

**CONTROL DE LOS PRODUCTOS DE INTERMODULACIÓN PASIVA**

(Cuestión 88/8)

(1986-1990)

**1. Introducción**

Este Informe trata de la intermodulación pasiva haciendo hincapié en la importancia de un examen detallado de los mecanismos pertinentes aplicables al diseño de satélites y a las explotaciones del sistema que dan lugar a dichos efectos de intermodulación.

**2. Antecedentes**

Los productos de intermodulación pasiva (PIP) se observaron por primera vez en las estaciones radioeléctricas de ondas decamétricas cuyas señales transmitidas de alto nivel producían intermodulación que daba lugar a interferencia en los receptores de comunicaciones. Se determinó que la intermodulación era debida a la oxidación de los pernos de hierro utilizados para sujetar las antenas transmisoras (efecto de oxidación del perno). Más tarde, se observó la aparición del fenómeno en los satélites marítimos que funcionaban en banda de 1,5 GHz en donde se producían condiciones eléctricas similares a las de las estaciones radioeléctricas de ondas decamétricas, es decir, señales transmitidas de alto nivel y señales recibidas de nivel muy bajo.

Parece que una condición necesaria para la aparición de productos de intermodulación pasiva es que exista una diferencia de unos 130 dB entre los niveles de la señal transmitida y los de las señales recibidas. Tales condiciones se producen en los alimentadores de las antenas de los satélites marítimos, tanto en los propios satélites, como en las estaciones costeras. Sin embargo, la intermodulación pasiva se ha observado sólo en los satélites y el examen de las diferencias de fabricación entre estas dos áreas puede arrojar conclusiones en cuanto a sus causas fundamentales.

**3. Generalidades**

La intermodulación es un fenómeno que se produce en los dispositivos no lineales. Si dos o más señales se transmiten a través de tales dispositivos se generan nuevas señales cuyas frecuencias y niveles son función de las frecuencias y los niveles de las señales deseadas a la entrada del dispositivo.

Los productos de intermodulación dan lugar, normalmente, a interferencia en el canal adyacente, y en el caso de sistemas con portadoras múltiples, en toda la anchura de banda del canal.

---

\* El presente Informe debe señalarse a la atención de las Comisiones de Estudio 1 y 4.

El nivel de los productos de intermodulación viene determinado no sólo por la característica de transferencia de tensión del dispositivo sino también por la anchura de banda de su respuesta. Por tanto, en el caso de los dispositivos activos cuya anchura de banda es limitada, el nivel de los productos de intermodulación en frecuencias que caen fuera de la anchura de banda del dispositivo, normalmente es despreciable. En el caso de los dispositivos pasivos (por ejemplo, las guías de onda) la limitación de anchura de banda es mucho menor y pueden generarse también productos tras la transmisión de las señales deseadas a través de los filtros destinados a suprimir los productos de intermodulación y a reducir o no las emisiones no esenciales y la potencia de ruido, en las frecuencias de recepción. En los sistemas que tienen una ganancia mayor de unos 150 dB, es posible la generación a la salida de productos de intermodulación pasiva con nivel suficiente para inutilizar el sistema debido a la interferencia causada a la señal de entrada a éste.

#### 4. Generación de productos de intermodulación pasiva (PIP)

Se cree que los mecanismos predominantes en la generación de los PIP son:

- efecto semiconductor de las capas de óxido superficiales,
- microdescargas debidas a los defectos del metal,
- no linealidades asociadas a la carbonización y la oxidación en las superficies metálicas, el depósito en ellas de otros contaminantes y las conexiones flojas o sucias.
- no linealidades de todos los materiales ferromagnéticos, incluyendo el acero inoxidable, los revestimientos de níquel y todos los componentes de ferrita.

También parece que hay una probabilidad bastante mayor de que aparezcan los PIP en vacío que en condiciones de presión ambiente.

En la práctica, las no linealidades de los dispositivos pasivos, origen de la generación de los PIP son el resultado de una suma de muchas microcorrientes distintas. Microscópicamente, todas las superficies son muy irregulares y además tienen una capa de óxido de varios angstroms de espesor en su superficie. Cuando las superficies entran en contacto, la capa de óxido afecta a la impedancia del punto de contacto. Las regiones con óxido y sin él generan una corriente de desplazamiento y la magnitud relativa de ésta respecto a la corriente de conducción determina la no linealidad de la unión.

