

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R SM.1446

(04/2000)

Definición y medición de los productos de intermodulación en transmisores que utilizan técnicas de modulación de frecuencia, de fase o compleja

Serie SM

Gestión del espectro



Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en el Anexo 1 a la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión sonora
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radio astronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2011

© UIT 2011

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R SM.1446*

**DEFINICIÓN Y MEDICIÓN DE LOS PRODUCTOS DE INTERMODULACIÓN
EN TRANSMISORES QUE UTILIZAN TÉCNICAS DE MODULACIÓN
DE FRECUENCIA, DE FASE O COMPLEJA**

(2000)

Alcance

La presente Recomendación sirve de base para las definiciones de los distintos tipos de intermodulación en transmisores y distintos tipos de técnicas de medición.

Palabras clave

Productos de intermodulación (IM), técnicas de medición, emisiones no deseadas

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que los productos de intermodulación forman parte de las emisiones no deseadas (N.º 1.146 del RR);
- b) que los productos de intermodulación se generan en los propios sistemas de transmisión radioeléctrica o resultan de la interacción entre los distintos elementos radiantes situados en el mismo emplazamiento de radiocomunicaciones;
- c) que los límites de las emisiones no deseadas en el dominio no esencial se refieren únicamente a productos de intermodulación en un solo canal o en múltiples canales y aparecen en el Apéndice 3 del RR y en la Recomendación UIT-R SM.329;
- d) que los límites de las emisiones fuera de banda se refieren únicamente a los productos de intermodulación en un solo canal o en múltiples canales y están siendo objeto de estudio;
- e) que no existen límites definidos para la intermodulación entre transmisores entre distintos sistemas;
- f) que cada vez es mayor el número de emplazamientos de radiocomunicaciones compartidos y cada emplazamiento puede radiar productos de intermodulación pasivos y activos de una forma anómala e incontrolada que afectarán a los receptores;
- g) que los productos de intermodulación debidos a los transmisores radioeléctricos con modulación de amplitud se consideran en la Recomendación UIT-R SM.326;
- h) que es necesario definir métodos para medir los productos de intermodulación, especialmente en el caso de técnicas de modulación digital,

observando

- a) que el Informe UIT-R SM.2021 describe los principios generales de la generación de productos de intermodulación y las técnicas de reducción de la interferencia pertinentes para minimizar dicha intermodulación,

recomienda

- 1** que cuando se consideren los tipos de mecanismos que generan productos de intermodulación en los sistemas de transmisión se tengan en cuenta las definiciones y las técnicas de medición pertinentes para cada tipo de intermodulación que figuran en el Anexo 1.

* La Comisión de Estudio 1 de Radiocomunicaciones introdujo algunas modificaciones redaccionales en esta Recomendación en 2016 y 2019, de conformidad con la Resolución UIT-R 1.

ANEXO 1

Productos de intermodulación en el transmisor

CUADRO DE MATERIAS

	<i>Página</i>	
1	Definiciones de los distintos tipos de intermodulación en el transmisor.....	2
1.1	Tipo 1 – Intermodulación en un solo canal.....	3
1.2	Tipo 2 – Intermodulación multicanal.....	4
1.3	Tipo 3 – Intermodulación entre transmisores.....	5
1.4	Tipo 4 – Intermodulación debida a antenas activas	5
1.5	Tipo 5 – Intermodulación debida a circuitos pasivos.....	6
1.6	Atenuación de intermodulación en el transmisor.....	7
2	Consideraciones sobre los servicios de radiocomunicaciones.....	7
3	Técnicas de medición.....	7
3.1	Métodos genéricos de medición de la intermodulación en un solo canal (Tipo 1).....	7
3.1.1	Modulación analógica	8
3.1.2	Modulaciones digitales.....	8
3.2	Métodos genéricos de medición de la intermodulación multiportadora (Tipo 2).....	9
3.2.1	Descripción de los métodos de medición.....	9
3.2.2	Comparación de los métodos	10
3.3	Métodos genéricos de medición de la intermodulación entre transmisores (Tipo 3).....	11
3.3.1	Principio.....	11
3.3.2	Montaje de medición.....	12
	Apéndice 1 al Anexo 1 – Ejemplos de características de la intermodulación.....	13

1 Definiciones de los distintos tipos de intermodulación en el transmisor

Los productos de intermodulación son generados por las no linealidades del amplificador de salida del transmisor (por ejemplo, los semiconductores, los klystrons, etc.) y de los dispositivos pasivos tales como combinadores, circuladores, conectores, etc.

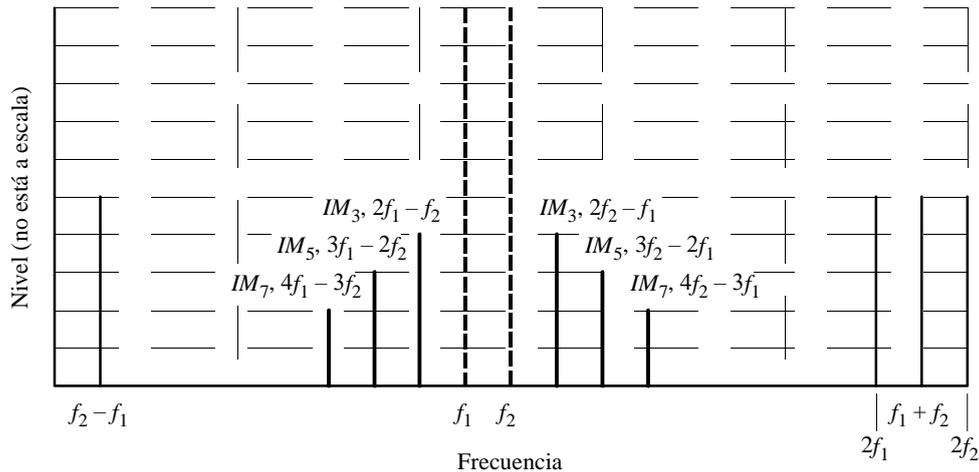
Los productos de intermodulación a la frecuencia f_{IM} son generados por dos o más señales no deseadas a las frecuencias f_1, f_2, \dots a causa de las no linealidades en la salida de un transmisor. La relación entre f_{IM} y f_1, f_2, \dots puede expresarse de forma muy general:

$$f_{IM} = |m_1 f_1 + m_2 f_2 + \dots| \quad \text{con} \quad m_v = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

El orden del producto de intermodulación viene dado por $n = m_1 + m_2 + \dots$. Ello significa que la frecuencia para productos de intermodulación de segundo orden, IM_2 siendo, $n = 2, m_1 = m_2 = 1$ da lugar a una $f_{IM} = |f_1 \pm f_2|$ y que la frecuencia de los productos de intermodulación de tercer orden IM_3 ($n = 3, m_1 = 2, m_2 = 1$) es $f_{IM} = |2f_1 \pm f_2|$ o $f_{IM} = |2f_2 \pm f_1|$ siendo $m_1 = 1, m_2 = 2$. Los productos $2f_1 - f_2$ y $2f_2 - f_1$ son los que más interesan a los diseñadores puesto que a menudo vienen especificados en las normas, aunque los productos $f_1 + f_2 - f_3$ son de mayor magnitud y más numerosos si hay más de dos señales interferentes. En algunas aplicaciones también deben considerarse los productos de intermodulación de quinto orden, IM_5 , que se producen para $3f_1 - 2f_2$ ó $3f_2 - 2f_1$, respectivamente. En la Fig. 1 se representa la relación entre los distintos productos de intermodulación.

