

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R SM.337-5

Частотный и территориальный разнос

(Вопрос МСЭ-R 72/1)

(1948-1951-1953-1963-1970-1974-1990-1992-1997-2007)

Сфера применения

Настоящая Рекомендация обеспечивает порядок расчета территориального и частотного разнеса для приемлемого уровня помех.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

а) что в большинстве случаев основными факторами, определяющими соответствующие критерии частотного или территориального разнеса, являются:

- мощность сигнала и его спектральное распределение, требуемые приемником;
- мощность и спектральное распределение мешающих сигналов и шума, поступающих в приемник;
- зависимость потерь передачи при распространении радиоволн от расстояния;

б) что в общем случае передатчики создают излучение вне необходимой ширины полосы, занимаемой излучением;

с) что влияние оказывают многие факторы, в том числе свойства среды передачи (которые изменчивы по своему характеру и являются трудно определяемыми), характеристики приемника и, для слухового приема, различающая способность человеческого уха;

д) что при частотном или территориальном разнесе между радиосредствами возможны компромиссы,

рекомендует,

1 чтобы для расчета частотно/территориального разнеса между радиосредствами применялся следующий метод:

- 1.1** определение мощности и спектрального распределения сигнала, принимаемого приемником;
- 1.2** определение мощности и спектрального распределения мешающих сигналов и шума, принимаемых приемником;
- 1.3** определение эффекта взаимодействия полезных сигналов, помехи и характеристик приемника при различных частотных или пространственных разнесениях с помощью основных формул из Приложения 1 и, при необходимости, простых аппроксимаций интегральных уравнений и методики, описанной в Приложении 2;
- 1.4** определение по этим данным степени частотного или территориального разнеса, обеспечивающего требуемое качество и надежность связи. При этом следует принимать во внимание флуктуационную природу как сигнала, так и помехи и, когда это уместно, избирательные способности слушателя или зрителя;

1.5 определение подходящей для использования модели распространения МСЭ-R;

2 чтобы на каждом этапе расчетов, по возможности, производилось сравнение с данными, полученными при характерных контролируемых рабочих условиях, особенно относительно окончательной величины необходимого частотного или территориального разнеса между радиосредствами.

Приложение 1

Основные формулы

В данном Приложении приводятся основные формулы для оценки эффекта взаимодействия полезных сигналов, помех и характеристик приемника для разных частот и частотно/территориальных разнесов. Такими оценками могут быть:

- частотно зависимое подавление (FDR), которое является мерой ослабления спектра излучения мешающего передатчика за счет кривой избирательности приемника;
- характеристика частота/расстояние (FD), которая является мерой минимальной величины территориального разнеса между подверженным помехе приемником и источником помех как функция разности их частот настройки;
- относительное защитное отношение по радиочастоте A (см. Рекомендацию МСЭ-R BS.560), которое является разностью, выраженной в децибелах, между защитным отношением, когда несущие полезного и мешающего передатчика отличаются на Δf , и защитным отношением при равенстве частот обоих передатчиков.

Характеристика частота/расстояние и частотно зависимое подавление позволяют оценить влияние механизма связи между источником помех и приемником и являются в большинстве случаев основными решениями для многих ситуаций помех. Обращение к этим характеристикам облегчает решение проблем совместного использования частоты в совмещенном канале и помех в соседней полосе или канале путем оценки критериев минимального частотного и территориального разнеса между приемником и источником помехи, при которых обеспечивается приемлемое качество работы приемника.

