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

Расчет интермодуляционных помех в сухопутной подвижной службе

(1995-2007)

**Сфера применения**

Настоящая Рекомендация служит основой для расчета не более трех интермодуляционных помех, создаваемых на выходе приемника под влиянием интенсивных мешающих сигналов на входе приемника в результате нелинейности амплитудной характеристики приемника.

Ключевые слова

Интермодуляционные помехи, мешающие сигналы, нелинейность.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая*,

a) что, в наиболее типичных случаях, основные факторы, определяющие помехи в сухопутной подвижной службе включают в себя:

– находящиеся в полосе частот продукты интермодуляции, генерируемые двумя (или несколькими) мощными мешающими сигналами;

– нежелательные излучения, которые могут возникнуть в передатчике, когда в его выходных радиочастотных каскадах появляются посторонние сигналы от другого передатчика;

– уровни полезного и мешающего сигналов представляют собой случайные переменные;

b) что два (или несколько) нежелательных сигналов должны иметь такие конкретные частоты, что продукты их интермодуляции попадают в полосу частот приемника;

с) что вероятность возникновения интермодуляционных помех, вызванных взаимодействием более чем двух мощных нежелательных сигналов, очень мала;

d) что процедуры расчетов интермодуляционных помех представляют собой полезное средство для обеспечения более эффективного использования спектра в сухопутной подвижной службе,

*рекомендует*,

**1** чтобы при расчете интермодуляционных помех в сухопутной подвижной службе использовалась интермодуляционная модель приемника, представленная в Приложении 1;

**2** чтобы расчеты интермодуляционных помех производились по следующей процедуре, подробные сведения о которой представлены в Приложении 1;

**2.1** определение средней величины и дисперсии мощности случайного полезного сигнала на входе приемника;

**2.2** определение средней величины и дисперсии мощности случайного сигнала интермодуляционной помехи на входе приемника;

**2.3** определение вероятности того, что продукты интермодуляции, генерируемые как в самом приемнике, так и в результате интермодуляции в передатчике, будут иметь место во время приема;

**3** чтобы зоны, подверженные интемодуляционным помехам, и соответствующий необходимый географический разнос мешающих передатчиков и приемников определялись на основе заданных величин вероятности помех, как это описано в Приложении 1.

Приложение 1  
  
Модели интермодуляции

В данном Приложении описываются две интермодуляционные модели: модель интермодуляции в приемнике (RXIM) и модель интермодуляции в передатчике (TXIM). Приложение состоит из пяти разделов.

В разделе 1 описывается общая формула для расчета интермодуляционных помех в приемнике. В разделе 2 описывается процедура измерений RXIM. В разделе 3 представлена процедура оценки интермодуляционных помех в приемнике с помощью общей формулы. В разделе 4 дается формула для расчета интермодуляционных помех передатчика. В разделе 5 показано, как могут быть рассчитаны вероятности помех RXIM и TXIM.

# 1 Модель для анализа интермодуляции в приемнике

Мощность продуктов интермодуляции третьего порядка для двух сигналов определяется по следующей формуле (Отчет 522-2 бывшего МККР, Дюссельдорф, 1990 г.):

, (1)

где:

*P*1 и *P*2: мощности мешающих сигналов на частотах *f*1 и *f*2, соответственно;

*Pino*: мощность продуктов интермодуляции третьего порядка на частоте *f*0(*f*0  2*f*1  *f*2);

*K*2,1: коэффициент интермодуляции третьего порядка, который может быть рассчитан с помощью измерений интермодуляции третьего порядка, либо получен из описания характеристик оборудования;

β1 и β2: параметры избирательности по радиочастоте при отклонениях частоты Δ*f*1 и Δ*f*2 от рабочей частоты *f*0, соответственно.

Величины β1 и β2, к примеру, могут быть получены из уравнения для расчета ослабления сигнала на ненастроенной частоте.

, (2)

где *BRF –* полоса пропускания приемника по радиочастоте.

Следует отметить, что для определенного комплекса измерений интермодуляции третьего порядка для аналоговых радиоприемников сухопутной подвижной службы, работающих в диапазоне ОВЧ и нижней частоте диапазона УВЧ, уравнение 1 может быть преобразовано для получения следующей формулы [McMahon, 1974]:

, (3)

где *f –* средняя девиация частоты (МГц), равная:

.

# 2 Характеристики приемника в отношении интермодуляционных помех

На рисунке 1 генератор полезного сигнала (WS) обозначен Gs. GI1 и GI2 – генераторы мешающих сигналов (IS), которые создают продукты RXIM. Эти сигналы подводятся ко входу приемника (RX).