FIGURA 1

Representación (no a escala) de los productos de intermodulación (líneas negras continuas) con respecto a las frecuencias fundamentales (líneas negras de guiones)



1446-01

Se definen cinco tipos distintos de intermodulación.

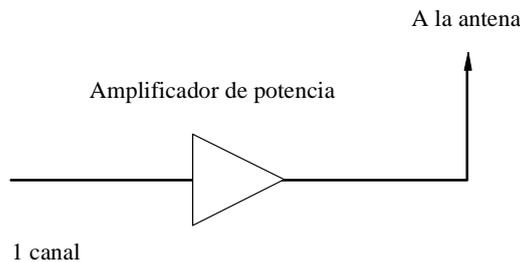
1.1 Tipo 1 – Intermodulación en un solo canal

La intermodulación en un solo canal se define como la distorsión de la señal deseada a causa de la no linealidad de los circuitos del transmisor incluidos todos los dispositivos pasivos tales como combinadores u otros.

La Fig. 2 ilustra este tipo de intermodulación.

FIGURA 2

Tipo 1 – Intermodulación de un solo canal

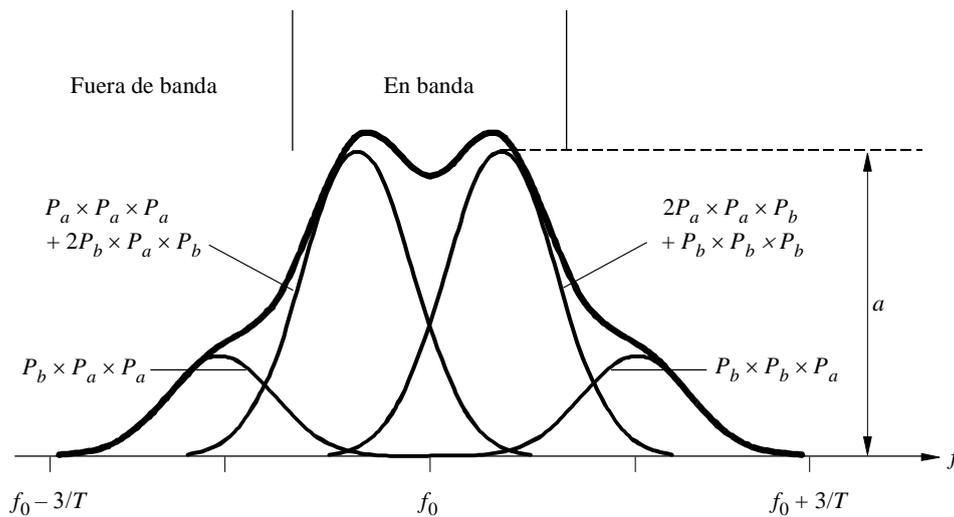


1446-02

Además de aparecer productos de distorsión de intermodulación por la mezcla de dos o más señales de transmisión en RF, pueden surgir emisiones en banda y fuera de banda a partir de una misma señal con modulación en banda base debido al mezclado de las componentes discretas de las frecuencias de una onda de entrada al transmisor compleja. Ello puede suceder con una señal analógica, tal como la señal vocal que generalmente comprende varias componentes de frecuencias variables en el tiempo. También sucede con señales digitales debido al mezclado de las componentes de frecuencia en series de Fourier para producir nuevas componentes de frecuencia. Ello da lugar a una distorsión en la onda de la señal transmitida y a un aumento de la amplitud en una parte del espectro de la señal original. Una señal digital verdaderamente aleatoria contendrá un número infinito de estas componentes espectrales resultando un espectro continuo similar al ruido, conformado por el filtro paso banda. El efecto de la distorsión de intermodulación es el de aumentar la energía en las subbandas del espectro similar al ruido, especialmente las debidas a la intermodulación de tercer orden. Este aumento en dicho espectro se denomina tanto ruido de intermodulación como crecimiento espectral y a menudo aparece en los gráficos espectrales de la modulación digital como protuberancias o salientes próximos a los bordes del filtro paso banda, lo que provoca un exceso en la potencia de ruido en la banda adyacente y una posible interferencia, como se ilustra en la Fig. 3.

FIGURA 3

Ejemplo de ruido de intermodulación de tercer orden en las bandas de frecuencias utilizadas $BO = 0,82$ ($BI = 4,5$) y $f_0 < f < f_0 + 1/T$ siendo T la longitud de símbolo, f_0 la frecuencia portadora y P las potencias de la señal sin representación a escala



BO : Reducción de potencia a la salida
 BI : Reducción de potencia a la entrada

1446-03

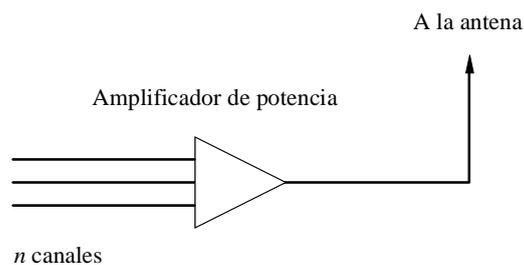
1.2 Tipo 2 – Intermodulación multicanal

La intermodulación multicanal se define como la situación en que las señales deseadas de varios canales resultan distorsionadas a causa de la no linealidad de los propios circuitos del transmisor.

Las señales de los distintos canales pueden tener diferentes modulaciones, anchuras de banda o separaciones dentro de toda la banda.