Уровень помехи в приемнике является функцией усиления и ослаблений, которым подвергается мешающий сигнал на пути от источника помехи до приемника, и может быть представлен формулой:

$$I = P_t + G_t + G_r - L_b(d) - FDR(\Delta f) \quad \text{дБВт}, \quad (1)$$

где:

- P_t : мощность мешающего передатчика (дБ);
- G_t : коэффициент усиления антенны источника помехи в направлении приемника (дБи);
- G_r : коэффициент усиления антенны приемника в направлении источника помехи (дБи);
- $L_b(d)$: основные потери передачи на расстоянии разнесения d между источником помехи и приемником (дБ) (см. Рекомендацию МСЭ-R P.341);

и

$$FDR(\Delta f) = 10 \log_{\infty} \frac{\int_0^{\infty} P(f) df}{\int_0^{\infty} P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df} \quad \text{дБ}, \quad (2)$$

где:

$P(f)$: эквивалентная спектральная плотность мощности мешающего сигнала на промежуточной частоте (IF);

$H(f)$: избирательность приемника;

$$\Delta f = f_i - f_r,$$

где:

f_i : частота настройки источника помехи;

f_r : частота настройки приемника.

Частотно зависимое подавление (FDR) может быть представлено как сумма двух членов – подавление на частоте настройки (OTR) и подавление вне частоты настройки (OFR), которая является дополнительным подавлением из-за расстройки между источником помехи и приемником.

$$FDR(\Delta f) = OTR + OFR(\Delta f) \quad \text{дБ}, \quad (3)$$

где:

$$OTR = 10 \log_{\infty} \frac{\int_0^{\infty} P(f) df}{\int_0^{\infty} P(f) |H(f)|^2 df} \quad \text{дБ}, \quad (4)$$

$$OFR(\Delta f) = 10 \log_{\infty} \frac{\int_0^{\infty} P(f) |H(f)|^2 df}{\int_0^{\infty} P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df} \quad \text{дБ}. \quad (5)$$

Подавление на частоте настройки также называют корректирующим коэффициентом, который часто можно аппроксимировать следующим образом:

$$OTR \approx K \log \left(\frac{B_T}{B_R} \right) \quad B_R \leq B_T, \quad (6)$$

где:

B_R : полоса пропускания приемника на уровне 3 дБ (Гц);

B_T : полоса пропускания мешающего передатчика на уровне 3 дБ (Гц);

$K = 20$ для некогерентных сигналов;

$= 20$ для импульсных сигналов.

Приложение 2

Методика определения частотно/территориального разноса для радиосистем

1 Введение

Общеизвестно, что соблюдение правил частотно/территориального разноса (ЧТР) составляет важную часть процесса управления частотами для большей части радиосистем. В службах, построенных на принципах передачи по каналам, эти правила имеют следующий вид: передатчик, работающий в том же частотном канале, должен находиться на расстоянии не менее d_0 (км); передатчик, работающий в соседнем канале, должен находиться на расстоянии не менее d_1 (км); передатчик, работающий через один канал, должен находиться на расстоянии не менее d_2 (км) и т. д. от приемника, который может испытывать от них помеху. В настоящее время хорошо известны правила ЧТР для старых методов передачи. Однако с появлением новых методов передачи встает вопрос: какие правила ЧТР должны применять специалисты по управлению частотами в тех случаях, когда одну и ту же полосу частот занимают старые и новые системы? Ниже представлена методика, которая необходима для определения правил ЧТР как между одинаковыми, так и между совершенно различными системами.

2 Методика

Разработка новых правил ЧТР требует расчета уровня помехи на входе приемника, испытывающего помеху, а также определения критериев приемлемости помех.

2.1 Расчет помех

Этот расчет зависит от двух факторов: спектрального фактора и пространственного фактора.

Спектральный фактор зависит от спектральных характеристик мешающего передатчика и частотных характеристик приемника, испытывающего помеху. Для целей расчетов необходимо иметь точные сведения относительно спектральной плотности мощности мешающего сигнала, которая зависит от таких факторов, как используемый метод модуляции и ширина полосы информационного сигнала для аналоговых систем и скорость передачи данных в случае цифровых систем.

Что же касается приемника, испытывающего помеху, то необходимо знать эквивалентную частотную характеристику приемника по ПЧ. В качестве основы для моделирования частотной характеристики приемника по ПЧ могут использоваться предоставляемые изготовителем характеристики полосы пропускания блока ПЧ по уровню 6 дБ и 40 дБ.

