RECOMENDACIÓN UIT-R SM.1134-1[[1]](#footnote-1)\*, [[2]](#footnote-2)\*\*

Cálculos de la interferencia de intermodulación en el servicio móvil terrestre

(1995-2007)

Alcance

La presente Recomendación sirve de base para calcular un máximo de tres interferencias de intermodulación que aparecen a la salida de un receptor bajo la influencia de señales no deseadas intensas a la entrada del mismo, debida a la no linealidad de la respuesta en amplitud del receptor.

Palabras clave

Interferencia de intermodulación, señales no deseadas, no linealidad

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

a) que, en los casos más característicos, los factores principales que determinan la interferencia en el servicio móvil terrestre son los siguientes:

– productos de intermodulación en banda generados por dos (o varias) señales interferentes de alto nivel;

– emisiones no deseadas que se pueden producir en un transmisor cuando una señal procedente de otro transmisor también está presente en la entrada de las etapas de RF del transmisor afectado;

– los niveles de las señales deseada e interferente son variables aleatorias;

b) que dos (o varias) señales no deseadas deben tener frecuencias específicas tales que los productos de intermodulación caigan en la banda de frecuencias de un receptor;

c) que la probabilidad de que se produzca una interferencia de intermodulación debida a más de dos señales no deseadas de alto nivel es muy pequeña;

d) que el procedimiento de cálculo de la interferencia de intermodulación ofrecerá un medio útil de promover la utilización eficaz del espectro por el servicio móvil terrestre,

recomienda

**1** que para el cálculo de la interferencia de intermodulación en el servicio móvil terrestre se utilice el modelo de intermodulación en el receptor que figura en el Anexo 1;

**2** que para calcular la interferencia de intermodulación se siga el procedimiento siguiente, cuyos detalles figuran en el Anexo 1;

**2.1** que se determine el valor medio y la dispersión de la potencia de una señal aleatoria deseada en la entrada del receptor;

**2.2** que se determine el valor medio y la dispersión de la potencia de una señal aleatoria de interferencia de intermodulación en la entrada del receptor;

**2.3** que se determine la probabilidad de que los productos de intermodulación generados en el propio receptor y los ocasionados por la intermodulación en el transmisor se produzcan durante la recepción;

**3** que las zonas afectadas por la interferencia de intermodulación y la separación geográfica necesaria entre los transmisores y receptores interferentes se determinen sobre la base de un valor dado de la probabilidad de interferencia, como se describe en el Anexo 1.

Anexo 1

Modelos de intermodulación

En este Anexo, dividido en cinco puntos, se describen dos modelos de intermodulación: el modelo de intermodulación en el receptor (RXIM) y el modelo de intermodulación en el transmisor (TXIM).

En el § 1 se describe la fórmula general para calcular la interferencia de intermodulación en el receptor. En el § 2 se indica el procedimiento de medición de la RXIM. En el § 3 se describe un procedimiento para evaluar la interferencia de intermodulación en el receptor utilizando la fórmula general. En el § 4 se indica la fórmula para calcular la interferencia de intermodulación en el transmisor y en el § 5 se indica cómo se calculan las probabilidades de interferencia de RXIM y TXIM.

# 1 Modelo de análisis de la intermodulación en el receptor

La potencia de interferencia de intermodulación de tercer orden de dos señales se calcula con la siguiente fórmula (Informe 522‑2 del ex CCIR, Düsseldorf, 1990):

  (1)

donde:

 *P*1 y *P*2: potencias de las señales interferentes a las frecuencias *f*1 y *f*2, respectivamente

 *Pino*: potencia del producto de intermodulación de tercer orden a la frecuencia *f*0(*f*0  2*f*1  *f*2)

 *K*2,1: coeficiente de intermodulación de tercer orden y se puede calcular con las mediciones de intermodulación de tercer orden u obtener a partir de las especificaciones del equipo

 1 y 2: parámetros de selectividad de frecuencia de RF a las desviaciones de frecuencia *f*1 y *f*2 con respecto a la frecuencia de funcionamiento *f*0, respectivamente.

Los valores de 1 y 2, por ejemplo, se pueden obtener mediante la ecuación para calcular la atenuación de una señal a una frecuencia fuera de sintonía.

  (2)

donde *BRF* es la anchura de banda de RF del receptor.