FIGURA 4

Tipo 2 – Intermodulación multicanal



1446-04

1.3 Tipo 3 – Intermodulación entre transmisores

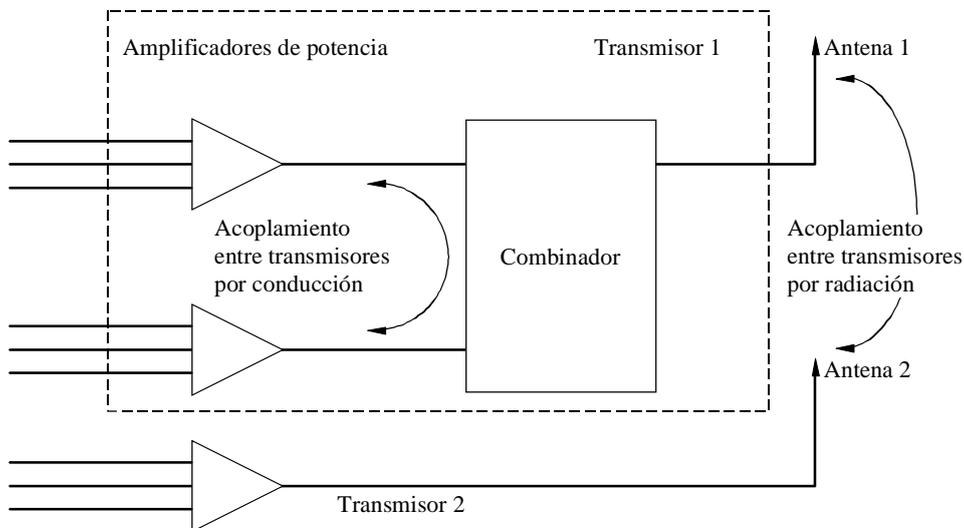
La intermodulación entre transmisores se produce cuando uno o más transmisores en un mismo emplazamiento producen intermodulación, dentro de los propios transmisores o en una componente no lineal situada en el emplazamiento, provocando productos de intermodulación a frecuencias posiblemente muy alejadas de las frecuencias de transmisión reales. Esta situación se conoce a menudo con el nombre de efecto del perno oxidado y es función de diversos problemas técnicos producidos por encontrarse varios transmisores en un mismo emplazamiento, aunque pueden realizarse algunas pruebas sobre los propios transmisores.

Los productos de intermodulación descritos por el Tipo 3 vienen inducidos por señales interferentes que se introducen en el transmisor a través de su antena. Si dichas señales tienen una frecuencia próxima a la frecuencia nominal del transmisor, pueden generar importantes productos de intermodulación en la salida del transmisor. Si su frecuencia se encuentra lejos de la frecuencia nominal, es decir, fuera de la anchura de banda de funcionamiento deseada, también debe tenerse en cuenta la selectividad en frecuencia del sistema.

La Fig. 5 ilustra este tipo de intermodulación.

FIGURA 5

Tipo 3 – Intermodulación entre transmisores



1.4 Tipo 4 – Intermodulación debida a antenas activas

En la Fig. 6 se representa un ejemplo de estructura de antena activa utilizada en un satélite.

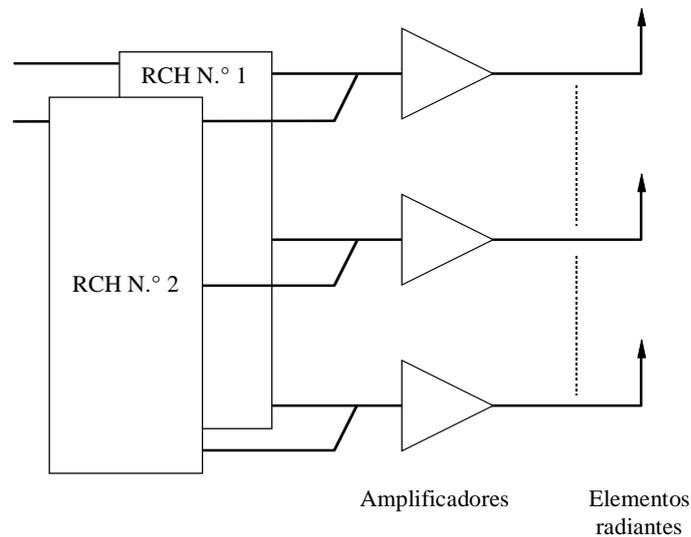
El emplazamiento del conjunto conformador del haz antes de los amplificadores de potencia permite limitar las pérdidas de potencia en RF pero impone a los propios amplificadores un modo de funcionamiento multiportadora: cada amplificador recibe todas las señales que van a transmitirse y, por lo tanto, funciona en toda la anchura de banda del sistema. Esta distribución de la potencia de la señal a lo largo de los distintos trayectos de antena permite el intercambio de potencia entre los haces, así como su reconfiguración, mediante la simple transmisión de una señal de telemando.

El modo de funcionamiento multiportadora de una antena activa, junto con la no linealidad de los amplificadores provoca emisiones no esenciales en forma de señales de intermodulación. El análisis de dichas señales es muy complejo debido a la arquitectura activa de la antena.

NOTA 1 – Actualmente se están desarrollando antenas activas y diversas variedades del sistema están ampliando la tecnología de funcionamiento y las aplicaciones de los servicios de comunicación. Estos sistemas probablemente serán muy utilizados en diversos campos en el futuro; por ejemplo, para comunicaciones de muy alta velocidad con más de 1 Gbit/s para transmisión de imágenes, radar, etc. Por consiguiente, la intermodulación procedente de las antenas activas y sus métodos de medida deben ser objeto de más estudios.

