

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R SM.1134-1*,**

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,

а) 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;

б) 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;

д) 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;

* Данная Рекомендация должна быть доведена до сведения 8-й Исследовательской комиссии по радиосвязи.

** 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.

3 чтобы зоны, подверженные интермодуляционным 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.):

$$P_{ino} = 2(P_1 - \beta_1) + (P_2 - \beta_2) - K_{2,1}, \quad (1)$$

где:

- P_1 и P_2 : мощности мешающих сигналов на частотах f_1 и f_2 , соответственно;
- P_{ino} : мощность продуктов интермодуляции третьего порядка на частоте f_0 ($f_0 = 2f_1 - f_2$);
- $K_{2,1}$: коэффициент интермодуляции третьего порядка, который может быть рассчитан с помощью измерений интермодуляции третьего порядка, либо получен из описания характеристик оборудования;
- β_1 и β_2 : параметры избирательности по радиочастоте при отклонениях частоты Δf_1 и Δf_2 от рабочей частоты f_0 , соответственно.

Величины β_1 и β_2 , к примеру, могут быть получены из уравнения для расчета ослабления сигнала на ненастроенной частоте.

$$\beta(\Delta f) = 60 \log \left[1 + \left(\frac{2 \Delta f}{B_{RF}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где B_{RF} – 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]:

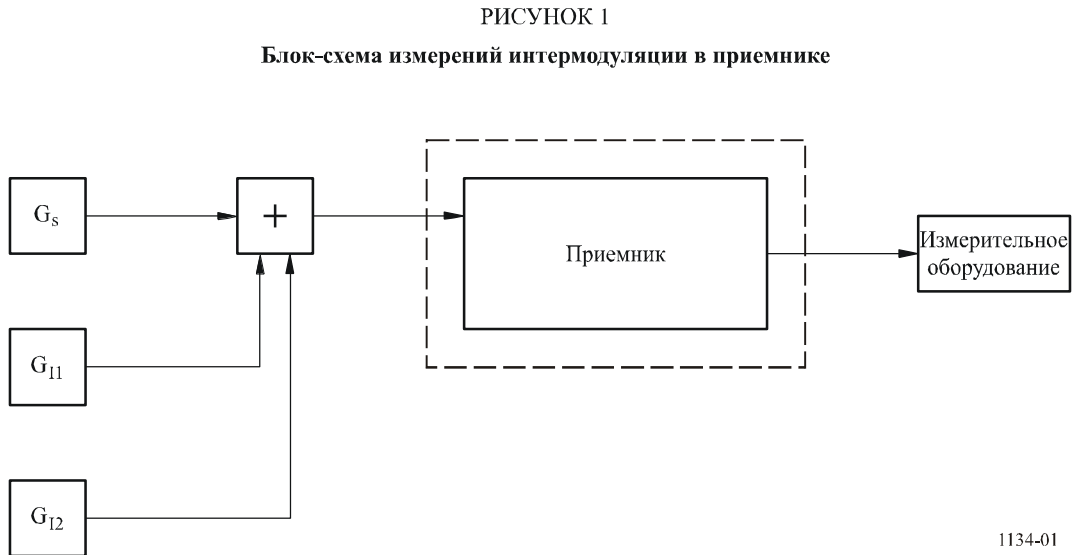
$$P_{ino} = 2P_1 + P_2 + 10 - 60 \log(\sigma f), \quad (3)$$

где σf – средняя девиация частоты (МГц), равная:

$$\frac{\Delta f_1 + \Delta f_2}{2}.$$

2 Характеристики приемника в отношении интермодуляционных помех

На рисунке 1 генератор полезного сигнала (WS) обозначен G_s . G_{11} и G_{12} – 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 G_{11} и G_{12} и полезный сигнал WS от генератора G_s с уровнем P_{sr} . Расстройка по частоте первого IS выбирается равной Δf_0 , а второго IS – приблизительно равной $2\Delta f_0$. Уровни обоих IS на входе приемника RX повышаются до тех пор, пока не будет достигнуто $P_I(IM)$, когда качество приема полезного сигнала WS не начнет снижаться ниже некоторого заданного уровня. Качество приема четко связано с защитным отношением A .

Следует отметить, что:

P_{sr} : чувствительность радиоприемника (дБВт);

$P_I(IM)$: чувствительность к интермодуляции, измеренная для данного приемника (дБВт).