Спектральный фактор представляется в виде коэффициента подавления сигналов вне полосы канала $OCR(\Delta f)$, который определяется следующей формулой:

$$OCR(\Delta f) = -10 \log \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) df} \quad \text{дБ}, \quad (7)$$

где:

$P(f)$: спектральная плотность мешающего сигнала (Вт/Гц);

$H(f)$: эквивалентная частотная характеристика приемника, испытывающего помеху, по ПЧ;

Δf : разнос частот между мешающим передатчиком и приемником, испытывающим помеху.

Следует отметить, что формула (7) не отличается от формулы (2), несмотря на то что нижние пределы интегрирования разные.

Из формулы (7) очевидно, что $OCR(\Delta f)$ сильно зависит от степени перекрытия между полосой пропускания приемника и спектром мощности мешающего сигнала. По мере увеличения Δf степень такого перекрытия уменьшается, что приводит к уменьшению мощности помехи или, соответственно, к более высоким величинам $OCR(\Delta f)$.

Пространственный фактор данной методики связан с расчетом зависящего от расстояния затухания сигнала; это тесно связано с используемой моделью распространения радиоволн и со статистическим распределением мешающего сигнала на входе приемника, испытывающего помеху. Следует пользоваться соответствующей моделью распространения, рекомендованной МСЭ-R.

Используемая при данной процедуре модель распространения зависит, естественно, от построения системы, а также от используемого диапазона частот, от географических условий в пределах зоны обслуживания и ширины полосы системы.

2.2 Критерии помех

Обычно это представляет собой простое соотношение, на основании которого можно судить, является ли данная помеха вредной или допустимой. В идеале такой критерий должен быть связан с таким уровнем ухудшения качественных характеристик работы приемника, подверженного помехам, который считается терпимым. Это соображение, однако, практически трудно выполнимо, по крайней мере с той точки зрения, что имеется большое количество разнообразных систем и методов передач, которые не способны реагировать на помехи одним и тем же образом. В связи с этим здесь выбран более общий критерий помех, базирующийся на понятии защитного отношения α (дБ). Считается, что помеха имеет допустимый уровень, если она удовлетворяет следующему условию:

$$P_d - P_i \geq \alpha, \quad (8)$$

где:

- P_d : уровень полезного сигнала (дБВт);
- P_i : уровень мешающего сигнала (дБВт);
- α : защитное отношение (дБ).

2.3 Процедура

Процедура определения правил ЧТР теперь может быть обобщена следующим образом:

Шаг 1: Определение уровня полезного сигнала P_d (дБВт) на входе приемника, испытывающего помеху.

Шаг 2: Расчет результирующего уровня помехи на входе приемника, испытывающего помеху, по формуле:

$$P_i = P_t + G_r - L_p - OCR(\Delta f), \quad (9)$$

где:

- P_t : эквивалентная изотропно излучаемая мощность (э.и.и.м.) мешающего передатчика (дБВт);
- G_r : усиление приемной антенны по отношению к изотропной (дБи);
- L_p : потери на трассе распространения;
- $OCR(\Delta f)$: коэффициент подавления сигналов вне полосы пропускания приемника при разносе частот Δf , в соответствии с формулой (7).

Величины OCR в данном исследовании берутся как заданные. Целью данной Рекомендации является представление методики, а не способов вычисления величин OCR .

Шаг 3: Используйте величины P_d и P_i , полученные согласно шагам 1 и 2, в формуле (8) для определения или вычисления взаимосвязи между Δf и расстоянием разноса d , при которых помеха считается допустимой.