FIGURA 6

Tipo 4 – Arquitectura de antena activa incluidos los amplificadores



RCH: redes conformadoras del haz

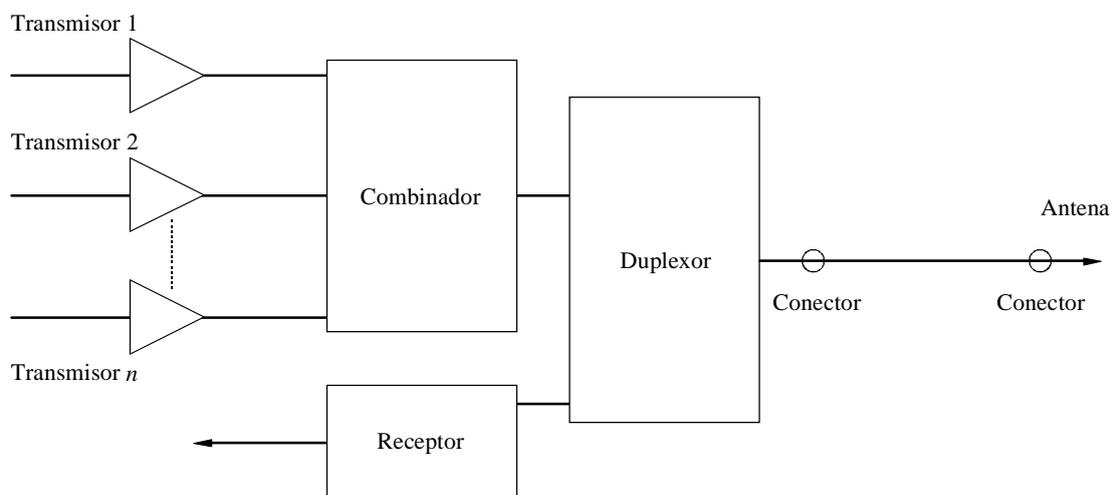
1446-06

1.5 Tipo 5 – Intermodulación debida a circuitos pasivos

En la Fig. 7 se representa un ejemplo de una estación de radiocomunicaciones en la que muchos transmisores y receptores comparten una antena común. Normalmente, puede considerarse que los elementos pasivos tales como los guías de ondas, los cables y los conectores no provocan ningún producto de intermodulación puesto que se supone que son circuitos lineales. No obstante, cuando se degrada su comportamiento debido al envejecimiento o a contactos flojos, puede aparecer un cierto grado de no linealidad. Si están funcionando varios transmisores pueden generarse algunos productos de intermodulación debido a la combinación de las frecuencias de transmisión. En algunas circunstancias ha podido observarse que, en casos extremos, los productos de intermodulación de noveno orden han degradado seriamente el comportamiento del receptor.

FIGURA 7

Tipo 5 – Intermodulación debida a circuitos pasivos



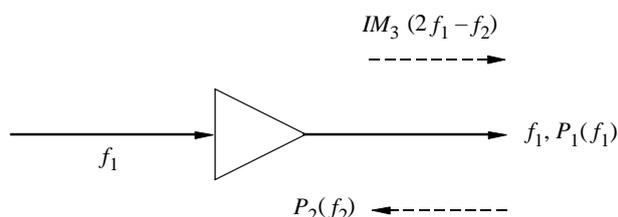
1446-07

En consecuencia, es importante mantener la linealidad de los elementos pasivos tales como los guías de ondas, los cables y los conectores.

1.6 Atenuación de intermodulación en el transmisor

La atenuación de intermodulación en el transmisor es una medida de la capacidad de un transmisor para inhibir la generación de señales en sus elementos no lineales causadas por la presencia de la portadora. Esta definición se ilustra en la Fig. 8 en la que f_1 es la frecuencia de la portadora con una potencia de salida $P_1(f_1)$ y f_2 es la frecuencia de la señal interferente con una potencia P_2 .

FIGURA 8
Definiciones de la atenuación de intermodulación en el transmisor
y del factor de intermodulación inversa



1446-08

La atenuación de intermodulación en el transmisor, A_{IM} , se define de la siguiente forma:

$$IM_3 < P_1 - A_{IM} \quad \text{dB}$$

Otra definición especialmente apropiada para el Tipo 3 es la del factor de intermodulación inversa, A_{IMI} , que se refiere a la supresión de la intermodulación de las fuentes de señales externas:

$$IM_3 < P_2 - A_{IMI} \quad \text{dB}$$

Estas definiciones utilizadas para transmisores no deben confundirse con el rechazo de intermodulación en el receptor, que es una medida de la capacidad del receptor para recibir una señal modulada deseada sin rebasar un nivel de degradación determinado en presencia de productos de intermodulación.

2 Consideraciones sobre los servicios de radiocomunicaciones

En el Apéndice 1 al Anexo 1 aparecen algunos ejemplos de productos de intermodulación y de calidad de funcionamiento para los servicios fijo por satélite, móvil por satélite y de radiodifusión. Por regla general, el comportamiento de la intermodulación depende de una amplia variedad de distintos factores; por ejemplo, los esquemas de modulación y acceso, los componentes físicos de los circuitos y el coste de los equipos. Los ejemplos seleccionados tienen por objeto únicamente ilustrar la gama de supresión de intermodulación que puede lograrse en los sistemas reales y no pretenden definir ningún límite para los productos de intermodulación.

3 Técnicas de medición

Para las mediciones de los productos de intermodulación o del ruido, en general, se utilizan las mismas técnicas aplicables a las mediciones de las emisiones fuera de banda y no esenciales. Hay ciertas reglas que deben seguirse: por ejemplo, los niveles de intermodulación no deben resultar afectados por la presencia de la señal de salida del transmisor y debe proporcionarse una gama dinámica adecuada en el equipo de medición para poder detectar señales de intermodulación de nivel bajo en presencia de señales deseadas.

En este punto, se describen algunos procedimientos específicos para las mediciones de la intermodulación.

3.1 Métodos genéricos de medición de la intermodulación en un solo canal (Tipo 1)

En general, estos métodos se subdividen según los requisitos de transmisión con modulación analógica clásica y digital.

3.1.1 Modulación analógica

En todos los métodos, es importante asegurar que las señales de entrada no se intermodulan antes de su aplicación al transmisor sometido a prueba ni resultan afectadas por la salida de RF del transmisor. Existen varios métodos de combinar las señales.

3.1.1.1 Prueba con dos tonos

El caso clásico es el del transmisor de banda lateral única o de banda lateral independiente (BLI). Es bien conocido el método que consiste en aplicar a la entrada dos tonos de igual amplitud, sinusoidales y no relacionados armónicamente midiendo a continuación los productos de tercer y quinto orden, normalmente mediante un analizador de espectro aunque pueden utilizarse otros métodos. Pueden aparecer algunas diferencias en las especificaciones; la atenuación de los productos de intermodulación puede especificarse con respecto a uno de los tonos de la señal de dos tonos o con respecto a la potencia en la cresta de la envolvente de la señal, existiendo una diferencia de 6 dB entre estos niveles. Por consiguiente, una señal de 24 dB por debajo del nivel de un tono de la señal de dos tonos se encuentra a 30 dB por debajo de la potencia en la cresta de la envolvente.

Aunque este método se ha utilizado durante muchos años, y tiene la ventaja de su sencillez, no trata adecuadamente algunas modulaciones tales como la de las señales vocales en las que, aunque la anchura de banda puede limitarse de 300 a 2400 Hz, aparecen variaciones en la velocidad silábicas tan bajas como 10 ó 15 Hz. En consecuencia, un transmisor que responde adecuadamente a la prueba de la señal de dos tonos con una separación entre los mismos de 700 Hz puede presentar un pobre comportamiento con respecto a los productos de intermodulación y, en consecuencia, a las emisiones fuera de banda de las señales vocales, especialmente cuando se utiliza un fuerte procesamiento de la señal vocal para reducir la relación entre la potencia de cresta y la potencia media. En algunas especificaciones de transmisores se ha intentado solventar este problema exigiendo la realización de pruebas con una separación de tonos tan baja como 30 Hz, pero entonces pueden presentarse dificultades en la medición.

