

Оглавление

1. Прогнозирование ЭМС радиосистем	4
1.1. Анализ параметров источников полезного и мешающего сигналов	4
1.2. Потери энергии на трассе распространения радиоволн	10
1.3. Характеристики рецептора	19
2. ЭМС сотовых систем связи	26
2.1. Исходные данные для расчета	26
2.2. Анализ параметров источников полезного и мешающего сигналов	27
2.3. Потери энергии на трассе распространения радиоволн	29
2.4. Характеристики рецептора	32
2.5. Оценка условий обеспечения ЭМС	35
3. Прогнозирования ЭМС РРЛ и РЛС	38
3.1. Исходные данные для прогнозирования ЭМС	38
3.2. Анализ параметров источников полезного и мешающего сигналов	39
3.3. Потери энергии на трассе распространения радиоволн	41
3.4. Характеристики рецептора	42
3.5. Оценка условий обеспечения ЭМС	44
4. Задание на курсовую работу	45
4.1. Анализ ЭМС РРЛ и РЛС	45
4.2. Анализ ЭМС сотовых сетей связи	47

1. Прогнозирование ЭМС радиосистем

При прогнозировании ЭМС выделяются три основных составляющих расчета.

- Анализ параметров источников полезного и мешающего сигналов.
- Анализ потерь энергии на трассе распространения радиоволн.
- Анализ параметров рецепторов полезного сигнала при одновременном воздействии полезного и мешающего сигналов.

1.1. Анализ параметров источников полезного и мешающего сигналов

Расчетные параметры источников полезного и мешающего сигналов включают в себя:

- мощность передатчиков;
- уменьшение мощности НЭМП на гармониках мешающего сигнала;
- потери в фидерах;
- усиление антенны;
- уменьшение усиления источника НЭМП для частот, лежащих вне рабочей полосы;
- уменьшение усиления антенны передатчика – источника НЭМП в направлении рецептора.

Рассмотрим методы расчета этих параметров.

1. Мощность передатчиков.

Номинальные мощности передатчиков полезного и передающего сигналов определяются тактико-техническими характеристиками соответствующих радиосистем. В расчетах они задаются в дБ относительно одного мВт. При этом используется обозначение дБм.

$$P=10\lg(P[\text{Вт}] \cdot 1000), \text{ дБм}$$

2. Уменьшение уровня мощности мешающего сигнала на гармониках.

В полосу частот приемника могут попадать не только основная частота, но и гармоники передатчика мешающего сигнала. При этом уровень мощности гармонических составляющих уменьшается и зависит от мощности гармоники. Для расчета уменьшения уровня мощности можно воспользоваться таблицей 1.1.

3. Потери в фидерах.

Для передатчиков и приемников потери в фидерах должны быть оценены для соответствующих частотных диапазонов. Фидеры выполняются в виде коаксиальных линий передач, либо волноводных. При использовании стандартных кабелей (радиочастотные кабели) их удельные параметры

ослабления приводятся в справочниках и ГОСТах. В случае применения специальных фидерных линий (волноводов и др.) необходимые параметры получают путем измерений или из сопроводительной научно-технической документации.

Суммарные потери в фидерах рассчитываются по соотношению:

$$\text{потери} = \text{длина} \cdot \text{коэффициент затухания},$$

Где длину фидера принимают равной высоте установки антенны передатчиков и приемника.

Значение затухания для прямоугольных волноводов можно взять из обобщенных данных, приведенных ниже:

Частота, ГГц	1	2	3	4	5	6
Затухание, дБ/м	0.03	0.035	0.046	0.06	0.066	0.07

Табл. 1.1. Уровень мощности излучения гармонических составляющих (в дБ относительно основной частоты).

Номер гармоники	Для всех частот передатчика	Для передатчиков, работающих на частотах, МГц		
		<30	30 – 300	>300
2	-51	-41	-54	-55
3	-64	-53	-68	-64
4	-62	-62	-78	-70
5	-69	-69	-86	-75
6	-85	-74	-92	-79
7	-90	-79	-97	-82
8	-94	-83	-102	-85
9	-97	-87	-106	-88
10	-100	-90	-110	-90

4. Усиление антенны определяется ее конструкцией и характеризуется коэффициентом усиления антенне G , который зависит от коэффициента направленного действия D (КНД). Чем уже диаграмма направленности, тем больше коэффициент усиления антенны. Например, при увеличении коэффициента направленного действия с 30 до 46, диаграмма направленности сужается с $3 \dots 4^\circ$ до $0,8 \dots 1^\circ$. В диапазоне СВЧ приближенно можно считать $G=D$.

Лучше использовать данные по КНД антенны и ее диаграмме направленности, приведенные в соответствующей нормативно-технической документации. Если такие данные отсутствуют, то их расчет можно провести по различным методикам (в зависимости от типа антенны: рупорные антенны, зеркальные антенны, линзовые антенны, диэлектрические стержневые антенны, антенны поверхностных волн, антенны вытекающей волны, спиральные антенны, антенные решетки), описанным в специальной литературе. Далее приведены формулы для приближенного расчета рупорных и зеркальных антенн.

Рупорные антенны

Рупорная антенна образуется в результате расширения прямоугольного или круглого волновода. При расширении только в одной плоскости образуется Н- или Е-секториальный рупор. При расширении волновода в обеих плоскостях образуется пирамидальный рупор. При расширении круглого волновода получается конический рупор.

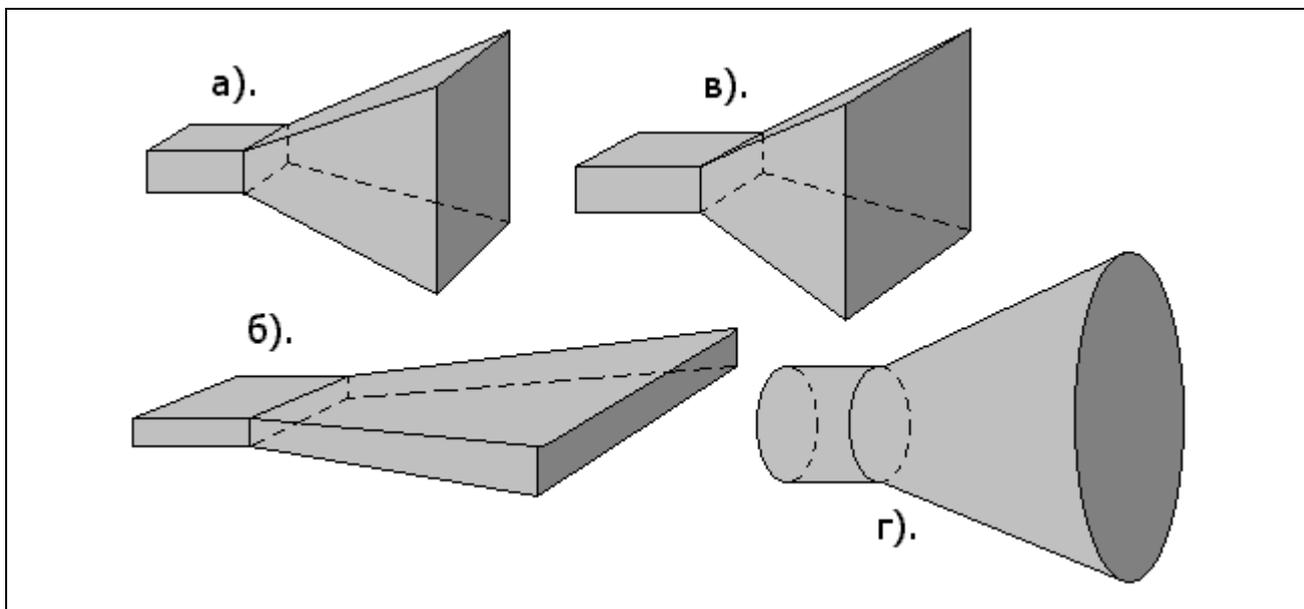


Рис. 1.1. Типы рупорных антенн:
а) Е-секториальный, б) Н-секториальный, в) пирамидальный, г) конический.