Таким образом, в соответствии с формулой 1:

$$P_{ino} = 3P_I(IM) - 2\beta(\Delta f_0) - \beta(2\Delta f_0) - K_{2,1}. \quad (4)$$

Этот уровень соотносится с P_{sr} как:

$$P_{sr} - A = P_{ino}. \quad (5)$$

Следовательно, $K_{2,1}$ определяется как:

$$K_{2,1} = 3P_I(IM) - 2\beta(\Delta f_0) - \beta(2\Delta f_0) - P_{sr} + A. \quad (6)$$

3 Процедура анализа интермодуляции в приемнике

3.1 Общая модель

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

$$F_R - 0,5 \cdot B_{IF} \leq f_{IMP} \leq F_R + 0,5 \cdot B_{IF} \quad (7)$$

и

$$P_s - P_{ino} < A, \quad (8)$$

где:

- f_{IMP} : частота рассматриваемых IMP;
 F_R : частота настройки приемника;
 B_{IF} : значение полосы пропускания каскада ПЧ или полосы частот, использующей полосной фильтр, если каскад ПЧ отсутствует;
 P_s : мощность полезного сигнала (дБм);
 P_{ino} : эквивалентная мощность помехи IMP, пересчитанная к входу приемника (дБм);
 A : защитное отношение в совмещенном канале.

P_{ino} определяется по формуле 1. С учетом формулы 1 условие 8 может быть преобразовано:

$$2P_1 + P_2 - P_s > R_0, \quad (9)$$

где:

$$R_0 = -A + 2\beta_1 + \beta_2 + K_{2,1}. \quad (10)$$

3.2 Метод расчета IMP, основанный на точках пересечения

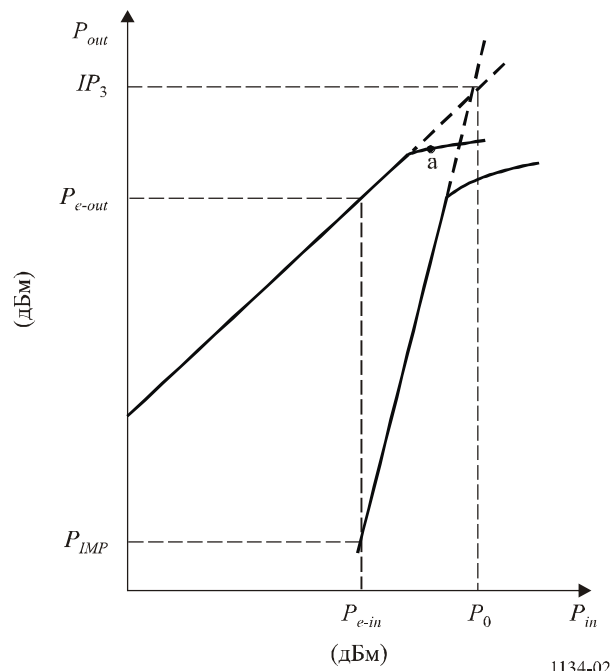
3.2.1 В случаях отсутствия возможности измерения коэффициента $K_{2,1}$ приемника, для того чтобы определить помехи IMP, целесообразно использовать такие параметры как IP_i – точки пересечения i -го порядка, где $i = 2, 3$ и 5 , и коэффициенты IM_i тех же порядков для микросхем, которые используются во входных каскадах (преселекторы и смесители) современных приемников. Параметры IP_i и IM_i 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 $2f_1 - f_2$ и $2f_2 - f_1$), пересчитанный к выходу нелинейного элемента (см. рисунок 2).

Параметры IP_i характеризуют степень линейности входных каскадов приемника в смысле их способности генерировать IMP соответствующих порядков. Чем выше уровни IP_i , 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 IM_i 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 (дВс)	IM_3 (дВс)	IM_5 (дВс)
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:

- f_{IMP} : частоты IMP 2-го, 3-го и 5-го порядков, генерированных двумя или тремя поступающими сигналами;
- P_{e-in} : мощность эквивалентного поступающего сигнала на входе приемника – два или три поступающих сигнала на входе приемника с одинаковыми уровнями P_{e-in} генерируют такие же IMP , что и поступающие сигналы с различными уровнями P_1, P_2, P_3 ;
- P_{IMP} : 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 P_{IMP} выражены в отношении IP_i и IM_i .