3.1.1.2 Prueba con tres tonos

Otro método consiste en utilizar una prueba con tres tonos, como se lleva a cabo en la industria de televisión por cable. (Sin embargo, el procedimiento de prueba es distinto del que se emplea en la televisión por cable.) En este caso, se emplean tres tonos de igual amplitud, sinusoidales y no relacionados armónicamente, dos de ellos separados aproximadamente 30 Hz. La interpretación de la pantalla resultante en el analizador de espectro es más compleja puesto que ahora hay seis productos de intermodulación de tercer orden y en la prueba de dos tonos había solamente dos. De forma similar, también habrá seis productos de intermodulación de quinto orden y así sucesivamente. No obstante, esta prueba es muy adecuada para mostrar las deficiencias que presenta la regulación dinámica de la fuente de alimentación del amplificador final.

3.1.1.3 Prueba del ruido

3.1.1.3.1 Ruido en el dominio de la frecuencia no continuo

Otro método utilizado es la aplicación de ruido de la entrada del transmisor. Esta técnica se ha empleado durante muchos años en sistemas MDF analógicos en los que se aplica al equipo un espectro de ruido que incluye un intervalo o hueco en el dominio de la frecuencia de entrada. Los efectos de la distorsión por intermodulación pueden determinarse midiendo la cantidad de señal que aparece en el intervalo o hueco equivalente a la salida. Sin embargo, a menos que el ruido de entrada esté modulado a la velocidad silábica, este método ofrece pocas ventajas reales con respecto al caso de un solo canal. En los equipos multicanal, tales como los transmisores BLI con dos canales vocales y 12 señales telegráficas a frecuencia vocal, ofrece una mejor aproximación que la prueba con dos tonos. La principal ventaja de este método es que puede proporcionar una relación entre la potencia de cresta y la potencia media más realista que los métodos de tono continuo.

3.1.1.3.2 Ruido en el dominio de la frecuencia continuo

Una alternativa al establecimiento de un intervalo o hueco en el dominio de la frecuencia de la señal de entrada consiste en examinar el crecimiento espectral de la señal modulada por el ruido en comparación con el espectro producido por el transmisor sin productos de intermodulación. Este método es más difícil de interpretar pero su aplicabilidad depende de la aplicación. En aquéllas en que el producto de intermodulación de canales es importante para la función del sistema este método no tiene aplicabilidad; sin embargo, cuando el producto de intermodulación es importante debido a su efecto en las emisiones fuera de banda, el método da una idea bastante realista del comportamiento del transmisor.

3.1.2 Modulaciones digitales

Los productos de intermodulación en estos transmisores normalmente se miden en términos de relación de protección de canal adyacente. Se utiliza un tren de bits pseudoaleatorio adecuado para modular al transmisor y se mide la potencia en el canal adyacente o en el canal alterno (es decir, canal adyacente + 1) utilizando el analizador de espectro correspondiente o un receptor de medición. Aparte de eso, esta técnica es similar a la de un solo canal explicada en el § 3.1.1.3.2. Se aplica a un cierto número de métodos de modulación digital incluido el múltiplex por división de frecuencia ortogonal.

3.2 Métodos genéricos de medición de la intermodulación multiportadora (Tipo 2)

Los amplificadores de alta potencia (por ejemplo, los que se emplean en los sistemas de satélite) funcionan lo más cerca posible de su máxima potencia de salida (saturación), provocando productos de intermodulación que degradan la relación señal/ruido cuando se utiliza el mismo amplificador para transmitir más de una portadora. En los sistemas digitales, la BER viene determinada por la relación entre la energía por bit y la densidad espectral de ruido, E_b/N_0 , siendo E_b la potencia de portadora dividida por la velocidad binaria y N_0 la potencia de ruido de una sola banda lateral por Hz de anchura de banda. Las contribuciones de ruido e interferencia procedentes del enlace ascendente y del enlace descendente deben combinarse con el ruido de intermodulación de tal forma que todas las contribuciones se normalicen a la potencia de portadora. Una caracterización adecuada del ruido de intermodulación es la temperatura de ruido equivalente, T_{im} . Una regla general para determinar el valor esperado de C/T_{im} es:

$$C/T_{im} = -150 - 10 \log(N) + 2BO \quad \text{dB}$$

siendo N el número de portadoras y BO la reducción de potencia a la salida, que se obtiene a partir de la reducción de potencia a la entrada mediante la fórmula:

$$BO = 0,82(BI - 4,5) \quad \text{dB}$$

Suponiendo que todas las portadoras tienen la misma potencia:

$$C = P_s - 10 \log(N) - BO \quad \text{dBW}$$

siendo P_s la potencia de salida de saturación. Por consiguiente:

$$T_{im} = P_s + 150 - 3BO \quad \text{dB(K)}$$

y

$$N_0 = P_s - 78,6 - 3BO \quad \text{dB(W/Hz)}$$

Por lo tanto, cuando la potencia de entrada aumenta 1 dB, la potencia de salida crece 0,82 dB. Por otro lado, el ruido de intermodulación se incrementa 2,46 dB y la relación C/T disminuye 1,64 dB. Esta regla general es válida en una estrecha gama próxima a 4,5 dB de la saturación de todos los amplificadores de los tubos de onda progresiva sin linealización. A veces este método recibe el nombre de método de prueba «sin portadora».

3.2.1 Descripción de los métodos de medición

A continuación se indican los principios y métodos de prueba de siete procedimientos de medición distintos:

– *Prueba de una sola portadora*

La señal multiportadora y los productos de intermodulación de segundo y tercer orden se modelan mediante una función de Bessel dependiente de la potencia de salida y del desplazamiento de fase del amplificador. Se introduce en el amplificador una portadora (onda continua) y se hace variar la amplitud de la señal de prueba desde cero hasta que el amplificador alcanza la saturación. Se miden la potencia de salida y el desplazamiento de fase en función de la potencia de entrada.

– *Prueba de dos portadoras con análisis de intercepción*

La característica de transferencia no lineal se representa mediante un desarrollo de series de Taylor. El comportamiento bajo la carga multiportadora puede predecirse a partir del modelo de series de Taylor. Las salidas de dos generadores de señal que funcionan a las frecuencias f_1 y f_2 se combinan y se aplican a la entrada del amplificador. Las potencias de salida a estas frecuencias fundamentales y los productos de intermodulación de tercer orden a $2f_1 - f_2$ y $f_2 - f_1$, etc., se registran y se utilizan para determinar los puntos de intercepción, que se utilizan a continuación para calcular los coeficientes de las series de Taylor.

– *Prueba de portadora múltiple*

Esta prueba se basa en la hipótesis de que la suma de la densidad de potencia del ruido de intermodulación tiende asintóticamente al mismo valor fijado a medida que aumenta el número de portadoras. Se ha demostrado que la suma de los productos de intermodulación hasta los de séptimo orden supone el 82,2% de la potencia de intermodulación; es decir, si pueden despreciarse los productos de intermodulación más elevados, es suficiente un mínimo de 7 a 15 portadoras. A la entrada del amplificador se combina un número de portadoras independientes (onda continua), aproximadamente equiespaciadas, con un intervalo cerca de los productos de intermodulación esperados y moduladas individualmente por señales con MF y MA. A la salida, en el intervalo que queda se miden directamente los productos de intermodulación mediante un analizador de espectro.