Cabe señalar que para una determinada serie de mediciones de intermodulación de tercer orden en receptores radioeléctricos analógicos del servicio móvil terrestre en las bandas de ondas métricas y decimétricas, se puede obtener la siguiente fórmula [McMahon, 1974] derivada de la ecuación (1):

  (3)

donde α es la desviación de frecuencia media (MHz) y es igual a:

 

# 2 Características de la interferencia de intermodulación en el receptor

En la Fig. 1, Gs representa el generador de la señal deseada y GI1 y GI2 son los generadores de las señales interferentes que constituyen el producto RXIM. Estas señales se aplican a la entrada del receptor.



Cuando se mide la característica de intermodulación del receptor, hay dos señales interferentes de igual nivel procedentes de los generadores GI1 y GI2 y la señal deseada de nivel *Psr* procedente del generador Gs, que se aplican a la entrada del receptor. La desintonización de frecuencia de la primera señal interferente se hace igual a *f*0; en cuanto a la segunda señal interferente, es aproximadamente igual a 2*f*0. El nivel de ambas señales interferentes a la entrada del receptor se aumenta hasta que alcanza *PI* (*IM*), nivel en que la calidad de recepción de la señal deseada no debe ser inferior a un valor determinado. La calidad de recepción está, pues, vinculada con la relación de protección cocanal A.

Obsérvese que:

 *Psr*: sensibilidad del receptor radioeléctrico (dBW)

 *PI* (*IM*): sensibilidad a la intermodulación, que fue medida en el receptor (dBW).

Se obtiene, pues, conforme a la ecuación (1):

  (4)

Este nivel tiene la relación siguiente con *Psr*:

  (5)

Por tanto *K*2,1 es:

  (6)

# 3 Procedimiento para el análisis de la intermodulación en el receptor

## 3.1 Modelo general

La interferencia causada por productos de intermodulación en el receptor se produce cuando se da las dos condiciones siguientes:

  (7)

y

  (8)

siendo:

 *fIMP*: frecuencia del producto de intermodulación considerado

 *FR*: frecuencia de sintonización del receptor

 *BFI*: valor de la banda de paso en la etapa FI o, si no existe dicha etapa, la anchura de banda del filtro de banda de base

 *Ps*: potencia de la señal útil (dBm)

 *Pino*: potencia equivalente de la interferencia del producto de intermodulación recalculada a la entrada del receptor (dBm)

 *A*: relación de protección cocanal.

La *Pino* viene dada por la ecuación (1). Según la ecuación (1), la condición (8) se puede expresar como sigue:

  (9)

donde:

  (10)

## 3.2 Método de cálculo del producto de intermodulación basado en puntos de intercepción

**3.2.1** En los casos en que no se pueda medir el factor *К*2,1del receptor, para determinar el producto de intermodulación conviene emplear parámetros tales como el *IPi* (puntos de intercepción de *i*-ésimo orden, siendo *i* = 2, 3 y 5) y factores *IМi* de idéntico orden de los microcircuitos empleados en las etapas de entrada (preselectores y mezcladores) de los receptores modernos. El valor de los parámetros *IPi* e *IМi* figura en las correspondientes especificaciones.

El parámetro más conocido es el *IP*3(Manual de comprobación técnica del espectro de la UIT, 2002, § 6.5), «punto de intercepción de tercer orden» que es un nivel teórico para el que el nivel del producto de intermodulación de tercer orden es igual a los niveles de cada señal de entrada (dos señales idénticas que generan el producto de intermodulación tales como 2*f*1 – *f*2 y 2*f*2 – *f*1) recalculado a la salida de un elemento no lineal (véase la Fig. 2).

Los parámetros *IPi* representan el grado de linealidad de las etapas de entrada del receptor en el sentido de su capacidad para generar productos de intermodulación del orden correspondiente. Cuanto mayor sea el nivel de *IPi*, mejor será la linealidad del receptor y más amplia su gama dinámica y, por consiguiente, mayores serán los niveles de las señales de entrada en los que se produce el producto de intermodulación y mejor será la protección del receptor contra la interferencia de intermodulación.