2.4 Альтернативная процедура

В реальных условиях. Принимаемый сигнал в подверженном помехе приемнике испытывает замирание в тени, которое представлено логарифмически нормальным распределением. Чтобы компенсировать этот эффект замирания, уровень принимаемого сигнала должен быть выше уровня чувствительности. Альтернативная процедура определения необходимого разноса между подверженным помехе приемником и источником помех, отражающая эффект затенения, представлена следующим образом:

Шаг 1: Рассчитать необходимый разнос, для того чтобы источник помех не смог причинять радиопомехи приемнику, испытывающему помехи, прибегнув к следующей формуле:

$$L_I = P_t + G_r - (P_{min} - \alpha) - OCR(\Delta f) - 10 \log(10^{N/10} - 1), \quad (10)$$

где:

- L_I : необходимый разнос между источником помех и подверженным помехе приемником, для того чтобы обеспечить допустимую помеху (дБ);
- P_t : эквивалентная изотропно излучаемая мощность (э.и.и.м.) мешающего передатчика (дБВт);
- G_r : усиление приемной антенны по отношению к изотропной (дБи);
- P_{min} : минимальный уровень полезного сигнала (дБВт);
- α : защитное отношение (дБ);
- $OCR(\Delta f)$: коэффициент подавления сигналов вне полосы пропускания приемника при разносе частот Δf , в соответствии с формулой (7);
- N : логарифмически нормальный запас на замирание (дБ).

Шаг 2: Применение надлежащей модели распространения МСЭ-R к уравнению (10) дает частотный разнос Δf и территориальный разнос d , при котором помеха может быть допустимой.

3 Применение методики к системам сухопутной подвижной службы

Для демонстрации описанной выше методики в качестве примера возьмем две различные системы сухопутной подвижной службы (СПС), характеристики которых представлены в данном разделе. Допустим, что эти две системы используют аналоговую или цифровую модуляцию при методах доступа МДВР или МДЧР. Дальнейшие расчеты будут базироваться на формах излучаемого спектра и на определенных требованиях в отношении избирательности приемника, при этом полученные результаты оказываются не зависящими от какого-либо конкретного метода модуляции, который может использоваться в любой из этих двух систем. В данном примере предполагается, что частотная характеристика приемника имеет такой же характер, что и форма спектра излучения. Это предположение, по-видимому, должно быть справедливым для цифровых систем.

Предполагаемые характеристики обеих систем представлены в таблицах 1 и 2:

ТАБЛИЦА 1

Параметры, использованные в примере

Минимальный уровень полезного сигнала, P_{min}	-145 дБВт
Необходимое защитное отношение, α	18 дБ
Высота антенны базовой станции, h_b	75 м
Рабочая частота, f	450 МГц
э.и.и.м. базовой станции	20 дБВт
Усиление приемной антенны базовой станции	0 дБи
Эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость, ϵ	30
Эквивалентная проводимость, σ	10^{-2} С/м

В системах СПС возможны четыре случая помех: базовая-базовая, базовая-подвижная, подвижная-базовая и подвижная-подвижная станции. В симплексных системах, в которых базовые и подвижные станции передают на одной и той же частоте, все четыре случая помех имеют место. С другой стороны, в дуплексных системах подвижные и базовые станции передают на разных частотах, и следовательно, необходимо рассматривать только случаи помех базовая-подвижная станции и подвижная-базовая станции. При определении необходимого расстояния разнеса следует рассматривать только наихудший случай, т. е. случай помех, который требует наибольшего расстояния разнеса между системами. В большинстве случаев можно предполагать, что базовые станции работают практически 100% времени и случай помех базовая-базовая станции является определяющим, требующим наибольшего расстояния разнеса. По этой причине здесь не рассматриваются остальные случаи помех.

Далее переходим к описанию моделей распространения радиоволн в системах СПС, которое сопровождается представлением численных результатов для сочетаний каждой из двух рассматриваемых систем.