En un documento de Hoobar y otros [1986] figura un amplio examen de la generación de los PIP en los satélites de comunicaciones de gran potencia. En lo referente a los satélites del servicio móvil marítimo, el citado documento trata de los antecedentes del problema, de las consideraciones de diseño y de las causas de los PIP dando directrices para su reducción.

#### 5. Investigaciones experimentales

##### 5.1 Nuding [1974]

Nuding [1974] de AEG-Telefunken, efectuó una investigación experimental de los PIP producidos en guías de onda utilizando potencias de radiofrecuencia de hasta 1000 W en la banda de 2 GHz. Con potencias del orden de 0-500 W, se vio que las amplitudes de los productos de intermodulación de tercer orden variaban como la tercera potencia de la potencia de radiofrecuencia aplicada, es decir,

$$Nk = \alpha N^3 \quad (1)$$

donde:

$Nk$ : amplitud de un producto de intermodulación de tercer orden,

$N$ : potencia de la señal de radiofrecuencia (el mismo nivel para ambas señales de prueba),

$\alpha$ : constante que depende del grado de no linealidad del dispositivo.

Los resultados experimentales de Nuding indican que para dos portadoras de radiofrecuencia,  $N_1$  y  $N_2$ , con igual potencia hasta de 500 W, los niveles de potencia de las señales PIP siguen la ley de la ecuación (1), es decir,  $\alpha N^3$ . Los PIP de órdenes 3.º, 5.º y 7.º ( $k_3$ ,  $k_5$ ,  $k_7$ ) varían en amplitud respecto a la potencia de la portadora de la misma manera. También, para un nivel fijo de la portadora de radiofrecuencia, la diferencia de amplitudes entre el de 3.º y 5.º orden es aproximadamente igual a la diferencia entre los productos de orden 5.º y 7.º es decir,  $\alpha = \beta$  (véase la fig. 1).

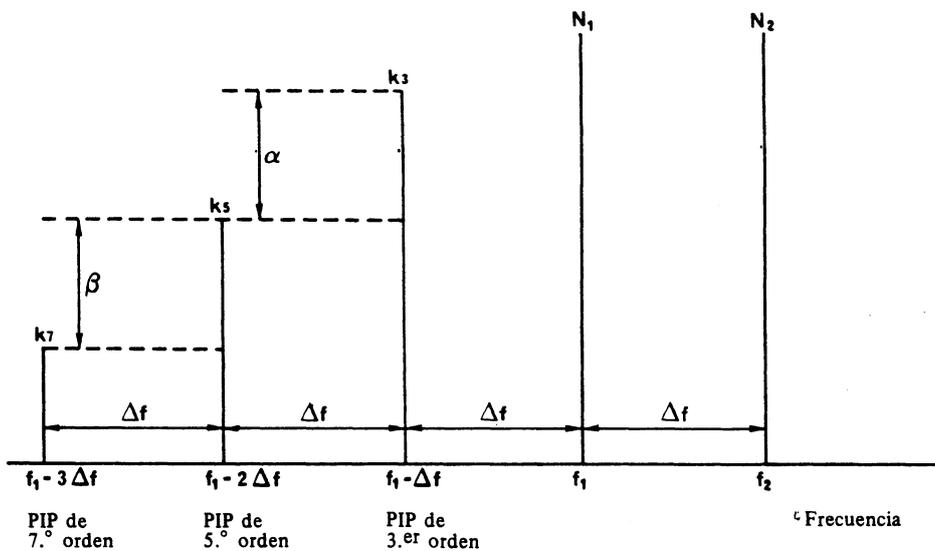


FIGURA 1 - Productos de intermodulación pasiva (PIP)

El cuadro I ofrece algunos valores que figuran en las contribuciones de Nuding o extrapolados de sus resultados.

CUADRO I

Potencia de la portadora <i>N</i> (W)	Variación media de potencia por orden (dB)	Nivel de potencia del PIP (dBm)		
		3.º orden	5.º orden	7.º orden
200	34 <sup>(1)</sup>	-60	-94	-128 <sup>(1)</sup>
250	33 <sup>(1)</sup>	-56	-90	-122 <sup>(1)</sup>
1000	20	-45	-66	-86

(<sup>1</sup>) Extrapolada.

## 5.2 Cox [1970]

Los primeros trabajos experimentales de Cox [1970], utilizaban una fuente de potencia de 1 watio y frecuencias alrededor de 6,0 GHz. No obstante, debido a las bajas potencias utilizadas los resultados pueden no ser transferibles directamente a lo que sucedería con potencias superiores. Por ejemplo, encontró que una brida de guiaondas que estuviese suelta podría dar lugar a PIP de 3<sup>er</sup> orden de hasta -25 dBm para una potencia de portadora de 1 watio, y de -50 dBm para los PIP de 5.<sup>o</sup> orden. Las guiaondas flexibles daban lugar a productos de 3<sup>er</sup> orden entre -55 dBm y -110 dBm.