ТАБЛИЦА 2

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

Частота f_{IMP}	$f_g \pm f_h$ ($f_g > f_h$)	$2f_g - f_h$	$f_k + f_l - f_m$	$3f_g - 2f_h$	$2f_k - 2f_l + f_m$
Порядок и тип продуктов	2(1; 1)	3(2; 1)	3(1; 1; 1)	5(3; 2)	5(2; 2; 1)
P_{e-in} (дБм)	$(P_g + P_h)/2$	$(2P_g + P_h)/3$	$(P_k + P_l + P_m)/3$	$(3P_g + 2P_h)/5$	$(2P_k + 2P_l + P_m)/5$
P_{IMP} (дБм)	$2(P_{e-in} + G) - IP_2$	$3(P_{e-in} + G) - 2IP_3$	$3(P_{e-in} + G) - 2IP_3 + 6$	$5(P_{e-in} + G) - 4IP_5$	$5(P_{e-in} + G) - 4IP_5 + 9,5$
	$IM_2 + P_{e-in}$	$IM_3 + P_{e-in}$	$IM_3 + P_{e-in} + 6$	$IM_5 + P_{e-in}$	$IM_5 + P_{e-in} + 9,5$

В таблице 2 индексы при частотах IMP f_{IMP} и уровнях P_{e-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 P_{e-in} IMP для различных составляющих IMP должен производиться для тех же распределений индексов, что и для расчета частот f_{IMP} этих составляющих.

В таблице 2 приводится также число составляющих f_{IMP} , а также возможное число различных уровней P_{e-in} IMP различных порядков при различных уровнях поступающих сигналов. На основе формул для P_{e-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 IP_i и IM_i можно найти путем представления в виде уравнения значений P_{IMP} , приведенных в таблице 2:

$$IP_2 = P_{e-in} + 2G - IM_2$$

$$IP_3 = P_{e-in} + 0,5(3G - IM_3)$$

$$IP_5 = P_{e-in} + 0,25(5G - IM_5).$$

Эквивалентный уровень IMP, пересчитанный к входу приемника P_{ino} , равен:

$$P_{ino} = P_{IMP} - G.$$

Для ослабления мешающих поступающих сигналов, на входах приемников перед селекторами обычно устанавливаются дуплексные или полосовые фильтры. Параметры фильтров (при трапециoidalных формах их характеристик) следующие: полоса пропускания B_{RF1} , граница полосы заграждения B_{RF2} и ослабление поступающих сигналов $\beta(\Delta f)$ за пределами полосы пропускания (при $\Delta f > 0,5 \cdot B_{RF2}$ ослабление считается постоянным и равным L_F дБ).

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

$$\beta(\Delta f) = \begin{cases} 0 & \text{при } |\Delta f| \leq 0,5 \cdot B_{RF1} \\ a \cdot |\Delta f| + c & \text{при } 0,5 \cdot B_{RF1} \leq |\Delta f| \leq 0,5 \cdot B_{RF2} \\ L_F & \text{при } 0,5 \cdot B_{RF2} \leq |\Delta f| \end{cases}$$

где $|\Delta f|$ – частотный сдвиг поступающего сигнала на входе приемника

$$a = L_F/0,5 \cdot (B_{RF2} - B_{RF1})$$

$$c = -0,5 \cdot a \cdot B_{RF1}.$$

Мощность сигнала на входе преселектора P_j на частоте f_j ($j = 1; 2; 3$) равна:

$$P_j = P_{j-in} - \beta(\Delta f),$$

где P_{j-in} – мощность поступающего сигнала на входе приемника.

3.2.2 Процедура расчета помех ИМР предусматривает следующие этапы

Шаг 1: Определение ослабления, посредством фильтров на входе $\beta(\Delta f_j)$, $j = 1; 2; 3$, поступающих сигналов, действующих на входе приемника.

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

Шаг 3: Определение уровней ИМР на выходе смесителя P_{IMP} .

Шаг 4: Оценка эквивалентного уровня ИМР, пересчитанного к входу приемника P_{ino} .

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

Шаг 6: Сравнение сигнала – соотношения 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 ИМР, наподобие $f_1 + f_2 - f_3$, в приемнике и оценить ее вредное воздействие.

Вводимые данные: $IP_3 = 24$ дБм; $G = 15$ дБ; $P_{1-in} = -50$ дБм; $P_{2-in} = -10$ дБм; $P_{3-in} = -15$ дБм; $P_S = -114$ дБм; $A = 9$ дБ; $L_F = 30$ дБ.