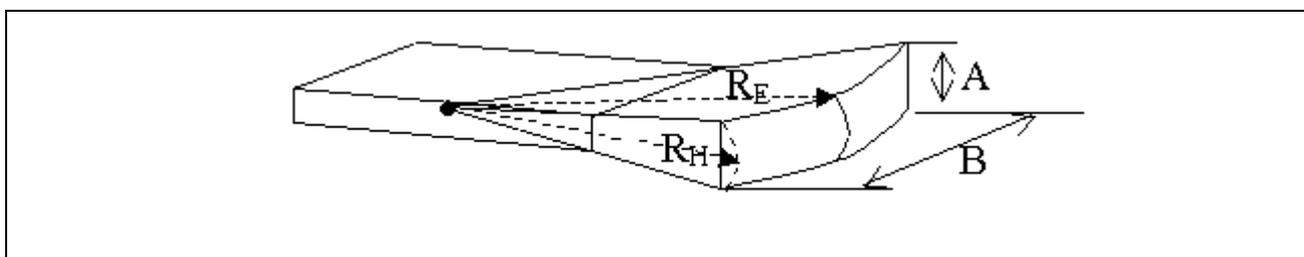


Рис. 1.2. Пирамидальная рупорная антенна.

Где A – ширина раскрыва в плоскости Н, B – ширина раскрыва в плоскости Е, R_E и R_H - длины рупора.

Для такой антенны КНД в упрощенном виде рассчитывается по формуле:

$$D_{\text{РУПОРНОЙ А.}} = 4\pi\nu S/\lambda^2, \quad [\text{отн. ед.}].$$

Где $S = A \cdot B$ - площадь раскрыва рупора;

λ - длина волны основного излучения;

$\nu = 0,4 \dots 0,8$ – коэффициент использования поверхности (КИП).

В зависимости от типа рупора, рупорные антенны делятся на Н- и Е-секториальные, пирамидальные и конические. Рупоры, размеры которых соответствуют максимальному значению КНД называются оптимальными. Для оптимальных Н-секториальных рупорных антенн длина рупора $R_H=A^2/3\lambda$, для оптимальных Е-секториальных рупорных антенн $R_E=B^2/2\lambda$. КИП оптимального Н- и Е-секториального, пирамидального рупоров равен 0,64. Если условно увеличить длину рупора до бесконечности, то КИП антенны увеличится до 0,81.

В коническом рупоре, оптимальная длина $R_{\text{опт. кон.}}$ зависит от диаметра его раскрыва d :

$$R_{\text{опт. кон.}} = d^2/2,4\lambda + 0,15\lambda.$$

КИП оптимального конического рупора $\nu=0,5$.

Табл. 1.2. Ширина диаграммы направленности рупора с оптимальной длиной.

Тип рупора	Ширина диаграммы направленности в плоскости Н	Ширина диаграммы направленности в плоскости Е
Е-секториальный	$2\Theta_{0,7}=68\lambda/A$	$2\Theta_{0,7}=53\lambda/B$
Н-секториальный	$2\Theta_{0,7}=80\lambda/A$	$2\Theta_{0,7}=51\lambda/B$
Пирамидальный	$2\Theta_{0,7}=80\lambda/A$	$2\Theta_{0,7}=53\lambda/B$
Конический	$2\Theta_{0,7}=60\lambda/d$	$2\Theta_{0,7}=70\lambda/d$

Если взять эллиптический рупор, с соотношением осей эллипса 1,25, то можно получить приблизительно одинаковую ширину диаграммы направленности, во всех сечениях, проходящих через ось рупора.

Достоинством рупорной антенны является ее широкополосность, определяемая широкополосностью питающего волновода, к.п.д. рупорной антенны равен единице.

Недостаток рупорных антенн заключается в необходимости выбора слишком большой длины рупора для получения остронаправленного излучения. Оптимальная длина рупора пропорциональна квадрату размеров раскрыва A или B , а ширина диаграммы направленности обратно пропорциональна A или B в первой степени. Поэтому для сужения диаграммы направленности рупорной антенны в N раз, ширина раскрыва должна быть увеличена в N раз, а длина рупора – в N^2 раз. Это обстоятельство накладывает ограничения на ширину диаграммы направленности рупорных антенн.

Зеркальные параболические антенны

Определяющими параметрами для зеркальной параболической антенны являются длина волны основного излучения, диаметр зеркала $2R_0$ и фокусное расстояние f . Остальные параметры определяются через них. Коэффициент усиления G зеркальных параболических антенн определяется по формуле:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_a g e^{-\sigma^2}, \text{ [отн. ед.]}$$

Где $g = \eta \nu$ – эффективность зеркальной антенны.

η - КПД антенны;

ν - КИП антенны. КИП обычно записывают в виде произведения парциальных КИП $\nu = \nu_1 \nu_2 \nu_3 \nu_4 \nu_5$, каждый из которых учитывает отдельную причину снижения КУ антенны:

ν_1 -учитывает амплитудную неравномерность поля в апертуре и ту долю мощности облучателя, которая падает на зеркало;

ν_2 -затенение отраженного от зеркала поля облучателем и конструктивными элементами его крепления;

ν_3 -поляризационные потери мощности;

ν_4 -ответвление токов на теневую поверхность зеркала, приводящее к росту «дальних» боковых лепестков;

ν_5 -различные фазовые ошибки поля в апертуре антенны;

Максимальная эффективность может достигать 0,84, но на практике, из-за затенения облучателем и системой крепления, кроссполяризационных потерь и ряда других эффектов происходит уменьшение эффективности до значений $g = 0,4 \dots 0,6$;

$\sigma = 23,5 \times 10^{-2n} (2R_0/\lambda)$ - дисперсия фазовой ошибки в раскрыве зеркала;

$S_a = \pi R_0^2$ – площадь раскрыва антенны;

n - характеризует технологическую точность изготовления антенны, равен 3 для обычного серийного производства, и 4...5 для специальной более точной технологии;

R_0 – радиус раскрыва рефлектора;

λ - длина волны основного излучения.

С увеличением R_0 растет коэффициент усиления антенны G , но при достижении некоторого значения $R_{0\max}$, G – практически не меняется. Величина $R_{0\max}$ – зависит от уровня технологии и определяется как:

$$R_{0\max} = 0,2\lambda 10^n.$$

Угол раскрыва антенны определяется как $\Psi_0 = 2 \operatorname{arcctg}(2f/R_0)$.

5. Уменьшение уровня мощности для частот передатчика, лежащих вне рабочей полосы частот – этот пункт определяется параметрами ЭМС оборудования (уровень внеполосного излучения радиопередатчиков).

6. Уменьшение коэффициента усиления антенны передатчика в направлении рецептора определяется в зависимости от ориентации антенны передатчика мешающего сигнала и ее диаграммы направленности. При этом возможны следующие случаи:

1. Точная ориентация максимума диаграммы направленности антенны передатчика на рецептор. Это происходит, в частности, в момент нахождения рецептора точно по направлению максимума диаграммы направленности антенны передатчика.