Una de las conclusiones de los documentos de Cox es que la generación de los PIP es básicamente independiente de los cambios en la separación de la frecuencia del transmisor. Sobre esta base, es probable que puedan extrapolarse los resultados a otras bandas de frecuencia.

Otra observación de Cox era que las superficies metal-metal que no hacían buen contacto expuestas a campos de radiofrecuencia tales como las uniones de guiaondas o los tornillos de sintonía generaban niveles intensos, aunque con modificaciones erráticas, de PIP. Por ejemplo, para un circulador, se midió un PIP de 3<sup>er</sup> orden a -65 dBm con variaciones de hasta 20 dB. Apretando los tornillos que sujetaban el circulador disminuía el nivel del mismo PIP a -90 dBm constantes, reduciéndose en 25 dB.

## 5.3 Chapman y otros [1976]

Chapman y sus colegas [Chapman y otros, 1976] midieron PIP de 3<sup>er</sup> orden a -80 dBm con dos señales de prueba de igual potencia a frecuencias de 7,9 y 8,05 GHz y una potencia total de 5 kW. Dedujeron que los PIP de 3<sup>er</sup> orden variaban aproximadamente 3 dB por cada dB de variación de la potencia total. Observando los PIP de orden superior hallaron que se reducía el nivel entre 10 y 20 dB para un montaje alimentador típico con 1000 W de potencia aplicada total. Recomendaron que se eliminasen los tornillos de sintonía para suprimir esta causa de importancia capital de los PIP.

## 6. Variación del PIP al aumentar el orden

La conclusión de Nuding sobre la variación de los niveles de los PIP al aumentar el orden ofrece resultados extremadamente bajos para los productos de orden 13 y superior. La conclusión de Nuding era que la disminución de la potencia de los PIP para los órdenes impares era de -34 dB, si bien otros autores han obtenido cifras menores; por ejemplo [Roorsey y otros, 1973] da una cifra de -8 dB por orden impar y otros dan unos -10 dB. Además el nivel de potencia de 3<sup>er</sup> orden obtenido por otros investigadores es considerablemente inferior al obtenido por Nuding. El cuadro II ofrece una comparación entre las diversas cifras del nivel del PIP de 3<sup>er</sup> orden y la tasa de disminución por orden impar.

Es probable que entre el 3<sup>er</sup> y 5.<sup>o</sup> orden y entre el 5.<sup>o</sup> y 7.<sup>o</sup> orden, el nivel de potencia del PIP disminuya en unos 34 dB, pero para órdenes superiores la variación es menor ya que intervienen mecanismos distintos. Los resultados de Nuding indican que la variación es inferior cuando aumenta la potencia de la portadora.

CUADRO II

	Autores		
	Nuding [1974]	Roorsey y otros [1973]	Chapman y otros [1976]
Nivel de potencial del PIP de tercer orden (dBm)	-60	-85	-82
Variación por aumento del orden impar (dB)	-34	-8	-10

## 7. Minimización de los niveles de PIP

La minimización de los PIP debe formar parte de la filosofía general de diseño de los satélites y así, desde el principio, los materiales utilizados para las guías y los filtros, conectores, cables, etc., deben seleccionarse cuidadosamente a fin de reducir dichos productos de intermodulación pasiva a un nivel aceptable. También deben realizarse esfuerzos conjuntos entre los diseñadores de los componentes y los sistemas así como entre el personal de montaje y pruebas, para superar estos problemas.

Existen algunas pautas generales de diseño que si se utilizan adecuadamente, pueden ayudar a minimizar el problema. Éstas son:

- Si es posible, deben elegirse las frecuencias del enlace ascendente de forma que se asegure que los PIP procedentes del transmisor del satélite caen fuera de las bandas de la portadora del receptor del satélite.
- Debe optimizarse el diseño del satélite para limitar al mínimo las fuentes de intermodulación pasiva (dispositivos pasivos no lineales). **Por ejemplo, las señales de transmisión y de recepción deben, en la medida de lo posible, llevarse por trayectos totalmente separados, utilizar componentes electrónicos distintos y antenas separadas de transmisión y de recepción**
- En las áreas pertinentes debe reducirse al mínimo la utilización de circuitos resonantes con Q alta. Por ejemplo, en lugar de filtros paso banda podrían utilizarse diseños de filtro híbrido para los filtros de banda eliminada.
- Debe minimizarse la utilización de contactos mecánicos en determinadas áreas. En particular, las conexiones no llevarán contactos metálicos y deben evitarse los contactos deslizantes.
- Deben evitarse en lo posible materiales ferromagnéticos en el sistema o junto a él. En caso de utilizarse deben recubrirse con materiales de gran conductividad (por ejemplo, oro, cobre).
- Debe reducirse al mínimo la densidad de corriente de radiofrecuencia en las líneas de transmisión y en los resonadores, por ejemplo, aumentando las dimensiones de unos y otros. **En los cables coaxiales son preferibles las cubiertas macizas. Si se utilizan cables trenzados, el trenzado debe ser denso.**
- Debe cuidarse el diseño de los componentes mecánicos en determinadas áreas. **Deben evitarse las aristas.**
- Deben aplicarse cuidadosamente los procedimientos de fabricación y limpieza para evitar la contaminación en los interfaces críticos.
- Debe evitarse la utilización de metales que se oxiden fácilmente, por ejemplo el aluminio.
- Debe asegurarse una buena conductividad eléctrica utilizando grandes presiones de contacto y superficies lisas en las bridas.
- **Las gamas de temperatura de funcionamiento deben ser tan reducidas como sea posible a fin de limitar las modificaciones físicas consecuentes.**

La experiencia ha demostrado que los interfaces metálicos son las fuentes más probables de no linealidades del sistema. Ello no significa que haya que prescindir de las uniones para lograr un sistema con nivel aceptablemente bajo de PIP, si bien dichas uniones sólo serán lineales si están apretadas, son lisas, planas y limpias. Evidentemente, estos son términos relativos y de alguna manera interrelacionados en el sentido de que las superficies que no sean lisas pueden alisarse mediante una presión suficiente. En general, constituye una buena práctica alisar las superficies de contacto y apretarlas hasta que se logre un contacto satisfactorio o sujetar las uniones utilizando métodos y materiales de gran calidad.

## 8. Conclusiones

Los productos de intermodulación pasiva (PIP) dan lugar a problemas únicamente cuando existe un trayecto de señal común para las señales transmitida y recibida con una diferencia de nivel de unos 130 dB. Una condición necesaria para su aparición es que los elementos del trayecto de transmisión presenten propiedades no lineales.

La limitación de los PIP hasta un nivel aceptable en los satélites resulta extremadamente difícil aunque la experiencia ha demostrado que adoptando muchas precauciones y siguiendo atentamente las pautas indicadas en el punto 7, pueden diseñarse y fabricarse los sistemas controlando los PIP hasta un nivel convenientemente reducido.

Los PIP constituyen un problema mucho mayor en los satélites que en los terminales de tierra, y ello es debido al hecho de que estos últimos no tienen limitaciones de masa, de forma que no es necesario utilizar materiales ligeros como el aluminio que está sometido a la formación de óxidos con sus propiedades correspondientes de no linealidad. Además, en los terminales de tierra se logran generalmente mejores uniones de las guíasondas utilizando mayor presión en las bridas.

Dada la importancia de este tema y el hecho de que los problemas debidos a esta causa se producen en satélites marítimos actualmente en servicio, se insta a las administraciones y a los demás participantes a contribuir con más información al respecto, en particular por lo referente al diseño de los satélites marítimos y a la explotación de los sistemas de dichos satélites. Se solicita información de interés a este respecto de los satélites actualmente en servicio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COX, R. D. [febrero de 1970] Measurement of waveguide components and joint mixing products in 6 GHz frequency diversity systems. *IEEE Trans. Comm. Tech.*, Vol. COM-18, 33-37.
- CHAPMAN, R. C. y otros [abril de 1976] Hidden thread-multicarrier passive component IM generation. AIAA/CASI, 6th Communications Satellite Systems Conference, Montreal, Canadá.
- HOEBAR, C.F, POLLARD, D.L. y NICHOLAS, R.R., [marzo, 1986] Passive intermodulation product generation in high power communication satellites. AIAA 11th Communications Satellite Systems Conference, San Diego, California, Estados Unidos.
- NUDING, E. [1974] Non-linearities of flange connections in transmission lines carrying high RF power. Proc. European Microwave Conference, 613.
- ROORSEY, J. V. y otros [agosto de 1973] Intermodulation study. Philco-Ford Corporation.
-