3.1 Помехи для случая: базовая-базовая станции

Для рассмотрения случая помех базовая-базовая станции выбрана дифракционная модель распространения (см. Рекомендацию МСЭ-R P.526). Для этой модели потери на трассе распространения представляются в виде:

$$L_{P_{bb}} = L_{FS} - L_{DIF/FS}, \quad (11)$$

где:

- L_{FS} : потери на трассе распространения в условиях свободного пространства (дБ);
- $L_{DIF/FS}$: дифракционные потери относительно потерь в свободном пространстве (дБ), определяемые по следующей формуле:

$$L_{DIF/FS} = 20 \log \left(\frac{E_{DIF}}{E_{FS}} \right) = F(X) + G(Y1) + G(Y2), \quad (12)$$

где:

- $F(X)$: величина усиления, зависящая от относительного расстояния между базовыми станциями;
- $G(Y1), G(Y2)$: величина усиления, зависящая от относительных высот антенн базовых станций;
- X : относительное расстояние между антеннами базовых станций;

Y_1, Y_2 : относительные высоты антенн, определяемые следующим образом:

$$X = 2,2\beta f^{1/3} a_e^{-2/3} d, \quad (13)$$

$$Y = 9,6 \times 10^{-3} \beta f^{2/3} a_e^{-1/3} h_{1,2}, \quad (14)$$

где:

$$\beta = \frac{1 + 1,6 K^2 + 0,75 K^4}{1 + 4,5 K^2 + 1,35 K^4}, \quad (15)$$

K : полная проводимость земной поверхности для вертикальной поляризации:

$$K = 0,36(a_e f)^{-1/3} [(\epsilon = 1)^2 + (18\,000 \sigma / f)^2]^{-1/4} [\epsilon^2 + (18\,000 \sigma / f)^2]^{1/2}, \quad (16)$$

где:

ϵ : эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость земной поверхности;

σ : эквивалентная проводимость земной поверхности (С/м);

a_e : эквивалентный радиус Земли, равный 4/3 от 6371 км;

d : расстояние между передатчиком и приемником (км);

f : частота передачи;

h_1 и h_2 : относительные высоты антенн передатчика и приемника, соответственно (м).

$$F(X) = 11 + 10 \log(X) - 17,6X. \quad (17)$$

$$G(Y) \cong 17,6(Y - 1,1)^{1/2} - 5 \log(Y - 1,1) - 8 \quad \text{при} \quad Y > 2 \quad (18)$$

$$G(Y) \cong 20 \log(Y + 0,1Y^3) \quad \text{при} \quad 10K < Y < 2 \quad (19)$$

$$G(Y) \cong 2 + 20 \log K + 9 \log(Y/K)[\log(Y/K) + 1] \quad \text{при} \quad K/10 < Y < 10K \quad (20)$$

$$G(Y) \cong 2 + 20 \log K \quad \text{при} \quad Y < K < 10, \quad (21)$$

где K – относительная полная проводимость земной поверхности.

3.2 Численные результаты

3.2.1 Спектральные аспекты

Формула (7) используется для расчета подавления сигналов вне полосы пропускания приемника $OCR(\Delta f)$ в зависимости от Δf . В данном примере рассматриваются два случая:

Случай 1: Система с разносом каналов в 25 кГц создает помеху системе с разносом каналов в 12,5 кГц.

Случай 2: Система с разносом каналов в 12,5 кГц создает помеху системе с разносом каналов в 25 кГц.

Предполагаемые численные значения для этих двух случаев представлены в таблице 2, в которой $OCR(\Delta f)$ представлена как функция частотного разнеса Δf (кГц).

ТАБЛИЦА 2

Результаты расчета OCR (дБ) для помех между двумя различными системами

Δf (кГц)	Случай 1: OCR(Δf) (дБ)	Случай 2: OCR(Δf) (дБ)
0	$\cong 0$	$\cong 0$
12,5	26,4	29
25	57,7	58,8
37,5	57,7	59

3.2.2 Пространственные аспекты

Используя параметры, представленные в таблицах 1 и 2, и предполагая логарифмически нормальное распределение мощности принимаемого полезного сигнала, а также задавшись величиной в 17 дБ для учета меняющихся условий в зависимости от конкретного расположения, при условии 90% покрытия для сухопутной подвижной системы связи, получаем радиус зоны обслуживания, равный 32 км. Соответствующий уровень принимаемого полезного сигнала при этом составит:

$$P_d = P_{min} + L_{VF} = -128 \text{ дБВт.}$$

Следовательно приемлемый уровень помехи составит: $P_d - \alpha = -146 \text{ дБВт.}$