2. Направление на рецептор составляет некоторый угол φ к направлению максимума диаграммы направленности. В этом случае необходимо оценить уменьшение коэффициента усиления антенны, который является функцией φ .

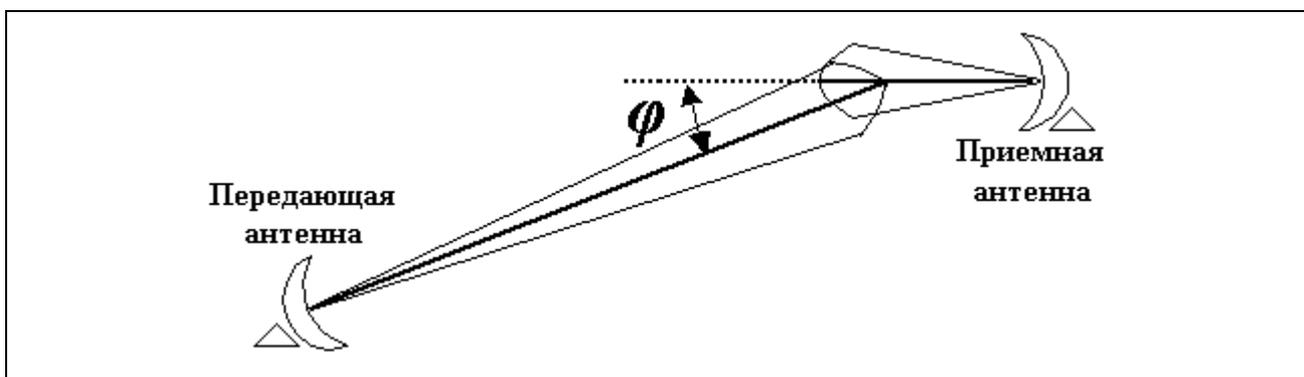


Рис. 1.3. Пример взаимного расположения приемной и передающей антенн.

Пример нормированной диаграммы направленности антенны с параболическим рефлектором $F(\varphi)$ представлен на рисунке 1.4. Определив значение $F(\varphi)$, далее вычисляют уменьшение коэффициента усиления антенны источника помех в направлении рецептора:

$$G(\varphi) = F(\varphi)G_0.$$

Где G_0 – коэффициент усиления антенны вдоль главного направления.

7. Итоговые данные по уровню эффективно передаваемой мощности с помощью расчета параметров передатчиков, полученные результаты удобно свести в таблицу 1.3. Для нахождения результата необходимо сложить все строки таблицы.

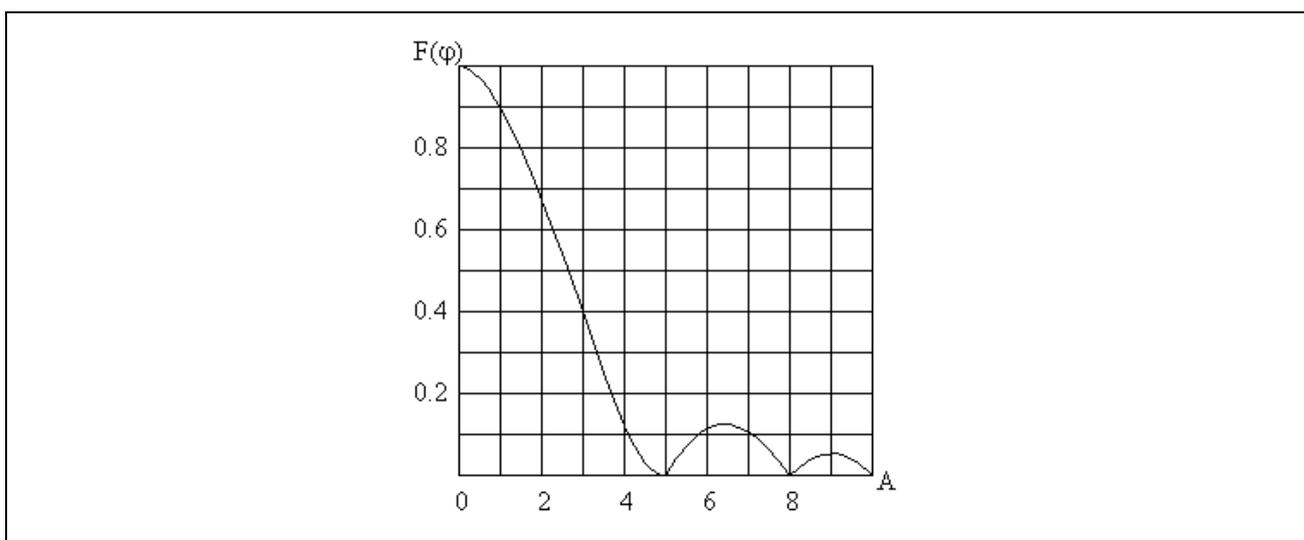


Рис. 1.4. Нормированная диаграмма направленности антенны с параболическим рефлектором.

Табл. 1.3. Расчет уровня эффективной передаваемой мощности.

Параметр	Сигнал		Помеха	
	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ
1. Мощность передатчика				
2. Уменьшение уровня мощности на гармониках				
3. Потери в фидерах				
4. Усиление антенны				
5. Уменьшение уровня мощности вне рабочей полосы частот				
6. Уменьшение коэффициента усиления антенны				
7. Уровень эффективной передаваемой мощности				

1.2. Потери энергии на трассе распространения радиоволн

Потери энергии на трассе распространения радиоволн определяются рядом факторов, важнейшими из которых являются частотный диапазон сигнала, состояние атмосферы, рельеф местности, сторонние источники НЭМП и естественные помехи. Совокупный учет влияния всех факторов весьма затруднен, однако их влияние необходимо оценить на этапе прогнозирования ЭМС:

- Потери на распространение радиоволн в свободном пространстве (медианные потери);
- Дифракционные потери;
- Потери при замирании сигнала (интерференция);
- Потери в атмосферных осадках.

Оценка потерь на трассе распространения с использованием карт местности

8. Медианные потери - потери на распространение радиоволн в свободном пространстве между передатчиком и приемником выражаются соотношением:

$$A_{мед} = 20 \lg(4 \cdot \pi \cdot L \cdot f / c), \text{ дБ};$$

где L – расстояние между приемником и передатчиком, [м];

f – частота полезного или мешающего сигнала, [Гц];

$c = 300\,000\,000$ [м/с] – скорость света.

В системе единиц [км] и [МГц] выражение для вычисления медианных потерь преобразуется к виду:

$$\begin{aligned}
A_{\text{мед.}} &= 20\lg(4 \cdot \pi \cdot L \cdot 1000 \cdot f \cdot 10^6 / (c \cdot 1000)) = \\
&= 20\lg(4 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 10^6 / 300\,000\,000) + 20\lg L + 20\lg f = \\
&= 32,442 + 20\lg L + 20\lg f, \text{ дБ};
\end{aligned}$$

где L – расстояние между приемником и передатчиком, [км];

f – частота полезного или мешающего сигнала, [МГц];

$c = 300\,000$ [км/с] – скорость света.

9. Дифракционные потери – потери на препятствиях на трассе распространения между источником и приемником.

Для расчета дифракционных потерь можно использовать метод, приведенный далее.