При измерении интермодуляционных характеристик приемника RX на его вход подаются два сигнала IS одинакового уровня от генераторов GI1 и GI2 и полезный сигнал WS от генератора Gs с уровнем *Psr*. Расстройка по частоте первого IS выбирается равной *f*0, а второго IS – приблизительно равной 2*f*0. Уровни обоих IS на входе приемника RX повышаются до тех пор, пока не будет достигнуто *PI*(*IM*), когда качество приема полезного сигнала WS не начнет снижаться ниже некоторого заданного уровня. Качество приема четко связано с защитным отношением *A*.

Следует отметить, что:

*Psr*: чувствительность радиоприемника (дБВт);

*PI*(*IM*): чувствительность к интермодуляции, измеренная для данного приемника (дБВт).

Таким образом, в соответствии с формулой 1:

. (4)

Этот уровень соотносится с *Psr* как:

. (5)

Следовательно, *K*2,1 определяется как:

. (6)

# 3 Процедура анализа интермодуляции в приемнике

## 3.1 Общая модель

Помехи, вызываемые продуктами интермодуляции (IMP) в приемнике, имеют место, когда выполняются два следующих условия:

 (7)

и

, (8)

где:

*fIMP*: частота рассматриваемых IMP;

*FR*: частота настройки приемника;

*BIF*: значение полосы пропускания каскада ПЧ или полосы частот, использующей полосной фильтр, если каскад ПЧ отсутствует;

*Ps*: мощность полезного сигнала (дБм);

*Pino*: эквивалентная мощность помехи IMP, пересчитанная к входу приемника (дБм);

*A*: защитное отношение в совмещенном канале.

*Pino* определяется по формуле 1. С учетом формулы 1 условие 8 может быть преобразовано:

, (9)

где:

. (10)

## 3.2 Метод расчета IMP, основанный на точках пересечения

**3.2.1** В случаях отсутствия возможности измерения коэффициента *К*2,1приемника, для того чтобы определить помехи IMP, целесообразно использовать такие параметры как *IPi* – точки пересечения *i*‑го порядка, где *i* = 2, 3 и 5, и коэффициенты *IМi* тех же порядков для микросхем, которые используются во входных каскадах (преселекторы и смесители) современных приемников. Параметры *IPi* и *IМi* можно получить из описания соответствующих характеристик.

Наиболее распространенным является параметр *IP*3(Справочник по радиоконтролю МСЭ, 2002 г., п. 6.5) – "точка пересечения третьего порядка" – теоретический уровень, на котором уровень IMP третьего порядка равен индивидуальным уровням поступающих сигналов (двух равных сигналов, генерирующих IMP, такие как 2*f*1 – *f*2 и 2*f*2 – *f*1), пересчитанный к выходу нелинейного элемента (см. рисунок 2).

Параметры *IPi* характеризуют степень линейности входных каскадов приемника в смысле их способности генерировать IMP соответствующих порядков. Чем выше уровни *IPi*, тем лучше линейность приемника и тем шире динамический диапазон, а следовательно, выше уровни поступающих сигналов, на которые возникают IMP, и лучше защита приемника от помех IMP.

Параметры *IМi* характеризуют чувствительность приемника к IMP соответствующих порядков. Они представляют собой отношение уровня IMP на выходе приемника к уровню поступающих сигналов на его входе (два равных сигнала, генерирующие IMP на выходе).

РИСУНОК 2

Точка пересечения третьего порядка *IP*3



В таблице 1 приводятся средние значения и пределы колебаний параметров микросхем, использованных в качестве входных каскадов приемников (преселекторы и смесители), которые были предоставлены наиболее известными производителями. Индивидуальные значения этих параметров можно получить из технических характеристик соответствующего оборудования. Параметр *G* в таблице 1 представляет собой коэффициент усиления преселектора, а dBc – децибелы по отношению к мощности излучения немодулированной несущей.

ТАБЛИЦА 1

Параметры микросхем входных каскадов приемников

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

Формулы для расчета составляющих IMP, которые могут попадать в полосу пропускания ПЧ приемника, приведены в таблице 2, в которой:

*fIMP*: частоты IMP 2-го, 3-го и 5-го порядков, генерированных двумя или тремя поступающими сигналами;

*Pe-in*: мощность эквивалентного поступающего сигнала на входе приемника – два или три поступающих сигнала на входе приемника с одинаковыми уровнями *Pe-in* генерируют такие же IMP, что и поступающие сигналы с различными уровнями *P*1, *P*2, *P*3;

*PIMP*: уровни IMP 2-го, 3-го и 5-го порядков, полученные в результате двух или трех поступающих сигналов на входе, где *P*1, *P*2, *P*3 – мощности поступающих сигналов на частотах *f*1, *f*2, *f*3, соответственно. Значения *PIMP* выражены в отношении *IPi* и *IMi*.