На основе процедуры, представленной в данном документе, для двух рассматриваемых в данном примере случаев было рассчитано необходимое расстояние разноса, D , между двумя базовыми станциями. Результаты расчета представлены в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3

Необходимое расстояние разноса, D (км),
в зависимости от частотного разноса, Δf (кГц)

Δf (кГц)	Случай 1 и Случай 2: D (км)
0	107,5
12,5	72,5
25	33
37,5	33

3.2.3 Аспекты разноса, зависящие от запаса на замирание

Используя параметры, приведенные в таблицах 1 и 2, а также альтернативную процедуру, представленную в пункте 2.4, получаем необходимый разнос L_I в виде логарифмически нормального запаса на замирание в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4

Необходимый разнос, L_I (дБ), зависящий от логарифмически нормального запаса на замирание, N (дБ)

Δf (кГц)	Случай 1		Случай 2	
	$N = 3$	$N = 10$	$N = 3$	$N = 10$
0	183,02	173,46	183,02	173,46
12,5	156,62	147,06	154,02	144,46
25	125,32	115,76	124,22	114,66
37,5	125,32	115,76	124,02	114,46

Следует иметь в виду, что чем больше значение N , тем меньше требуется разнос.

4 Правила учета интермодуляционных помех для ЧТР

В дополнение к помехам в том же канале и от соседних каналов системы сухопутной подвижной связи испытывают также помехи за счет интермодуляции из-за возникновения различных продуктов интермодуляции. В случае возникновения в приемнике продуктов интермодуляции третьего порядка за счет взаимодействия двух сигналов, поскольку в образовании продуктов интермодуляции участвуют две передающие базовые станции, минимальные приемлемые расстояния их от приемника, испытывающего помеху, взаимозависимы.

Предполагая, что усиление приемной антенны равно суммарным потерям в приемнике, что средняя величина уровня минимального принимаемого полезного сигнала для получения отношения сигнал/помеха в 12 дБ с учетом шумов и искажений (SINAD) при наличии шумов составляет –145 дБВт, что используется величина потерь при распространении в свободном пространстве и что все передатчики имеют одинаковую величину э.и.м., равную 20 дБВт, могут быть установлены формулы для прогнозирования уровней помех в приемнике, испытывающем помеху, для полосы частот 410–470 МГц. Для рассматриваемой модели:

$$P = 2P_N + P_F - 0,57 - 60 \log(\delta f), \quad (22)$$

где:

- P : результирующий уровень помехи в приемнике, испытывающем помеху (дБВт);
- P_N : мощность сигнала (дБВт), принимаемого от передатчика самого близкого по частоте по отношению к приемнику, испытывающему помеху;
- P_F : мощность сигнала (дБВт), принимаемого от передатчика самого удаленного по частоте по отношению к приемнику, испытывающему помеху;
- δf : разность между частотами самого близкого и самого удаленного по частоте передатчиков (МГц).