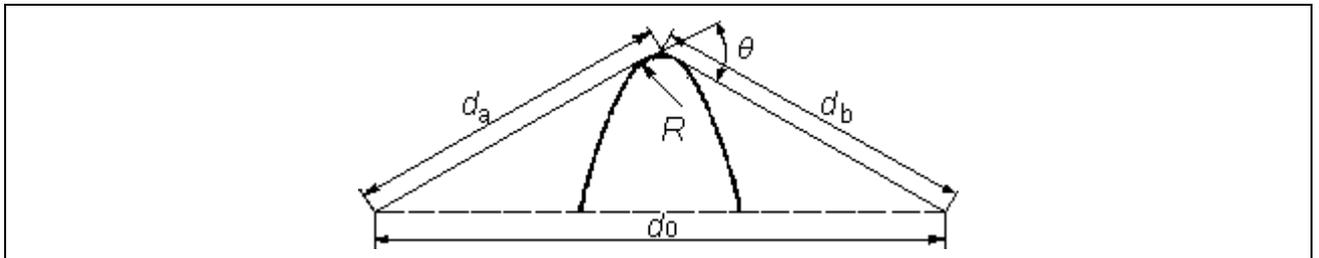


Рис. 1.5. Геометрические параметры препятствия.

При расчете ослабления при дифракции на одном препятствии используется приближенная формула для расчета потерь на препятствии с круглой вершиной. Дифракционные потери A [дБ] (относительно свободного пространства) - определяются через геометрические параметры, показанные на рис. 1.5, и длину волн.

На реальных трассах, проходящих над среднепересеченной и горной местностями, на которых ослабление не слишком велико, углы дифракции обычно меньше 5° , а радиус кривизны каждого препятствия много меньше земного радиуса. Эти условия позволяют записать формулу для определения ослабления на трассе распространения в виде:

$$A = -6,4 - 20 \log \left(\sqrt{\frac{2\theta^2}{x} + 1} + 1,41 \frac{\theta}{\sqrt{x}} \right) - K_H \left(6,6x^{0,75} y^{1,5} + \left\{ \begin{array}{l} 18,3y\theta, \text{ для } \theta \geq 0 \\ 11,7x^{0,25} y^{1,5} \theta, \text{ для } \theta < 0 \end{array} \right\} \right).$$

Где $x = \frac{3 \cdot 10^{-4} d_0}{fd' d''}$, $y = 14,9R^{1/3} f^{1/3}$;

d_0 - длина трассы, км;

d', d'' - расстояния от конечных точек трассы до пересечения касательных к препятствию, км;

f - частота радиоволн, ГГц;

θ - угол дифракции, рад;

R - радиус кривизны вершины препятствия, км;

$$K_H = \exp\left(-0,5\left(\frac{f}{R}\right)^{1/3}\right) - \text{коэффициент неровности вершин реальных}$$

препятствий, учитывающий влияние на затухание отношения длины волны и радиуса кривизны препятствия.

Определение радиуса кривизны вершин реальных препятствий R - предполагает построение кривой минимальной зоны H_0 относительно линии распространения радиоволн до пересечения с кривой рельефа. Длина l , [км], хорды сегмента окружности, аппроксимирующей вершину препятствия, определяется по горизонтали между точками пересечения линии рельефа и кривой H_0 . Радиус окружности R вычисляется по формуле для сегмента окружности: $R=l^2/8\Delta h$. Где Δh – стрелка сегмента, [км].

Задача по расчету дифракции на нескольких препятствиях может быть решена следующим образом:

По профилю местности определяются препятствия и геометрические параметры трассы, показанные на рисунке 1.6.

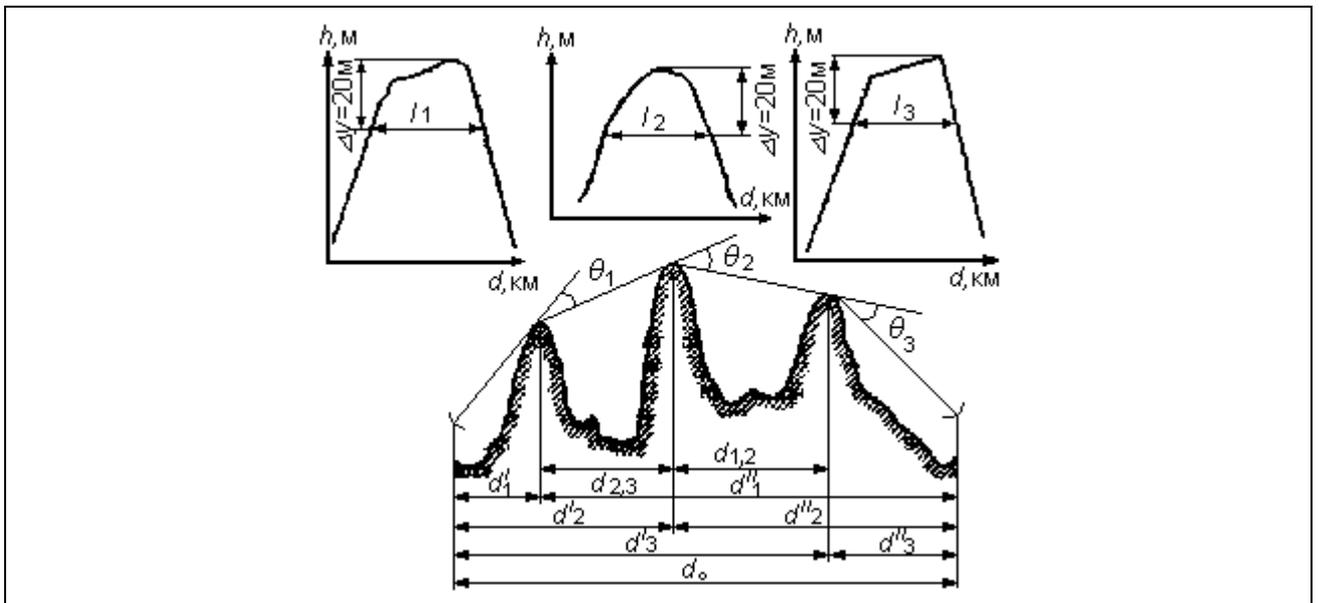


Рис. 1.6. Геометрические параметры трассы с несколькими препятствиями.

Ослабление, вносимое i -м препятствием, при положительном угле дифракции $\theta \geq 0$ - рассчитывается по формуле:

$$A_i = -6,4 - 20 \log \left(\sqrt{\left(\frac{2\theta_i^2}{x_i} + 1 \right)} + 1,41 \frac{\theta_i}{\sqrt{x_i}} \right) - K_{H_i} (6,6x_i^{0,75} y_i^{1,5} + 18,3y_i\theta),$$

$$\text{где } x_i = \frac{3 \cdot 10^{-4} d_0}{f d_i' d_i''}, y_i = 14,9 R_i^{1/3} f^{1/3}, K_{H_i} = \exp \left(-0,5 \left(\frac{f}{R_i} \right)^{1/3} \right).$$

Полное дифракционное ослабление на трассе с несколькими препятствиями A складывается из ослаблений в дБ, на каждом препятствии и вычета выражений, оценивающих взаимное влияние препятствий.

$$A_{\Sigma} = A_1 + A_2 + A_3 + \dots - 0,64 \min(A_1, A_2) \cdot \arctg \left\{ 0,72 \left[\frac{\min(A_1, A_2)_0}{\min(A_1, A_2)} \right]^{1,5} \cdot \frac{(d_1' d_2'')^{0,37}}{d_{1,2}^{0,74}} \right\} -$$

$$- 0,64 \min(A_2, A_3) \cdot \arctg \left\{ 0,72 \left[\frac{\min(A_2, A_3)_0}{\min(A_2, A_3)} \right]^{1,5} \cdot \frac{(d_2' d_3'')^{0,37}}{d_{2,3}^{0,74}} \right\} - \dots,$$

Где $\min(A_1, A_2)$ – означает, что из двух величин, указанных в скобках, берется меньшая по модулю; $\min(A_1, A_2)_0$ – означает, что A_1 и A_2 берутся при $\theta=0$.