Los factores *IМi* representan la susceptibilidad del receptor al producto de intermodulación de orden correspondiente. Estos factores dan una idea de la relación entre el nivel de intermodulación a la salida del receptor y el nivel de las señales a la entrada del mismo (dos señales idénticas que generan el producto de intermodulación a la salida).

FigurA 2

Punto de intercepción de tercer orden *IP*3



En el Cuadro 1 se indican los valores medios y los límites de variación de los parámetros de los microcircuitos que se utilizan en las etapas de entrada de los receptores (preselectores y mezcladores), según los datos facilitados por los fabricantes más conocidos. Cada uno de los valores de estos parámetros figura en las especificaciones técnicas del equipo de que se trate. El parámetro *G* en el Cuadro 1 representa el factor de amplificación del preselector y las unidades dBc son decibelios respecto a la potencia de la portadora sin modular la emisión.

CUADRO 1

Parámetros de los microcircuitos que se utilizan
en las etapas de entrada de los receptores

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| G(dB) | *IP*3(dBm) | *IM*2(dBc) | *IM*3(dBc) | *IM*5(dBc) |
| 12 ± 5 | 28 ± 5 | –24 ± 5 | –30 ± 5 | –35 ± 5 |

En el Cuadro 2 aparecen las fórmulas para calcular los componentes del producto de intermodulación que se encuentran en la banda de paso de FI del receptor, siendo:

 *fIMP*: frecuencias del producto de intermodulación de 2º, 3º y 5º orden generados por dos o tres señales entrantes

 *Pe-in*: la potencia de la señal entrante equivalente a la entrada del receptor; por dos o tres señales entrantes a la entrada del receptor con niveles de *Pe-in* idénticos generan el mismo producto de intermodulación que las señales con niveles *P*1, *P*2, *P*3 distintos

 *PIMP*: niveles del producto de interferencia de 2º, 3º y 5º orden generados por dos o tres señales a la entrada, siendo *P*1, *P*2, *P*3 la potencia de dichas señales entrantes a las frecuencias *f*1, *f*2, *f*3, respectivamente. Los valores de PIMP se expresan en función de *IPi* e *IMi*.

CUADRO 2

Interferencia del producto de intermodulación de 2º, 3º y 5º orden
en el caso de 2 ó 3 señales entrantes no deseadas

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Frecuencia, *fIMP* | *fg* ± *fh*(*fg* > *fh*) | 2*fg* – *fh* | *fk* + *fl* – *fm* | 3*fg* – 2*fh* | 2*fk* – 2*fl* + *fm* |
| Orden y tipo de productos | 2 (1; 1) | 3 (2; 1) | 3 (1; 1; 1) | 5 (3; 2) | 5 (2; 2; 1) |
| P*e-in* (dBm) | (*Pg* + *Ph*)/2 | (2*Pg* + *Ph*)/3 | (*Pk* + *Pl* + *P*m)/3 | (3*Pg* + 2*Ph*)/5 | (2*Pk* + 2*Pl* + *Pm*)/5 |
| P*IMP* (dBm) | 2 (*Pe-in* + *G*) – *IP*2 | 3 (*Pe-in*+ *G*) – 2.*IP*3 | 3 (*Pe-in* + *G*) – 2.*IP*3 + 6 | 5 (*Pe-in* + *G*) – 4.*IP*5 | 5 (*Pe-in* + *G*) – 4.*IP*5 + 9,5 |
| *IM*2 + *Pe-in* | *IM*3 + *Pe-in* | *IM*3 + *Pe-in* + 6 | *IM*5 + *Pe-in* | *IM*5 + *Pe-in* + 9,5 |

En el Cuadro 2, las frecuencias *fIMP* y los niveles *Pe-in* del producto de intermodulación de diversos subíndices se determinan del modo siguiente.

En el caso de dos señales entrantes: cada índice *g* y *h* toma uno de los dos valores 1 ó 2 con la condición:

 *g* + *h* = 3

En el caso de tres señales entrantes: cada índice *k, l* y *m* toma uno de los tres valores 1, 2 ó 3 con la condición:

 *k*+ l + *m* = 6

Los cálculos de los niveles *Pe-in* del producto de intermodulación para diversos componentes del mismo debe efectuarse para la misma distribución de índices utilizada al calcular las frecuencias *fIMP* de dichos componentes.