TAБЛИЦА 2

Помехи IMP 2-го, 3-го и 5-го порядков при 2 или 3 мешающих поступающих сигналах

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Частота *fIMP* | *fg ± fh*  (*fg > fh*) | 2*fg – fh* | *fk + fl – fm* | 3*fg – 2fh* | 2*fk – 2fl + fm* |
| Порядок и тип продуктов | 2(1; 1) | 3(2; 1) | 3(1; 1; 1) | 5(3; 2) | 5(2; 2; 1) |
| *Pe-in* (дБм) | (*Pg + Ph*)/2 | (2*Pg + Ph*)/3 | (*Pk + Pl + Pm*)*/*3 | (3*Pg +* 2*Ph*)/5 | (2*Pk +* 2*Pl + Pm*)/5 |
| *PIMP* (дБм) | 2(*Pe-in + Gi*) *– IP*2 | 3(*Pe-in+ G*) *–* 2*IP*3 | 3(*Pe-in + G*) *–* 2*IP*3 *+* 6 | 5(*Pe-in + G*) *–* 4*IP5* | 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 |

В таблице 2 индексы при частотах IMP *fIMP* и уровнях *Pe-in* IMP различных подстрочных индексов определяются следующим образом.

Для двух поступающих сигналов: каждый индекс *g* и *h* принимает одно из двух значений 1 или 2, при условии:

*g* + *h* = 3.

Для трех поступающих сигналов: каждый индекс *k*, *l* и *m* принимает одно из трех значений 1, 2 или 3, при условии:

*k* + l + *m* = 6.

Расчет уровней *Pe-in* IMP для различных составляющих IMP должен производиться для тех же распределений индексов, что и для расчета частот *fIMP* этих составляющих.

В таблице 2 приводится также число составляющих *fIMP*, а также возможное число различных уровней *Pe-in* IMP различных порядков при различных уровнях поступающих сигналов. На основе формул для *Pe-in* можно сделать вывод, что при различных уровнях поступающих сигналов различные составляющие IMP на выходе для одного и того же порядка также имеют различные уровни, которые могут быть рассчитаны с использованием этого метода.

Соотношение между уровнями *IPi* и *IМi* можно найти путем представления в виде уравнения значений *PIMP*, приведенных в таблице 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).

Эквивалентный уровень IMP, пересчитанный к входу приемника *Pino*, равен:

*Pino* = *PIMP* – *G****.***

Для ослабления мешающих поступающих сигналов, на входах приемников перед селекторами обычно устанавливаются диплексные или полосовые фильтры. Параметры фильтров (при трапецоидальных формах их характеристик) следующие: полоса пропускания *BRF1*, граница полосы заграждения *BRF*2 и ослабление поступающих сигналов β(Δ*f*)за пределами полосы пропускания (при Δ*f >* 0,5*·BRF*2ослабление считается постоянным и равным *LF* дБ).

В этом случае, вносимые потери фильтра (дБ) составят:

,

где |Δ*f|* – частотный сдвиг поступающего сигнала на входе приемника

*a* = *LF*/0,5 · (*BRF*2 – *BRF*1)

*c* = – 0,5 · *a* · *BRF*1.

Мощность сигнала на входе преселектора *Pj* на частоте *fj*(*j* = 1; 2; 3) равна:

*Pj* = *Pj-in* – β(Δ*f*),

где *Pj-in* − мощность поступающего сигнала на входе приемника.

### 3.2.2 Процедура расчета помех IMP предусматривает следующие этапы

*Шаг 1*: Определение ослабления, посредством фильтров на входеβ(Δ*fj*), *j* = 1; 2; 3, поступающих сигналов, действующих на входе приемника.

*Шаг 2*: Расчет уровней поступающих сигналов, действующих на входе преселектора *Pj.*

*Шаг 3*: Определение уровней IMP на выходе смесителя *PIMP*.

*Шаг 4*: Оценка эквивалентного уровня IMP, пересчитанного к входу приемника *Pino.*

*Шаг 5*: Расчет сигнала – отношение помехи на входе приемника *R.*

*Шаг 6*: Сравнение сигнала – соотношение помехи *R* с защитным отношением *A* для определения условий совместимости приемника с другими радиоэлектронными системами в конкретной электромагнитной среде.

### 3.2.3 Пример расчетов

Предположим, что необходимо рассчитать помеху IMP, наподобие *f*1 + *f*2 – *f*3, в приемнике и оценить ее вредное воздействие.