Для учета препятствий с $\theta < 0$, на профиле строятся кривые H_{0i} , определяемые по формуле:

$$H_{0i} = 10 \cdot \sqrt{\frac{d_n' d_n''}{f(d_n' + d_n'')}} ,$$

Где d_n' – расстояния от начального участка с прямой видимостью до данного препятствия с $\theta < 0$, d_n'' – расстояния от препятствия с $\theta < 0$ до конца данного участка.

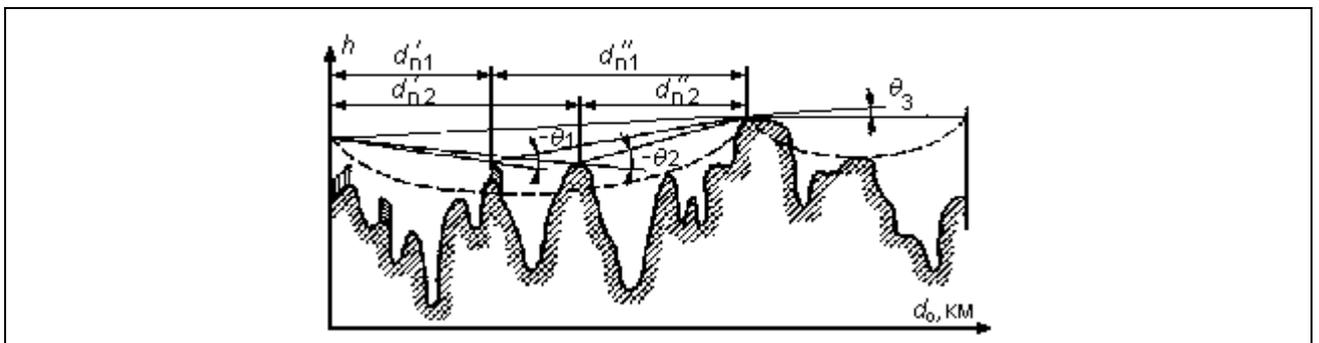


Рис. 1.7. Геометрические параметры препятствий с $\theta < 0$.

На рисунке 1.7. показаны кривые H_{0i} и три препятствия с $\theta < 0$, два из которых вносят ослабление. Для каждого такого препятствия ослабление рассчитывается по формуле:

$$A_{ni} = -6,4 - 20 \log \left(\sqrt{\left(\frac{2\theta_{ni}^2}{x_{ni}} + 1 \right)} + 1,41 \frac{\theta_{ni}}{\sqrt{x_{ni}}} \right) - K_{Hi} (6,6x_{ni}^{0,75} y_{ni}^{1,5} + 11,7x_{ni}^{0,25} y_{ni}^{1,5} \theta),$$

$$\text{где } x_{ni} = \frac{3 \cdot 10^{-4} (d_{ni}' + d_{ni}'')}{f d_{ni}' d_{ni}''}, y_{ni} = 14,9 R_{ni}^{1/3} f^{1/3}.$$

Полученное ослабление алгебраически прибавляется к A_{Σ} .

Если на участке есть несколько препятствий, $\theta < 0$, то учитывается их взаимное влияние, определяемое фактором:

$$-0,64 \min(A_{ni}, A_{n_{i+1}}) \cdot \arctg \left\{ 0,72 \frac{(d_{ni}' d_{n_{i+1}}'')^{0,37}}{(d_{n_{i+1}}' - d_{ni}'')^{0,74}} \right\}.$$

10. Замирание сигнала. Радиоволны могут испытывать глубокие замирания при распространении, что обусловлено рядом факторов: отражений от поверхности земли, влияние рельефа местности, отражений от искусственных и природных препятствий и т.п. Достоверно определить причину замираний в каждом конкретном случае достаточно сложно. Самое простое решение этого вопроса - обеспечение запаса на замирание 40 дБ, что по некоторым рекомендациям дает вероятность качественного приема 99,99%.

Для более точного определения запаса на замирание сигнала можно использовать следующие формулы.

$$\lg(F_1(A_{мед.})) = 1,7 - 1,8Kf^{-0,22} d_0^{-0,42} |A_{мед.}|^{0,8},$$

$$\lg(F_2(A_{мед.})) = 1,7 - 0,07\sqrt{K} \left[1 - 0,4 \frac{H}{H_0} \right] |A_{мед.}|^{1,2}.$$

Где f - частота сигнала в гигагерцах;

d_0 - длина трассы в километрах;

$A_{мед.}$ - ослабление радиоволн относительно медианного уровня, [дБ];

$F_1(A_{мед.})$ - ослабление, обусловленное интерференцией прямой волны, с волнами, отраженными от слоистых неоднородностей приземного слоя воздуха, экранирующим и волноводным действием этих неоднородностей и неоднородностей, и изменением рефракции в приземном слое воздуха;

$F_2(A_{мед.})$ - замирания, преобладающие на ровных и плоских трассах, из-за интерференции прямой и отраженных от земной поверхности волн, F_2 - вычисляется для наименьшего H/H_0 на всей трассе;

K - климатический параметр, который характеризует стратификацию приземного слоя воздуха в сумеречные и ночные часы суток, а также изменяющуюся при этом рефракцию радиоволн, он связан также и с вероятностью образования слоистых неоднородностей в случае достаточно высокой стратификации;

H/H_0 - относительный минимальный просвет на трассе при нормальной рефракции, H – ширина минимальной зоны просвета на трассе, км; H_0 - радиус минимальной зоны, км, в точке просвета, вычисляется по формуле:

$$H_0 = 10 \cdot \sqrt{\frac{d' d''}{f d_0}},$$

Где d', d'' - расстояния от конечных точек трассы до препятствия, км.

Климатический параметр K можно определить по формуле:

$$K = 4 \exp(-0,15\Delta t) + 0,3V + 5 \cdot 10^{-4} \cdot (100 - U)^2 + 6,2 \exp(-0,1t_{15}).$$

Где:

Δt - разность температур, измеренных в 15 ч предыдущих суток и в 3 ч ночи данных суток, °С;

V - скорость ветра в 3 ч ночи, м/с;

U - относительная влажность в 3 ч ночи, %;

t_{15} - температура воздуха в 15 ч предыдущих суток, °С.

Расчет K для различных регионов и сезонов очень трудоемкая задача. Поэтому можно воспользоваться более грубой метеорологической статистикой - среднемесячными значениями указанных выше метеорологических величин. Точность расчетов функций распределения при этом несколько снижается, но все же остается приемлемой для практических целей.

Тогда климатический параметр K можно определить по формуле:

$$K = \exp(-0,12\overline{\Delta t}) + 0,3\overline{V} + 5 \cdot 10^{-4} \cdot (100 - \overline{U})^2 + 2 \exp(-0,12\overline{t_{15}}),$$

где черточками обозначена процедура усреднения соответствующих величин за период измерений. В метеорологический ежемесячник СССР (Часть I. - Мировой центр данных, г. Обнинск, Московская обл.) приведены среднемесячные значения всех необходимых параметров, используемых для расчета K в любой месяц года на территории, которой соответствуют эти данные.

Для мешающего сигнала уменьшение его мощности из-за замирания только улучшит показатели системы. Поэтому для “худшего случая” этот параметр принимается равным 0 дБ.