– *Prueba de 2/3/4 portadoras con una regla general*

Si no se dispone de un número suficiente de fuentes para realizar la prueba multiportadora puede llevarse a cabo una prueba utilizando un número más pequeño de portadoras y puede predecirse el comportamiento multiportadora utilizando una regla general. El resultado asintótico para un gran número de portadoras es:

$$\left(\frac{C}{IM}\right)_{\infty} = \frac{1}{6} \left[\sqrt{\left(\frac{C}{IM}\right)_2} + 1 \right]^2$$

siendo $(C/IM)_2$ la medida realizada con dos portadoras.

La base de esta prueba es realizar mediciones directas de los productos de intermodulación generados por 2, 3 ó 4 portadoras independientes de forma similar a la descrita anteriormente.

Para efectuar las mediciones se emplea un generador de ruido y un filtro con distintas anchuras de banda de ranura. Este filtro de ranura elimina el ruido de un solo canal conocido como canal silencioso. A la salida un analizador de espectro mide los productos de intermodulación de este canal silencioso. Cabe señalar que la relación de potencia señal a ruido (NPR) analógica del filtro de ranura debe ser 20 dB superior al nivel de la relación NPR que debe medirse y debe tener una anchura de banda de aproximadamente el 10% de la anchura de banda del amplificador.

– *Prueba del simulador de señal versátil en frecuencia (FASS, frequency agile signal simulator)*

El FASS es un dispositivo capaz de sintetizar cualquier forma de onda arbitraria, incluidas múltiples portadoras moduladas a distintas velocidades de datos y con diferentes formatos de modulación. Esta señal de excitación es mucho más parecida a la señal real que el ruido blanco gaussiano pero debido a la memoria finita la señal debe repetirse a unas ciertas frecuencias. El ruido de intermodulación puede medirse directamente para una cierta variedad de distintas combinaciones de portadora, formatos de modulación y anchuras de banda.

Este método utiliza una técnica de síntesis digital para generar una onda mediante un programa informático. La onda consiste en datos digitales cargados en un sintetizador que genera la onda a través de un convertidor digital/analógico. Estos FASS disponibles comercialmente pueden sintetizar ondas directamente en frecuencias de microondas de forma digital.

– *Prueba de la BER*

La BER es la medida definitiva de la aceptabilidad de los sistemas de transmisión digital. Una medición directa de la BER sería más adecuada que una prueba que intente aislar la contribución del ruido de intermodulación del ruido total.

Las pruebas de la BER se utilizan normalmente para determinar el comportamiento de los sistemas digitales en presencia de interferencia cocanal y de canal adyacente, pero apenas se emplean para medir los efectos de las no linealidades del amplificador. Estas pruebas son costosas y largas debido a los equipos adicionales y al tiempo de medición necesarios en el caso de BER muy bajas, por ejemplo 1×10^{-10} . Sin embargo, esta es precisamente la gama de valores en que probablemente aparecerá el ruido de intermodulación degradando la calidad de funcionamiento del sistema.

3.2.2 Comparación de los métodos

Para la medición de los productos de intermodulación o del ruido todos los métodos son adecuados. En los puntos siguientes y en el Cuadro 1 se resumen las características más importantes de cada uno de los métodos. La prueba de la BER prácticamente no se utiliza para realizar mediciones de los productos de intermodulación debido al elevado coste de los equipos y al tiempo que exige dicha prueba.

- Los métodos de prueba de una sola portadora y de dos portadoras con análisis de intercepción son sencillos, rápidos y populares pero resultan limitados por la predicción indirecta del comportamiento multiportadora mediante un modelo matemático que supone que el amplificador carece de memoria.
- Los métodos de multiportadora, relación de NPR y FASS pueden producir resultados precisos puesto que generan mediciones directas del comportamiento en condiciones de carga realistas.
- La prueba de 2/3/4 portadoras con una regla general es rápida y sencilla pero presenta la limitación de que la regla general sólo es válida en la región en que dominan los productos de intermodulación de tercer orden.
- El método de prueba FASS es muy flexible y da lugar a resultados precisos pero su anchura de banda de prueba está limitada por la velocidad del convertidor digital/analógico y su resolución en frecuencia por la capacidad de memoria, aunque su frecuencia de prueba puede variar a lo largo de una amplia gama.

CUADRO 1
Clasificación de los métodos

Criterio	Una sola portadora	Multiportadora	2/3 portadoras	Relación NPR analógica	FASS
Portadora:					
Número elevado	2	2	1	3	3
Nivel mixto	2	3	1	1	3
No uniforme	2	3	1	1	3
Precisión	2	3	1	3	3
Reproductibilidad	3	3	1	2	3
Coste	3	2	3	2	1
Sencillez	3	1	3	3	3
Tiempo	2 ≈ 0,5 h	1 ≈ 1,5 h	3 ≈ 5 min	3 ≈ 5 min	3 < 5 min
Frecuencia	3	3	3	2	3
Anchura de banda	1	3	3	2	2

Clave: 1: inaceptable, 2: aceptable, 3: bueno.

NOTA 1 – En la prueba de una sola portadora se supone que el amplificador no tiene memoria.

La importancia relativa de los criterios del Cuadro 1 depende, evidentemente, de la aplicación. Por ejemplo, en una aplicación del SMS SCPC la capacidad para predecir el comportamiento de un gran número de portadoras es importante pero la aplicabilidad a niveles mixtos y separación no uniforme es menos importante. Además, la frecuencia y la anchura de banda son menos importantes siempre que quede cubierta la banda del SMS. Ello sugiere que la prueba de la relación NPR analógica puede ser una buena elección para esta aplicación.

Por otro lado, para una aplicación AMDF/SFS, la posibilidad de tratar niveles de portadoras mixtos y separaciones no uniformes adquiere gran importancia y la disponibilidad de equipos adecuados que cubran las bandas del SFS más elevadas puede ser un problema. En este caso, la balanza se desequilibra en favor de la prueba multiportadora.

En ambos casos, si el coste, la sencillez y el tiempo de realización de la prueba son más importantes que la precisión absoluta y la reproductibilidad, la prueba de una sola portadora sigue siendo una alternativa muy interesante.

3.3 Métodos genéricos de medición de la intermodulación entre transmisores (Tipo 3)

Estos métodos clásicos y genéricos se utilizan para medir productos de intermodulación de tercer orden, que se consideran los más importantes.