Предположим, что частотные сдвиги поступающих сигналов на входе приемника $|\Delta f_j| = |F_R - f_j|$ составляют:

$$|\Delta f_1| \leq 0,5 \cdot B_{RF1}; |\Delta f_2| > 0,5 \cdot B_{RF2} \text{ и } |\Delta f_3| > 0,5 \cdot B_{RF2},$$

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

В этом случае:

$$\beta(\Delta f_1) = 0; \beta(\Delta f_2) = \beta(\Delta f_3) = 30 \text{ дБ}$$

$$P_j = P_{j-in} - \beta(\Delta f_j); P_1 = -50 \text{ дБм}; P_2 = -40 \text{ дБм}; P_3 = -45 \text{ дБм}$$

Прибегнув к уравнениям таблицы 2, рассчитаем P_{e-in} и P_{IMP} :

$$P_{e-in} = (-50 - 40 - 45)/3 = -45 \text{ дБм}$$

$$P_{IMP} = 3(-45 + 15) - 2 \cdot 24 + 6 = -132 \text{ дБм}$$

$$P_{ino} = P_{IMP} - G = -132 - 15 = -147 \text{ дБм}$$

$$R = P_S - P_{ino} = -114 - (-147) = 33 \text{ дБм}$$

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

4 Мощность продуктов интермодуляции в передатчике

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

$$P_i = P_2' - \beta_{12} - \beta_{10} - K_{(2),1} - L_{10}, \quad (11)$$

где:

- P'_2 : мешающая мощность передатчика (на частоте f_2) на выходе неисправного передатчика (работающего на частоте f_1), в котором возникают продукты интермодуляции (дБВт);
- β_{12}, β_{10} : подавление, осуществляемое выходными цепями неисправного передатчика на частоте f_1 и фидерами его антенны по отношению к мешающему 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 ТХИМ, имеют место, если:

$$P_s - P_i < A, \quad (12)$$

где A – защитное отношение в совмещенном канале.

5 Вероятность помехи

5.1 Вероятность помех RXИМ

В Рекомендациях МСЭ-R P.370, МСЭ-R P.1057, МСЭ-R P.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 \bar{R} и дисперсия σ_R^2 случайной величины $R = 2P_1 + P_2 - P_s$ равняется, соответственно:

$$\begin{aligned} \bar{R} &= 2P_{1m} + P_{2m} - P_{sm} \\ \sigma_R^2 &= 4\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_s^2, \end{aligned}$$

где:

P_{1m}, P_{2m}, P_{sm} – средние величины, а $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_s^2$ – дисперсии уровней мощности полезного и мешающего сигналов на входе приемника (определенные на базе данных, содержащихся в МСЭ-R P.370, МСЭ-R P.1057, МСЭ-R P.1146).

5.2 Вероятность помех ТХИМ

С учетом формулы 11 условие 12 принимает вид:

$$P'_2 - P_s - L_{10} > T_0, \quad (13)$$

где:

$$T_0 = \beta_{12} + \beta_{10} + K_{(2),1} - A.$$

Средняя величина \bar{T} и дисперсия σ_T^2 являются случайными величинами:

$$T = P'_2 - P_s - L_{10}$$

и равняются, соответственно:

$$\begin{aligned} \bar{T} &= P'_{2m} - P_{sm} - L_{10m} \\ \sigma_T^2 &= \sigma_2^2 + \sigma_s^2 + \sigma_1^2, \end{aligned}$$

где:

P'_{2m}, P_{sm}, L_{10m} : средние величины

$\sigma_2^2, \sigma_s^2, \sigma_1^2$: дисперсии случайных величин P'_{2m}, P_s , и L_{10m} .

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:

$$\alpha = \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} \frac{dt}{\sqrt{2\pi}}. \quad (14)$$

$x = (R_0 - \bar{R})/\sigma_R$: по определению вероятности интермодуляционных продуктов, возникающих в приемнике (условие 9);

$x = (T_0 - \bar{T})/\sigma_T$: 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 x . Затем, при известной величине P_{sm} , можно определить допустимые величины P_{1m} и P_{2m} (или P'_{2m} и L_{10m}) и соответствующий необходимый географический разнос мешающего передатчика и приемника, от которого будет зависеть зона, подверженная помехе.