Оценка потерь на трассе распространения радиоволн с помощью формул Хаты

Для расчета потерь на трассе распространения можно использовать формулы Хаты, которые дают оценку сразу медианных потерь, дифракционных потерь и потерь при замирании сигнала.

Вычисления производятся по формуле:

$$f_{propag}(f, h_h, h_2, d, env) = L + T(G(\sigma)),$$

где L – средняя величина затухания распространения [дБ];

σ – среднеквадратическое отклонение медленных замираний;

f – частота [МГц];

h_1, h_2 – высоты антенн приемника и передатчика [м];

d – расстояние между антеннами [км], предпочтительно менее 100 км;

$T(G(\sigma))$ – мгновенное отклонение от среднего значения;

env – сочетание следующих вариантов: в помещении или под открытым небом; сельская, городская или пригородная местность; распространение выше или ниже уровня крыш;

$$H_m = \min(h_1, h_2), H_b = \max(h_1, h_2).$$

Если H_m и/или H_b меньше одного метра, используется величина 1 м. Высоты антенн, превышающие 200 м, также приводят к значительным ошибкам.

8,9. Медианные потери и потери на различных типах местности.

Расчет потерь распространения L .

Случай 1: $d \leq 0,04$ км

$$L = 32,4 + 20 \log(f) + 10 \log[d^2 + (H_b - H_m)^2 \cdot 10^{-6}].$$

Случай 2: $d \geq 0,1$ км

$$a(H_m) = (1,1 \log(f) - 0,7) \cdot \min\{10; H_m\} - (1,56 \log(f) - 0,8) + \max\left\{0; 20 \log\left(\frac{H_m}{10}\right)\right\},$$

$$b(H_b) = \max\left\{0; 20 \log\left(\frac{H_b}{30}\right)\right\},$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & d \leq 20 \text{ км} \\ 1 + (0,14 + 1,87 \cdot 10^4 \cdot f + 1,07 \cdot 10^3 \cdot H_b) \cdot \left(\log \left(\frac{d}{20} \right) \right)^{0,8}, & 20 \text{ км} < d < 100 \text{ км} \end{cases}$$

Частный случай 2.1: Городская застройка

2.1.1. $30 < f \leq 150$ МГц

$$L = 69,6 + 26,2 \log(150) - 20 \log \left(\frac{150}{f} \right) - 13,82 \log(\max\{30; H_b\}) + \\ + \alpha \cdot [44,9 - 6,55 \log(\max\{30; H_b\})] \cdot \log d - a(H_m) - b(H_b)$$

2.1.2. $150 < f \leq 1500$ МГц

$$L = 69,6 + 26,2 \log(f) - 13,82 \log(\max\{30; H_b\}) + \\ + \alpha \cdot [44,9 - 6,55 \log(\max\{30; H_b\})] \cdot \log d - a(H_m) - b(H_b)$$

2.1.3. $1500 < f \leq 2000$ МГц

$$L = 69,6 + 26,2 \log(150) - 13,82 \log(\max\{30; H_b\}) + \\ + \alpha \cdot [44,9 - 6,55 \log(\max\{30; H_b\})] \cdot \log d - a(H_m) - b(H_b)$$

2.1.4. $2000 < f \leq 3000$ МГц

$$L = 46,3 + 33,9 \log(2000) + 10 \log \left(\frac{f}{2000} \right) - 13,82 \log(\max\{30; H_b\}) + \\ + \alpha \cdot [44,9 - 6,55 \log(\max\{30; H_b\})] \cdot \log d - a(H_m) - b(H_b)$$

Частный случай 2.2: Пригородная местность

$$L = L(\text{город}) - 2 \cdot \left\{ \log \left[\frac{(\min\{\max\{150; f\}; 2000\})}{28} \right] \right\}^2 - 5,4$$

Частный случай 2.3: Открытое пространство

$$L = L(\text{город}) - 4,78 \cdot \left\{ \log \left[\frac{(\min\{\max\{150; f\}; 2000\})}{28} \right] \right\}^2 + 18,33 \cdot \log[\min\{150; f\}; 2000] - 40,94$$

Случай 3: $0,04 \leq d \leq 0,1$ км

$$L = L(40) + \frac{[\log(d) - \log(40)]}{[\log(100) - \log(40)]} \cdot [L(100) - L(40)].$$

Если L меньше затухания в свободном пространстве при том же расстоянии, в качестве результата используется затухание в свободном пространстве.

10. Замирание сигнала.

Оценка стандартного среднеквадратического отклонения медленных замираний:

Случай 1: $d \leq 0,04$ км, $\sigma = 3,5$ дБ;

Случай 2: $0,04 < d \leq 0,1$ км

$\sigma = 3,5 + \frac{(12 - 3,5)}{100 - 40} \cdot (d - 40)$ - для распространения выше уровня крыш;

$\sigma = 3,5 + \frac{(17 - 3,5)}{100 - 40} \cdot (d - 40)$ - для распространения ниже уровня крыш;

Случай 3: $0,1 < d \leq 0,2$ км

$\sigma = 12$ - для распространения выше уровня крыш;

$\sigma = 17$ - для распространения ниже уровня крыш;

Случай 4: $0,2 < d \leq 0,6$ км

$\sigma = 12 + \frac{9 - 12}{600 - 200} \cdot (d - 200)$ - для распространения выше уровня крыш;

$\sigma = 17 + \frac{9 - 17}{600 - 200} \cdot (d - 200)$ - для распространения ниже уровня крыш;

Случай 5: $d > 0,6$ км, $\sigma = 9$ дБ.

Расчет потерь распространения между помещением и открытым пространством:

$$f_{propag}(f, h_1, h_2, d, env) = L + T(G(\sigma)),$$

где f, h_1, h_2 и d – определены как и раньше;

env – в помещении или на открытом пространстве;

L_{we} – затухание за счет стен здания;

σ_{add} – дополнительное стандартное отклонение, вводится пользователем, по умолчанию 5 дБ.

Среднее затухание L :

$$L (\text{помещение} - \text{пространство}) = L (\text{пространство} - \text{пространство}) + L_{we},$$

L_{we} - затухание за счет стен здания, по умолчанию 10 дБ.

Стандартное среднеквадратическое отклонение медленных замираний увеличивается по сравнению с распространением на открытом пространстве за счет дополнительной неопределенности свойств строительных материалов и расположения зданий:

$$\sigma(\text{помещение} - \text{пространство}) = \sqrt{\sigma(\text{пространство} - \text{пространство})^2 + \sigma_{add}^2}$$

11. Потери в атмосферных осадках сказываются на частотах выше 5 ГГц. На частотах ниже 5 ГГц потери практически отсутствуют.

12. Суммарные потери на трассе распространения подсчитываются с помощью таблицы 1.4. сложением значений всех строк. Если расчет велся с помощью формул Хаты, то суммарные потери запишутся как результат сложения потерь, вычисленных по формулам Хаты и потерь в атмосферных осадках.

Табл. 1.4. Потери на трассе распространения.

Параметр	Сигнал		Помеха	
	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ
8. Медианные потери				
9. Дифракционные потери				
10. Потери при замирании сигнала (интерференция)				
11. Потери в атмосферных осадках				
12. Суммарные потери на трассе распространения				

1.3. Характеристики рецептора

Рецептором является приемник, который одновременно принимает и полезный и мешающий сигнал.

В этом разделе необходимо учесть суммарное усиление антенны приемника – рецептора НЭМП, включающее следующие факторы:

- Коэффициент усиления приемной антенны;
- Уменьшение коэффициента усиления антенны в направлении источника помехи;
- Уменьшение коэффициента усиления антенны из-за рассогласования поляризации приемной и передающей антенн;
- Потери в фидере приемного тракта;
- Мощность на входе приемника-рецептора;
- Отношение *сигнал/шум* (S/N) и *помеха/шум* (I/N) на выходе детектора;
- Отношение *сигнал/(помеха+шум)* ($S/(I+N)$).

