulación puede ser suficientemente bueno para funcionar con portadoras de distinto nivel.

En caso necesario, el funcionamiento del plan «Babcock doble» puede mejorarse en cualquier canal asignado elegido suprimiendo su canal asignado «gemelo» en la otra mitad del plan. Al hacerse esto, el canal elegido queda totalmente libre de productos de intermodulación de tercer orden. En consecuencia, estos canales mejorados pueden utilizarse para portadoras con una potencia inferior o superior a la de otros canales del plan. Si bien la eficacia de anchura de banda de este plan es mejor que la de un plan Babcock, sigue utilizando la anchura de banda en forma ineficaz, y sólo es útil cuando se requiere un reducido número de canales asignables.

Pueden lograrse planes más eficaces desde el punto de vista de la anchura de banda a expensas de mayores niveles del ruido de intermodulación que cae en las portadoras de los canales. Se han sugerido dos métodos denominados «método de la zona especializada» y «método de intercalación» para mejorar considerablemente la eficacia de utilización de la anchura de banda proporcionando al mismo tiempo una reducida potencia de ruido de intermodulación en los canales con portadoras [Okinaka y otros, 1982].

En el «método de la zona especializada» se proporciona una banda de frecuencias especializada dentro de la anchura de banda disponible para portadoras del mismo nivel de potencia, situándose las portadoras dentro de la banda de frecuencias especializada que será utilizada exclusivamente por ellas. Si las bandas de frecuencias especializadas se sitúan adecuadamente dentro de la totalidad de la anchura de banda, la banda para las portadoras de pequeño nivel podrá estar libre de los productos de intermodulación producidos por las portadoras de mayor nivel. Si es posible separar las dos bandas especializadas por una banda no asignada, podría reducirse aún más la posibilidad de los productos de intermodulación producidos por las portadoras de mayor nivel que caen dentro de la banda de frecuencias especializadas para las portadoras de menor nivel.

En el «método de intercalación», la portadora de nivel i -ésimo se sitúa solamente sobre los intervalos de frecuencias numerados con el número (M_{j+i}) donde M representa el número de portadora, i es un entero comprendido entre uno y M , j es un entero comprendido entre 0 y $(B/M - 1)$ y B es el número total de intervalos de frecuencia asignables. Con este método, los productos de intermodulación producidos por tres portadoras de un cierto nivel de potencia caen necesariamente en los intervalos de frecuencia correspondientes a portadoras del mismo nivel de potencia, y así los productos de intermodulación provocados por portadoras de mayor nivel no caerán en los intervalos de frecuencia correspondientes a portadoras de bajo nivel. En el caso de un sistema de doble nivel, por ejemplo, el «método de intercalación» conduce a un plan «pares-impares» en el cual las portadoras de alta potencia están situadas en intervalos con numeración par y las portadoras de baja potencia corresponden a intervalos de numeración impar.

En el caso de un sistema de doble nivel, los productos creados de tercer orden pueden clasificarse en una de las 8 categorías indicadas en el cuadro III. El cuadro muestra también las potencias relativas aproximadas de cada clase de producto, suponiendo que la relación entre las portadoras de baja y alta potencia es igual a « r ». La ventaja conseguida con los planes basados en el «método de la zona especializada» y el «método de intercalación» es que los productos de intermodulación de mayor potencia de la categoría 1, no caen en los intervalos de frecuencia donde están situadas las portadoras de baja potencia. En muchos casos el «método de la zona especializada» puede proporcionar una mayor reducción del número de productos de intermodulación que caen en canales correspondientes a portadoras de pequeña potencia, que el «método de intercalación».

Pueden establecerse planes reales de frecuencias, mediante el siguiente procedimiento. En primer lugar se determinan las posiciones de las portadoras de nivel más bajo dentro de los intervalos de frecuencia correspondientes, utilizando un método iterativo [Okinaka y otros, 1982]. Seguidamente se determinan las posiciones de las portadoras del siguiente nivel pequeño dentro de sus intervalos de frecuencias, mediante el método iterativo haciendo máxima la relación de potencias portadora más desfavorable/ruido de de intermodulación (C/IM) entre todas las portadoras ya situadas. Se repite el procedimiento nivel por nivel, hasta que se determinan las posiciones de las portadoras de todos los niveles.

CUADRO III – *Categorías y potencias relativas de productos de intermodulación de tercer orden y canales en los cuales caen los productos, para un plan de frecuencias de doble nivel*

| Categoría del producto | Tipo del producto | Potencia relativa | Canales en los que caen los productos | |
|------------------------|---|-------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| | | | Método de la zona especializada | Método de intercalación |
| 1 | $f_h + f_h - f_h$ | 1 | Para portadoras H | Para portadoras H |
| 2 | $\frac{f_h + f_h - f_l}{f_h + f_l - f_h}$ | r | Para portadoras L | Para portadoras L |
| 3 | $\frac{f_h + f_l - f_l}{f_l + f_l - f_h}$ | r^2 | Para portadoras H y L | Para portadoras H |
| 4 | $f_l + f_l - f_l$ | r^3 | Para portadoras H y L | Para portadoras L |
| 5 | $2f_h - f_h$ | $1/4$ | Para portadoras H y L | Para portadoras H |
| 6 | $2f_h - f_l$ | $r/4$ | Intervalos no utilizados | Para portadoras L |
| 7 | $2f_l - f_h$ | $r^2/4$ | Para portadoras H y L | Para portadoras H |
| 8 | $2f_l - f_l$ | $r^3/4$ | Para portadoras H y L | Para portadoras L |

Nota 1. – f_h se utiliza para indicar un intervalo de frecuencias correspondiente a una portadora de alta potencia y f_l para indicar un intervalo de frecuencia correspondiente a una portadora de baja potencia.