En el Cuadro 2 también se indica el número de componentes *fIMP* y el número posible de niveles distintos *Pe-in* de diferente orden para señales entrantes de varios niveles. De las fórmulas *Pe-in* se desprende que para niveles de señales entrantes diferentes, los distintos componentes del producto de intermodulación a la salida para el mismo orden tienen también niveles diferentes, que pueden calcularse mediante este método.

La relación entre los niveles *IPi* e *IМi* puede calcularse sustituyendo los valores de *PIMP* en el Cuadro 2:

 *IP*2 = *Pe-in* + 2*G* – *IM*2

 *IP*3 = *Pe-in* + 0,5 (3*G* – *IM*3)

 *IP*5 = *Pe-in* + 0,25 (5*G* – *IM*5)

El nivel equivalente del producto de intermodulación recalculado a la entrada del receptor *Pino* es igual a:

 *Pino* = *PIMP* – *G*

Para atenuar las señales entrantes interferentes no deseadas se instalan generalmente filtros diplexores o paso banda a la entrada de los receptores, antes de los preselectores. Los parámetros de los filtros (con características de forma trapezoidal) son: la banda de paso *BRF1*, el extremo de la banda de atenuación *BRF*2 y la atenuación de las señales entrantes β*(*Δ*f)* fuera de la banda de paso (a Δ*f >* 0,5 *·* *BRF*2 la atenuación se considera constante e igual a *LF* dB).

En ese caso, las pérdidas de inserción del filtro en dB, son:

 

siendo: |Δ*f |* el desplazamiento de frecuencia de la señal entrante a la entrada del receptor:

 *a* = *LF*/0,5 (*BRF*2 – *BRF*1)

 *c* = – 0,5 *·* *a* *·* *BRF*1

La potencia de la señal a la entrada del preselector *Pj* a la frecuencia *fj* (*j* = 1; 2; 3) es:

 *Pj* = *Pj-in* – β (Δ*f*)

siendo *Pj-in* la potencia de la señal entrante a la entrada del receptor.

### 3.2.2 Procedimiento de cálculo de la interferencia de intermodulación

*Paso 1*: Se determina la atenuación de las señales entrantes que aparecen a la entrada del receptor debida a los filtros de entradaβ *(*Δ*fj)*, *j* = 1; 2; 3.

*Paso 2*: Se calculan los niveles de las señales entrantes que aparecen a la entrada del preselector *Pj*.

*Paso 3*:Se determinan los niveles del producto de intermodulación a la salida del mezclador *PIMP*.

*Paso 4*:Se obtiene el nivel de intermodulación equivalente recalculado a la entrada del receptor *Pino*.

*Paso 5*:Se calcula la relación señal/interferencia a la entrada del receptor *R*.

*Paso 6*:Se compara la relación señal/interferencia, *R*, con la relación de protección, *A*, para determinar las condiciones de compatibilidad del receptor con los otros sistemas radioeléctricos en el entorno electromagnético del caso.

### 3.2.3 Ejemplo de cálculos

Supóngase que se desea calcular la interferencia de intermodulación del tipo *f*1 + *f*2 – *f*3 en el receptor y determinar su efecto perjudicial.

[*Datos*](http://www.multitran.ru/c/m.exe?t=91853_1_2) *disponibles*: *IP*3 = 24 dBm; *G* = 15 dB; *P*1*-in* = –50 dBm; *P*2*-in* = –10 dBm; *P*3*-in* = –15 dBm; *Ps* = –114 dBm; *A* = 9 dB; *LF* = 30 dB.

Supóngase además que los desplazamientos de frecuencia |Δ*fj* | = |*FR – fj* | de las señales entrantes a la entrada del receptor son los siguientes:

 |Δ*f*1| ≤ 0,5 *·* *BRF*1; |Δ*f*2| > 0,5 *·* *BRF*2 y |Δ*f*3| > 0,5 *·* *BRF*2,

Es decir, una de las señales entrantes se encuentra en la banda de paso del filtro situado a la entrada del receptor y las otras dos fuera de dicha banda.