Рассмотрим расчет указанных параметров.

13. Коэффициент усиления приемной антенны определяется для каждого из передатчиков, в зависимости от частоты передаваемого сигнала. Расчет производится, как и для передающей антенны в пункте 4. Если влияние оказывает не основная частота передаваемого сигнала, а одна из его гармоник, то коэффициент усиления приемной антенны считается для частоты этой гармоники.

14. Уменьшение коэффициента усиления приемной антенны в направлении передатчика - определяется диаграммой направленности приемной антенны и взаимным расположением приемной и передающей антенн.

Если диаграмма направленности – задана, то расчет производится, как и для передающей антенны в пункте 5.

Если данные о диаграмме направленности на момент проектирования не известны, то может быть использован следующий подход. На рисунке 1.8 показана аппроксимация диаграммы направленности антенны для двухступенчатого и четырехступенчатого варианта.

Для решения проблемы будет использована четырехступенчатая аппроксимация. Рисунок показывает, что в пределах $\pm 0,5$ ширины луча для точного определения используется коэффициент усиления антенны (G_0). Для смещения на расстояние между 0,5 и 1 ширины диаграммы направленности (BW) коэффициент усиления уменьшается на 5 дБ. При смещении от оси на расстояние от 1 до 3 ширины диаграммы направленности, уровень усиления соответствует ненаправленной антенне 0 дБ. Окончательно для смещения больше чем на ± 3 ширины диаграммы направленности, уровень коэффициента усиления принимается -10 дБ.

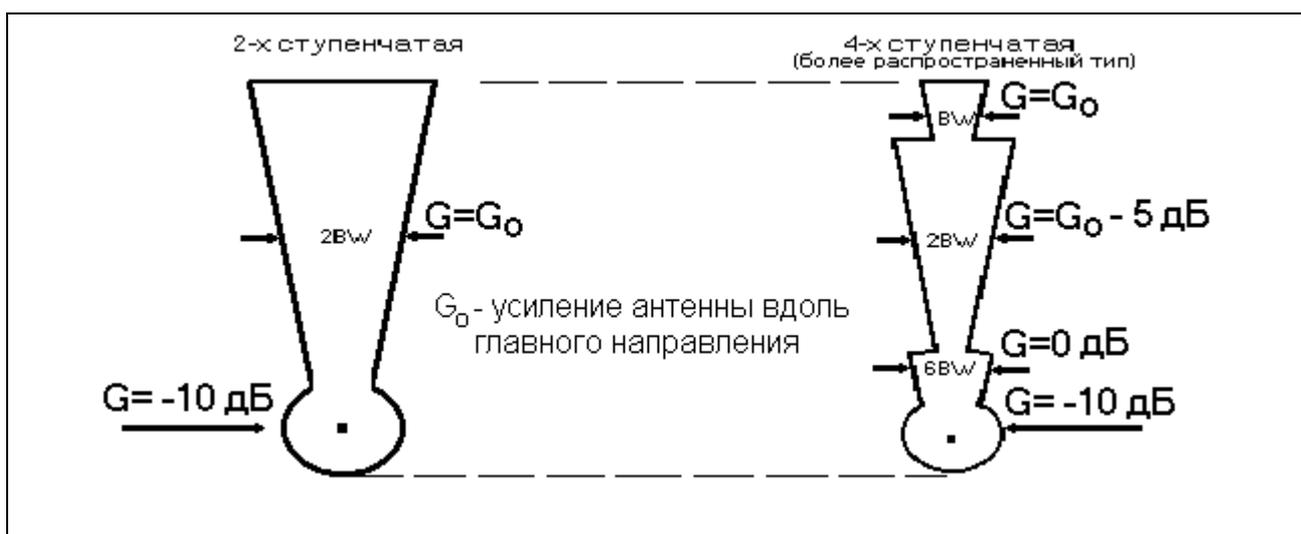


Рис. 1.8. Аппроксимация геометрии диаграммы направленности.

Приближенная ширина диаграммы направленности BW , при отсутствии более точных данных, для любой антенны штыревого типа рассчитывается по формулам:

$$BW = \sqrt{\frac{3000}{G}} = 173/\sqrt{G}, \text{ град.}$$

или

$$BW = 70\lambda / d, \text{ град.,}$$

где G – значение коэффициента усиления в относительных единицах,
 λ - длина волны в метрах,
 d - диаметр диска антенны или диагональ рупора антенны в метрах.

Если G задано в дБ, то для получения значения в относительных единицах необходимо взять антилогарифм от значения ($G[\text{дБ}]/10$).

15. Уменьшение коэффициента усиления антенны из-за рассогласования поляризации приемной и передающей антенн выбирается из таблицы 1.5.

При одинаковой поляризации принимаем значение, равное нулю.

16. Потери в фидере приемного тракта для всех сигналов имеют одинаковые значения и определяются конструкцией фидера, как рассмотрено выше при анализе передатчиков.

17. Суммарное усиление антенны определяется с помощью таблицы 1.6 путем суммирования значений для сигнала и помехи всех строк таблицы.

18. Мощность на входе приемника определяется по результатам проведенных расчетов по таблице 1.7.

Табл. 1.5. Поправочный коэффициент [дБ], учитывающий поляризацию антенн передатчика и приемника.

Поляризация антенны приемника	Поляризация антенны передатчика				Круговая
	Горизонтальная		Вертикальная		
	$G < 10$ дБ	$G \geq 10$ дБ	$G < 10$ дБ	$G \geq 10$ дБ	
<i>Горизонтальная</i>					
$G < 10$ дБ	0	0	-16	-16	-3
$G \geq 10$ дБ	0	0	-16	-20	-3
<i>Вертикальная</i>					
$G < 10$ дБ	-16	-16	0	0	-3
$G \geq 10$ дБ	-16	-20	0	0	-3
<i>Круговая</i>	-3	-3	-3	-3	0

Табл. 1.6. Суммарное усиление антенны приемника.

Параметр	Сигнал		Помеха	
	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ
13. Коэффициент усиления приемной антенны				
14. Уменьшение коэффициента усиление в направлении источника помехи				
15. Уменьшение коэффициента усиления антенны из-за рассогласования поляризацій				
16. Потери в фидерах				
17. Суммарное усиление антенны				

Табл. 1.7. Мощность на входе приемника.

Параметр	Сигнал		Помеха	
	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ
7. Уровень эффективной передаваемой мощности				
12. Суммарные потери на трассе распространения				
17. Суммарное усиление антенны приемника				
18. Мощность на входе приемника – приемника				

Отношение S/N и I/N определяется следующими составляющими:

- Поправкой на несовпадение рабочих частот;
- Поправкой на ширину полосы частот канала;
- Чувствительностью приемника.

19. Поправка на несовпадение рабочих частот определяется исходя из разницы ΔF между основной частотой излучения полезного сигнала и гармоникой мешающего сигнала, лежащей в полосе приема приемника. Для этого значения должна быть введена коррекция. При этом должны быть известны полосы пропускания на уровне 3 дБ передатчика (B_T) и приемника (B_R). Если вместо полосы пропускания передатчика B_T задана длительность импульса τ в секундах (например для РЛС), то B_T определяется по формуле:

$$B_T = 2/\pi\tau, \text{ Гц.}$$

Для определения поправки следует воспользоваться графиком (рис. 1.9), предварительно определив полосы пропускания на уровне 3 дБ приемника и передатчика – источника НЭМП.