Nota 2. – r es la relación entre las portadoras de baja y de alta potencia.

Nota 3. – «Portadora H» indica una portadora de alta potencia y «portadora L» indica una portadora de baja potencia.

3.2 Funcionamiento típico de un plan de doble nivel

A fin de comparar los dos métodos de asignación para sistemas multinivel, se ha evaluado la mejora de la relación C/IM para casos típicos de sistemas de dos niveles y tres niveles. Se entiende por mejora de la relación C/IM la cuantía de la mejora de la relación C/IM más desfavorable, comparada con la correspondiente al plan de frecuencias en el que las portadoras de nivel más bajo estuvieran igualmente separadas y se eligieran las portadoras de forma que se mantuviera la misma potencia de salida en el transpondedor del satélite. Para el sistema de dos niveles se supone que 10 portadoras con un cierto nivel y 10 portadoras con un nivel 10 dB superior, comparten un transpondedor. Para el sistema de tres niveles se supone que 10 portadoras de un cierto nivel (L), 10 portadoras con nivel 7 dB mayor y 10 portadoras con nivel 10 dB mayor que L comparten el transpondedor. Además, para ambos casos, se ha supuesto una anchura de banda normalizada igual a tres.

En el cuadro IV se resume el funcionamiento de los planes de frecuencias obtenidos. Del cuadro se deduce que el «método de la zona especializada» podría proporcionar una mejor relación C/IM en los canales de portadoras de baja potencia que el «método de intercalación».

4. Conclusiones

Se ha demostrado que el número de productos de intermodulación del tercer orden que caen en un intervalo de canal se puede reducir considerablemente con el uso de un plan de asignación de portadoras que prevea una anchura de banda asignada mayor que la del plan de separación igual mínima. Se ha demostrado también en la fig. 1 que el número normalizado de productos de intermodulación depende del número de portadoras y de la anchura de banda asignada normalizada, y que la eficacia del espectro disminuye con el número de portadoras.

CUADRO IV – Comparación de los resultados de planes de frecuencias de portadoras de diferentes niveles basados en el «método de la zona especializada» y «método de la intercalación»

| Número de niveles de la portadora | Nivel de las portadoras (dB) | Mejora C/IM (dB) | |
|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| | | Método de la zona especializada | Método de intercalación |
| 2 | 0 | 5,2 | 3,2 |
| | 10 | 5,2 | 5,3 |
| 3 | 0 | 3,2 | 2,8 |
| | 7 | 3,4 | 2,8 |
| | 10 | 6,2 | 5,1 |

Nota. – La mejora C/IM significa la cuantía de la mejora de la relación C/IM más desfavorable comparada con la correspondiente al plan de frecuencias en el que las portadoras de nivel más pequeño están igualmente espaciadas y cuando se elige el número de portadoras de forma que se mantenga la misma potencia de salida en el transpondedor del satélite.

En el caso en que deben transmitirse portadoras con múltiples niveles de potencia, puede lograrse una mejor calidad, para las portadoras de baja potencia, en cuanto a relación de potencias portadora/ruido de intermodulación, utilizando el «método de la zona especializada». Mediante la elección adecuada de frecuencias que utilicen un procedimiento como el sugerido en el presente Informe, pueden lograrse importantes mejoras de la relación C/IM en las portadoras de baja potencia, con un pequeño sacrificio de la relación C/IM en las portadoras de alta potencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BABCOCK, W. C. [enero de 1953] Intermodulation interference in radio systems. *BSTJ*, Vol. XXXII, 1, 63-73.
- EDWARDS, R., DURKIN, J. y GREEN, D. H. [agosto de 1969] Selection of intermodulation free frequencies for multiple-channel mobile radio systems. *Proc. IEE*, Vol. 116, 8, 1311-1318.
- HIRATA, Y. [primavera de 1978] A bound on the relationship between intermodulation noise and carrier frequency assignment. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 8, 1, 141-154.
- HIRATA, Y. y YASUDA, Y. [diciembre de 1976] Intermodulation free channel allocation. *Trans. Inst. Electron. Comm. Engrs. Japan*, Vol. 59-B, 12, 592-593.
- OKINAKA, H., YASUDA, Y. e HIRATA, Y. [13-17 de junio de 1982] Optimum frequency assignment for satellite SCPC systems. IEEE International Conference on Communications (ICC '82), Filadelfia, Estados Unidos de América, Conf. Record, Vol. 1, 2E.3.1-2E.3.6.