En este caso:

 β (Δ*f*1) = 0; β (Δ*f*2) = β (Δ*f*3) = 30 dB

 *Pj = Pj-in –* β *(*Δ*fj)*; *P*1= –50 dBm; *P*2 = –40 dBm; *P*3 = –45 dBm

A continuación se calculan *Pe-in* y *PIMP* mediante las fórmulas del Cuadro 2:

 *Pe-in* = (–50 – 40 – 45)/3 = –45 dBm

 *PIMP* = 3 (–45 + 15) – 2.24 + 6 = –132 dBm

 *Pino = PIMP – G* = –132 – 15 = –147 dBm

 *R = Ps – Pino* = –114 – (–147) = 33 dBm

*R > A*, por lo que de conformidad con la fórmula (8) existe compatibilidad.

# 4 Potencia de los productos de intermodulación en el transmisor

La potencia *Pi* del producto de intermodulación que se produce en el transmisor y que posteriormente llega a la entrada del receptor, se puede expresar de la siguiente manera:

  (11)

donde:

 : potencia del transmisor interferente (con frecuencia *f*2) en los terminales de salida del transmisor afectado (con frecuencia *f*1), donde se producen los productos de intermodulación (dBW)

 12, 10: atenuación debida a los circuitos de salida y de antena del transmisor afectado a la frecuencia *f*1 con respecto al transmisor interferente a la frecuencia *f*2, y al producto de intermodulación a la frecuencia *f*0, respectivamente (dB)

 *K*(2),1: pérdidas de conversión de intermodulación en el transmisor (dB) que son diferentes de *K*2,1 de la ecuación (1)

 *L*10: es la atenuación del producto de intermodulación en el trayecto entre el transmisor con frecuencia *f*1 y el receptor (dB).

La interferencia causada por TXIM se produce cuando:

  (12)

donde *A* es la relación de protección cocanal.

# 5 Probabilidad de interferencia

## 5.1 Probabilidad de interferencia RXIM

En las Recomendaciones UIT-R P.370, UIT-R P.1057 y UIT-R P.1146 se indica que, debido al desvanecimiento, los niveles de las señales deseada e interferente son variables aleatorias con una distribución logarítmico-normal. Por tanto, el término de la izquierda de la condición (9) (dBW) representa la suma de las cantidades aleatorias normales independientes y constituye una cantidad aleatoria normal. El valor medio,  y la dispersión, , de la cantidad aleatoria *R*  2*P*1  *P*2  *Ps* son iguales, respectivamente, a:

 

donde:

*P*1*m*, *P*2*m*, *Psm* son los valores medios y  son las dispersiones de los niveles de potencia de las señales deseada e interferente a la entrada del receptor (determinada sobre la base de los datos contenidos en la Recomendación UIT‑R P.370, UIT-R P.1057 y UIT-R P.1146).

## 5.2 Probabilidad de interferencia TXIM

Teniendo en cuenta la ecuación (11), la condición (12) toma la siguiente forma:

  (13)

donde:

 

El valor medio,  y la dispersión, , de la cantidad aleatoria:

 

son, respectivamente, iguales a:

 

donde:

, *Psm*, *L*10*m*: valores medios

 : dispersiones de las cantidades aleatorias .

## 5.3 Probabilidad de productos de intermodulación

La probabilidad, , de que durante la recepción aparezcan productos de intermodulación generados en el propio receptor y como resultado de la intermodulación en el transmisor (condiciones (9) y (13), respectivamente), es igual a:

  (14)

: al determinar la probabilidad de que aparezcan productos de intermodulación en los receptores (condición (9));

: al determinar la probabilidad de interferencia debida a los productos de intermodulación que aparecen en los transmisores (condición (13)).

Al determinar las zonas afectadas por la interferencia de intermodulación sobre la base de un valor dado de probabilidad de interferencia , el valor de *x* se determina primero mediante la ecuación (14). Después para un valor conocido de *Psm* se pueden determinar los valores admisibles de *P*1*m* y *P*2*m* o ( y *L*10*m*) y las separaciones geográficas necesarias correspondientes entre los transmisores interferentes y el receptor, de los que dependerá la zona afectada por la interferencia.

1. \* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de la Comisión de Estudio 5 de Radiocomunicaciones. [↑](#footnote-ref-1)
2. \*\* La Comisión de Estudio 1 de Radiocomunicaciones introdujo algunas modificaciones redaccionales en esta Recomendación en 2018 y 2019, de conformidad con la Resolución UIT-R 1. [↑](#footnote-ref-2)