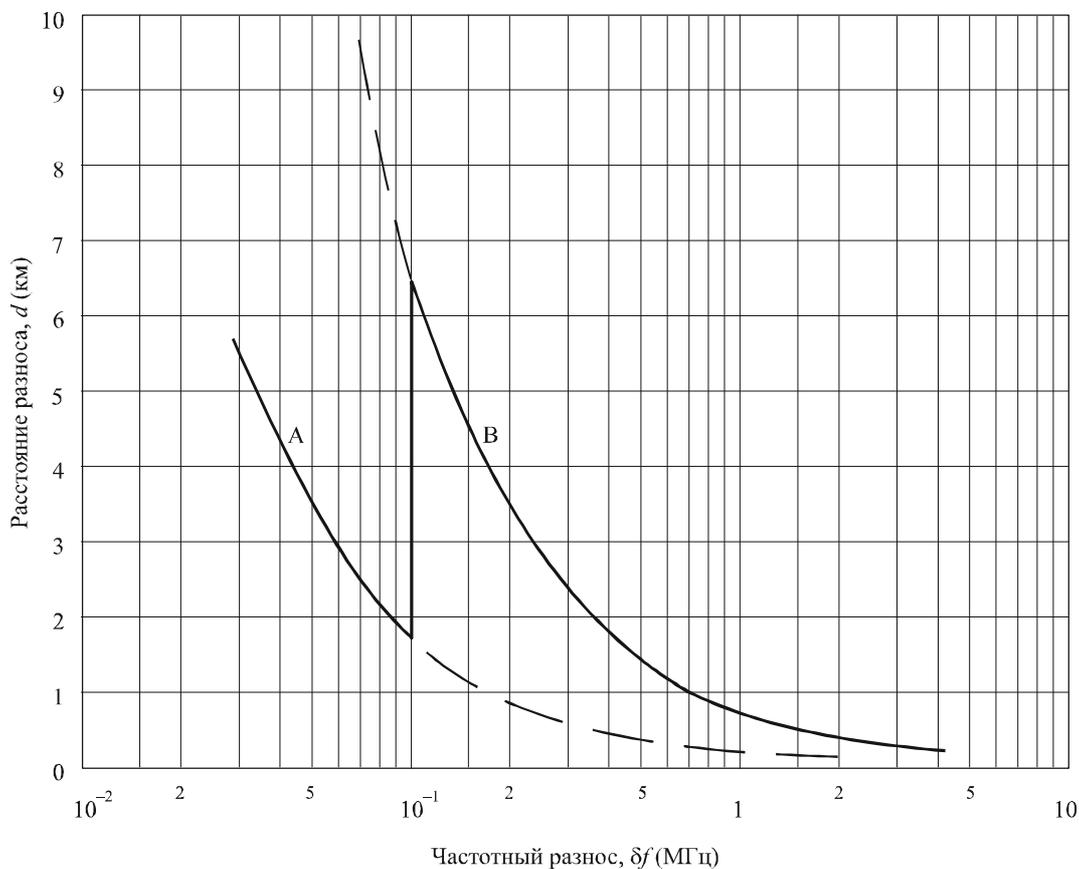
Если несущая частота равна 460 МГц, то продукты интермодуляции третьего порядка при взаимодействии двух сигналов появятся при условии:

$$d \cdot \delta f \leq 0,17, \quad (23)$$

где d – расстояние от существующей станции до планируемой станции. Предполагается, что защитный запас между уровнем мощности помехи и минимальным уровнем мощности полезного сигнала составляет 6 дБ. Полезная информация имеется в Рекомендации МСЭ-R SM.1134. Поскольку приемник планируемой станции может оказаться в роли испытывающего помеху за счет интермодуляционных продуктов от ближнего или более удаленного по частоте передатчика, то при определении ЧТР необходимо пользоваться кривой В совместно с кривой А, изображенными на рис. 1. Область выше кривой соответствует условиям приемлемости помехи, а область ниже кривой соответствует условиям возможности возникновения помехи.

РИСУНОК 1

Кривые для анализа ЧТР в условиях интермодуляционных помех третьего порядка, возникающих при взаимодействии в приемнике двух сигналов



————— Кривая для определения влияния интермодуляции
 Кривые A: d в зависимости от δf
 B: $2d$ в зависимости от $2\delta f$

0337-01

5 Выводы

Для того чтобы присвоить какую-либо частоту планируемой новой станции, прежде всего необходимо оценить помехи в том же и от соседнего каналов, используя соответствующую методику ЧТР. Если соответствующие условия ЧТР удовлетворяются, то необходимо на основе методики учета при ЧТР влияния интермодуляционных помех произвести анализ таких помех, которые могут возникнуть между существующей и планируемой станциями. Если окажется, что результаты этого анализа свидетельствуют о несоблюдении условий ЧТР, то необходимо произвести более подробный анализ. Следует отметить, что методики анализа, представленные в данной Рекомендации, не учитывают помех природного происхождения или вызванных деятельностью человека.