3.3.1 Principio

Los productos de intermodulación en el transmisor provocan emisiones no deseadas que son inducidas por alguna señal interferente próxima a la frecuencia nominal del transmisor. Se supone un transmisor con la potencia de la señal transmitida deseada L_w a la frecuencia nominal $f_0 = f_1$ y una potencia de la señal entrante L_1 a la frecuencia $f_2 = f_0 \pm \Delta f$. Ello da lugar a un producto de intermodulación de tercer orden $IM_3 = L_{IM}$ a la frecuencia f_{IM} :

$$f_{IM} = 2f_0 - (f_0 \pm \Delta f) = f_0 \pm \Delta f$$

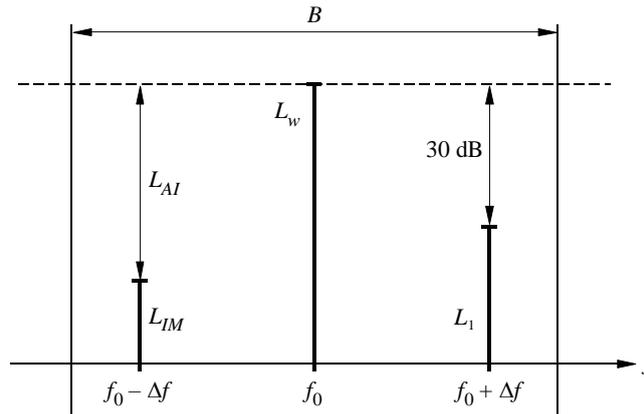
Para tener en cuenta únicamente los mecanismos principales y despreciar los efectos de orden más elevado, debe elegirse una separación de frecuencias Δf dentro de la anchura de banda B del sistema de manera que la componente de intermodulación L_{IM} no esté sujeta a una fuerte atenuación adicional en el receptor interferido. El nivel de la señal de la componente de intermodulación se define de la forma siguiente:

$$L_{IM} = 2L_w + L_1 + 20 \log k$$

siendo k una constante arbitraria que se introduce únicamente para obtener el producto de intermodulación a partir de la medición. En la Fig. 9 la atenuación de intermodulación L_{AI} se define como la atenuación del producto de intermodulación L_{IM} con respecto al nivel de la señal deseada L_w para una fuente interferente 30 dB por debajo de L_w .

FIGURA 9

Determinación de los productos de intermodulación por el método de dos tonos



1446-09

Introduciendo las relaciones de la Fig. 9 en la ecuación (10), puede determinarse el valor de $20 \log k$ mediante la fórmula $20 \log k = 30 - 2L_w - L_{IA}$ y el producto de intermodulación L_{IM} pasa a ser:

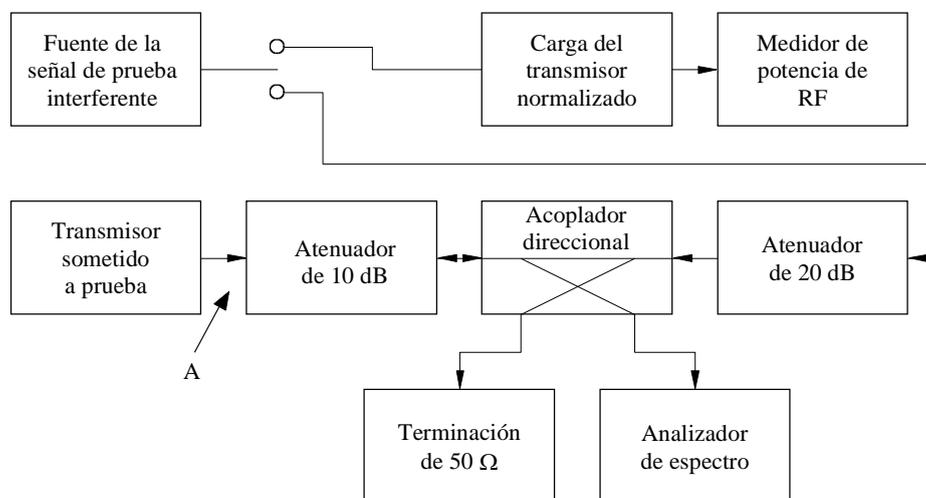
$$IM_3 = L_{IM} = L_1 - L_{IA} + 30 \quad \text{dB}$$

3.3.2 Montaje de medición

Paso 1: Se conecta el equipo de la manera indicada en la Fig. 10. Para reducir la influencia de los errores por desadaptación es importante que el atenuador de potencia de 10 dB se acople al transmisor sometido a prueba mediante la conexión más corta posible. La fuente de la señal de prueba interferente es una portadora de RF sin modular que proporciona la misma potencia de salida que el transmisor sometido a prueba. Dicho transmisor y dicha fuente deben estar físicamente separados de manera que la medición no resulte influenciada por radiación directa.

FIGURA 10

Montaje de medición



1446-10

Paso 2: Se ajusta el analizador de espectro a fin de que proporcione la indicación máxima para una anchura de exploración de frecuencia de 500 kHz.

Paso 3: Se ajusta la frecuencia de la fuente de la señal de prueba interferente a una gama comprendida entre 50 kHz y 100 kHz por encima de la frecuencia del transmisor sometido a prueba. La frecuencia deberá elegirse de forma que las componentes de intermodulación que van a medirse no coincidan con otras componentes no esenciales.

Paso 4: Se registra (dBm) la componente de intermodulación de tercer orden más elevada obtenida en el analizador de espectro, como IM_3 .

Paso 5: Se registra (dBm) el nivel de potencia de salida en RF del transmisor sometido a prueba obtenido en el analizador de espectro, como P_1 .

Paso 6: Se calcula la relación de intermodulación como:

Atenuación de intermodulación (referido al punto A)

$$A_{IM} = P_1 - IM_3$$

Paso 7: Se ajusta la frecuencia de la fuente de la señal de prueba interferente entre 50 kHz y 100 kHz por debajo de la frecuencia del transmisor sometido a prueba. La frecuencia deberá elegirse de forma que las componentes de intermodulación que van a medirse no coincidan con otras componentes no esenciales.

Paso 8: Se repiten los Pasos 4 a 6.

Paso 9: El menor valor de las dos lecturas obtenidas en los Pasos 6 y 8 es la atenuación de intermodulación.

NOTA 1 – Para niveles de potencia de transmisión superiores a 25 W puede ser necesario variar las características del atenuador.