[*Вводимые*](http://www.multitran.ru/c/m.exe?t=91853_1_2) *данные*: *IP*3 = 24 дБм; *G* = 15 дБ; *P*1*-in* = –50 дБм; *P*2*-in* = –10 дБм; *P*3*-in* = –15 дБм; *PS* = −114 дБм; *A* = 9 дБ; *LF* = 30 дБ.

Предположим, что частотные сдвиги поступающих сигналов на входе приемника |Δ*fj*| = |*FR – fj*| составляют:

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

т. e. один поступающий сигнал лежит в полосе пропускания фильтра на входе приемника, а два других поступающих сигнала – за пределами полосы пропускания.

В этом случае:

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

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

Прибегнув к уравнениям таблицы 2, расчитаем *Pe-in* и *PIMP*:

*Pe-in* = (–50 – 40 – 45)/3 = –45 дБм

*PIMP* = 3 (–45 + 15) – 2 . 24 + 6 = –132 дБм

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

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

*R > A* и поэтому, в соответствии с уравнением 8, совместимость обеспечивается.

# 4 Мощность продуктов интермодуляции в передатчике

Мощность *Pi* продуктов интермодуляции, возникающих в передатчике и затем поступающих на вход приемника, может быть определена по формуле:

, (11)

где:

: мешающая мощность передатчика (на частоте *f*2) на выходе неисправного передатчика (работающего на частоте *f*1), в котором возникают продукты интермодуляции (дБВт);

12, 10: подавление, осуществляемое выходными цепями неисправного передатчика на частоте *f*1 и фидерами его антенны по отношению к мещающему передатчику на частоте *f*2, и к продуктам интермодуляции на частоте *f*0, соответственно (дБ);

*K*(2),1: потери интермодуляционного преобразования в передатчике (дБ), которые отличаются от *K*2,1 в формуле 1;

*L*10: ослабление продуктов интермодуляции на трассе между передатчиком, работающим на частоте *f*1, и приемником (дБ).

Помехи, вызванные TXIM, имеют место, если:

, (12)

где *A* – защитное отношение в совмещенном канале.

# 5 Вероятность помехи

## 5.1 Вероятность помех RXIM

В Рекомендациях МСЭ-R Р.370, МСЭ-R Р.1057, МСЭ-R Р.1146 указывается, что из-за замираний уровни полезного и мешающего сигналов представляют собой случайные переменные с логарифмически нормальным распределением. Следовательно, левая сторона условия 9, выраженная в дБВт, представляет собой сумму независимых нормальных случайных величин, являющуюся нормальной случайной величиной. Средняя величина  и дисперсия  случайной величины *R*=2*P*1 + *P*2 – *Ps* равняется, соответственно:

,

где:

*P*1*m*, *P*2*m*, *Psm* – средние величины, а  – дисперсии уровней мощности полезного и мешающего сигналов на входе приемника (определенные на базе данных, содержащихся в МСЭ-R Р.370, МСЭ-R Р.1057, МСЭ-R Р.1146).

## 5.2 Вероятность помех TXIM

С учетом формулы 11 условие 12 принимает вид:

, (13)

где:

.

Средняя величина и дисперсия  являются случайными величинами:



и равняются, соответственно:

,

где:

*P'*2*m*, *Psm*, *L*10*m*: средние величины

: дисперсии случайных величин *P'*2, *Ps*, и *L*10.

## 5.3 Вероятность интермодуляционных продуктов

Вероятность α того, что интермодуляционные продукты, генерируемые как в самом приемнике, так и в результате интермодуляции в передатчике (условия 9 и 13, соответственно) будут иметь место одновременно в момент приема, равна:

. (14)

: по определению вероятности интермодуляционных продуктов, возникающих в приемнике (условие 9);

: по определению вероятности помехи от интермодуляционных продуктов, возникающих в передатчиках (условие 13).

При определении зон, затронутых интермодуляционными помехами на основе заданной величины вероятности помех α, сначала из равенства 14 определяют величину *х*.Затем, при известной величине *Psm*,можно определить допустимые величины *P*1*m* и *P*2*m* (или *P'*2*m* и *L*10*m*) и соответствующий необходимый географический разнос мешающего передатчика и приемника, от которого будет зависеть зона, подверженная помехе.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

1. \* Данная Рекомендация должна быть доведена до сведения 8-й Исследовательской комиссии по радиосвязи. [↑](#footnote-ref-1)
2. \*\* В 2018 и 2019 годах 1-я Исследовательская комиссия по радиосвязи внесла поправки редакционного характера в настоящую Рекомендацию в соответствии с Резолюцией МСЭ-R 1. [↑](#footnote-ref-2)