APÉNDICE 1

AL ANEXO 1

Ejemplos de características de la intermodulación

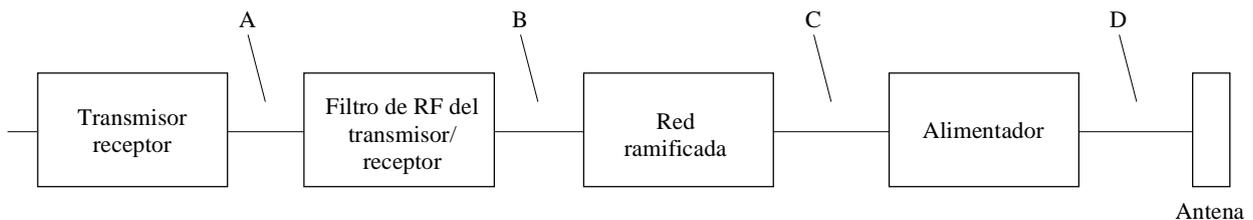
Por regla general, las características de la intermodulación dependen de una gran variedad de factores; por ejemplo, los esquemas de modulación y de acceso, los componentes físicos de los circuitos y el coste de los equipos. Los siguientes ejemplos tienen por objeto únicamente ilustrar la gama de supresiones de intermodulación que puede lograrse en sistemas reales y no pretenden definir ningún límite para los productos de intermodulación.

1 Servicio fijo

Los límites de la intermodulación en las actuales normas europeas para los enlaces radioeléctricos de microondas se indican únicamente a título informativo (véase la Fig. 11). Sólo hacen referencia al problema de intermodulación entre transmisores (Tipo 3); es decir, en las normas europeas no se dispone de valores específicos sobre la atenuación de intermodulación.

FIGURA 11

Diagrama de bloques típico para el servicio fijo



1446-11

Durante la instalación, el fabricante de los equipos debe declarar la conformidad de los mismos con los límites de intermodulación para el enlace fijo. El máximo nivel de intermodulación permitido se indica con referencia en el punto B en la cadena de recepción. Todas las instalaciones del enlace fijo deben satisfacer los criterios indicados cuando el nivel de potencia deseada en el punto C es igual a 28 dBm.

2 Servicio móvil

Muchas normas para los servicios móviles no contienen ningún valor específico para la atenuación de intermodulación. Los valores de las emisiones de intermodulación se incluyen en los límites de las emisiones no esenciales. En el Cuadro 2 aparecen algunos ejemplos de la atenuación de intermodulación. Los valores requeridos oscilan entre 40 y 70 dB. Normalmente se supone que la señal interferente es una onda continua con una potencia de 30 a 50 dB inferior a la de la señal deseada.

CUADRO 2

Ejemplos de atenuación de intermodulación en los sistemas de radiocomunicaciones móviles

Servicio	Atenuación de intermodulación
GSM900 Estación transceptora de base y centralita privada (PBX) móvil	> 70 dB
GSM1800 Entre estaciones móviles	> 50 dB
TETRA Estación de base, sólo un canal más canales varios transmisores Estación móvil	> 40 dB > 70 dB > 60 dB > 60 dB, medidos en el conector de la antena
PMR Para todos los componentes Varias estaciones de base en el mismo emplazamiento	> 40 dB > 70 dB

3 Servicio por satélite

Los productos de intermodulación en los servicios por satélite son generados por el funcionamiento multiportadora a través de los amplificadores comunes en el subsistema de transmisión en RF (intermodulación de Tipo 2). En el Cuadro 3 aparecen ejemplos de requisitos de calidad de funcionamiento de las estaciones terrenas INTELSAT.

CUADRO 3

Ejemplos de requisitos de comportamiento para los productos de intermodulación transmitidos por estaciones terrenas INTELSAT

Transpondedor del enlace ascendente	Límites de densidad de p.i.r.e. para un ángulo de elevación de 10° y en el borde del haz
4/6 GHz: Haces hemisféricos y de zona Haces globales y puntuales de tipo C	Cualquier combinación entre tipos de portadora INTELSAT salvo las formadas exclusivamente por interacción entre las portadoras SCPC: 21 dB(W/4 kHz) 24 dB(W/4 kHz)
4/6 GHz: Haces mundiales, hemisféricos y de zona	Formados exclusivamente por la interacción entre las portadoras SCPC preasignadas: 31,5 dBW para $2 \leq N \leq 7$ canales SCPC 48,1 - 20 log ₁₀ N para $N > 7$
11/14 GHz: Haz puntual	Cualquier combinación de los tipos de portadoras INTELSAT: 10 dB(W/4 kHz) para INTELSAT V-VI 16 dB(W/4 kHz) para INTELSAT VII-VIII

En el Cuadro 4 se indican ejemplos de valores típicos de la atenuación de intermodulación para estaciones terrenas terrestres/estaciones terrenas costeras y de la atenuación de productos de intermodulación debidos a múltiples portadores para los satélites Inmarsat-2 e Inmarsat-3.

CUADRO 4

Ejemplos de atenuación de intermodulación en estaciones terrenas y estaciones espaciales Inmarsat

Componente del sistema	Atenuación de intermodulación
Estación terrena terrestre/estación terrena costera Inmarsat	Productos de intermodulación de tercer orden: > 30 dB por debajo de la p.i.r.e. de cada una de las dos portadoras de prueba; cada portadora tiene una amplitud de $p.i.r.e.máx - 3$ dB, siendo $p.i.r.e.máx$ el máximo valor de la p.i.r.e.
Estación espacial Inmarsat-2 Transpondedor en sentido de ida Transpondedor en sentido de vuelta	Debido a múltiples portadoras: > 13,5 dB > 22,0 dB
Estación espacial Inmarsat-3 Transpondedor en sentido de ida Transpondedor en sentido de vuelta	Debido a múltiples portadoras: > 14,0 dB > 21,5 dB

4 Servicios de radiodifusión

En el caso de los transmisores de radiodifusión instalados en el mismo emplazamiento, se utiliza a menudo el factor de intermodulación inversa para caracterizar la intermodulación entre transmisores, A_{RIM} (Tipo 3).

Para ilustración, se ha elegido el siguiente ejemplo: el transmisor de radiodifusión sonora con MF deseado que funciona a una $f_1 = 98$ MHz y con 300 W de potencia resulta interferido por una señal de 300 mW generada por un segundo transmisor. La frecuencia f_2 varía entre 87,5 MHz y 108 MHz (Banda II) con una separación de frecuencias de $|f_1 - f_2| > 300$ kHz. Los resultados aparecen en el Cuadro 5.

CUADRO 5

Ejemplos de factor de intermodulación inversa en los emplazamientos del transmisor con MF

Frecuencia	f_1	f_2	$2f_1 - f_2$	$2f_2 - f_1$	$3f_1 - f_2$
Potencia absoluta (dBm)	55	25	15	-5	-20
A_{RIM} (dB)	-	-	10	30	45

Los valores típicos para el factor de intermodulación inversa en los transmisores con intermodulación de frecuencia son de 10 dB o superiores. La utilización de aisladores puede aumentar la protección.