Параметр B позволяющий использовать графики на рисунке 1.9. рассчитывается по формуле:

$$B = (B_R + B_T)/2.$$

Далее по значениям ΔF и B по графику (рис. 1.9.) определяется поправочный коэффициент.

20. Поправка на ширину полосы частот учитывает соотношение полос пропускания трактов приемника и передатчика. Когда ширина полосы пропускания передатчика превосходит ширину полосы пропускания приемника, приемник может перехватывать только часть излучения передатчика. Для этого случая вводится поправка, для вычисления которой может быть использована коррекция ширины полосы пропускания, показанная в таблице 1.8.

21. Чувствительность приемника задается исходными требованиями и приводится в соответствующей НТД.

Так как один и тот же приемник обрабатывает полезный и мешающий сигналы, то заданное значение чувствительности приемника учитывается как для сигнала, так и для помехи.

Чувствительность определяется уровнем эффективно передаваемой мощности шума:

$$N = -144 + F + 10 \lg B_R, \text{ дБм,}$$

где F – коэффициент шума приемника, дБм;

B_R – полоса пропускания приемника, КГц.

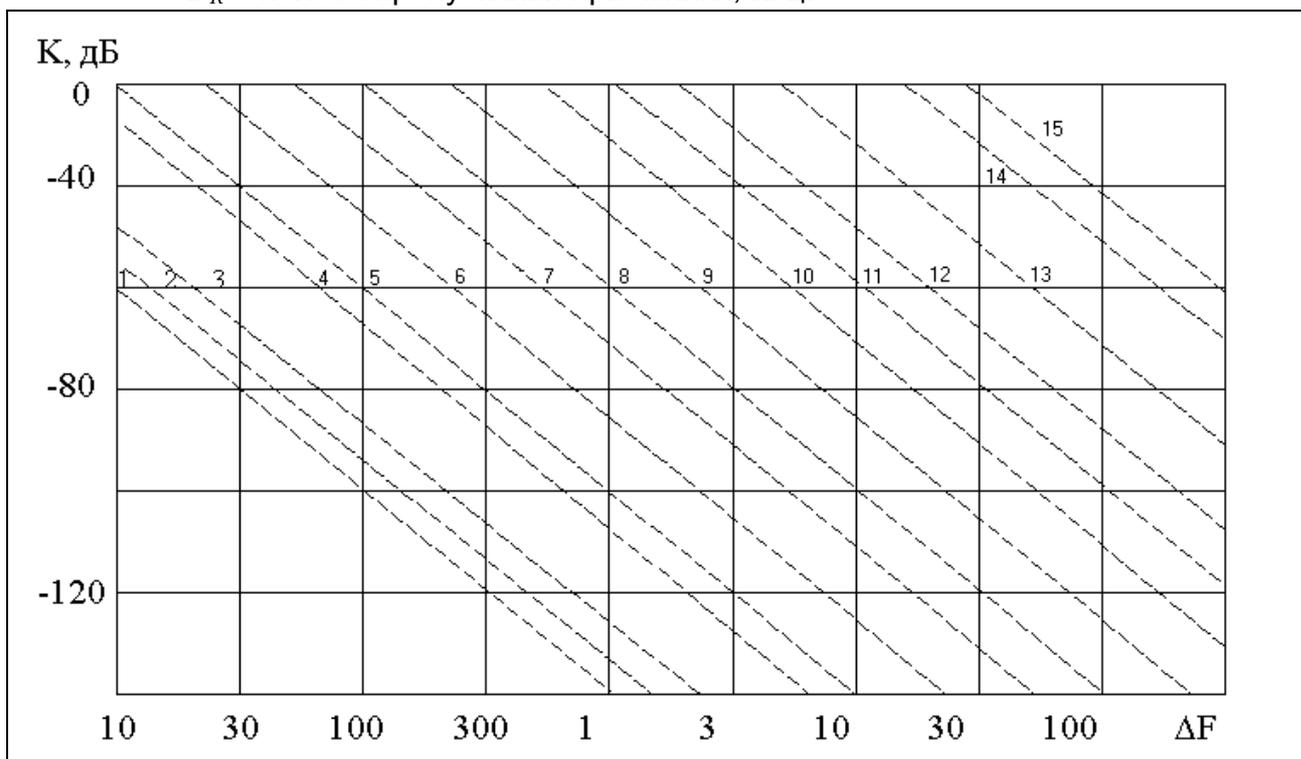


Рис. 1.9. Коэффициент коррекции из-за разности частот между приемником и передатчиком.

1	$B=500\text{Гц}$	2	$B=1\text{ КГц}$	3	$B=2\text{ КГц}$
4	$B=5\text{ КГц}$	5	$B=10\text{ КГц}$	6	$B=20\text{ КГц}$
7	$B=50\text{ КГц}$	8	$B=100\text{ КГц}$	9	$B=200\text{ КГц}$
10	$B=500\text{ КГц}$	11	$B=1\text{ МГц}$	12	$B=2\text{ МГц}$
13	$B=5\text{ МГц}$	14	$B=10\text{ МГц}$	15	$B=20\text{ МГц}$

Табл. 1.8. Коэффициент коррекции.

Модуляция	Соотношение полос пропускания	Коррекция	Примечание
Шумоподобная	$B_R \geq B_T$	Без коррекции	Мощность пропорциональна полосе
	$B_R < B_T$	$10\lg(B_R/B_T)$	
Импульсная	$B_R \geq B_T$	Без коррекции	Пиковое напряжение пропорционально полосе
	$PRF < B_R < B_T$	$20\lg(B_R/B_T)$	
	$B_R < PRF$	$20\lg(PRFB_T)$	$B_R < PRF$
<i>PRF</i> – частота следования импульсов			

22. Выигрыш в отношениях S/N и I/N при детектировании

Изменение отношений S/N и I/N при детектировании определяются специальными системо- и схмотехническими методами, повышающими помехозащищенность систем.

23. Отношение S/N и I/N на выходе детектора.

Определим отношения S/N для полезного сигнала и I/N для помехи с помощью таблицы 1.9., просуммировав данные соответствующих столбцов, беря значения строки 21 (чувствительность приемника) со знаком “минус”.

24. Отношение сигнал/(помеха+шум) (S/(N+I)) является итоговым показателем помехозащищенности радиосистемы и условия обеспечения ЭМС. Оно определяется по итоговым данным (строка 23) таблицы 1.9. следующим образом:

$$S/(N + I) = S/N - I/N, \text{ если } I/N > 3.$$

Следует учесть, что параметр S/N является контролируемым при проектировании РЭС параметром, в то время как I/N определяется электромагнитной обстановкой.

Табл. 1.9. Отношение S/N и I/N на входе детектора приемника.

Параметр	Сигнал		Помеха	
	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ
18. Мощность на входе приемника				
19. Поправка на несовпадение рабочих частот	■		■	
20. Поправка на ширину полосы частот	■		■	
21. Чувствительность приемника	■		■	
22. Выигрыш в отношениях S/N и I/N при детектировании				
23. Отношение S/N и I/N на выходе детектора				
24. Отношение S/(N+I)				

Оценка условий обеспечения ЭМС

Оценка условия обеспечения ЭМС проводится на основе сравнения рассчитанного значения $S/(N+I)$ с допустимым (защитным) значением Δ , которое задается при разработке систем. При этом должно соблюдаться соотношение:

$$S/(N+I) \geq \Delta.$$

Если это условие не соблюдается, то необходимо разработать рекомендации по обеспечению ЭМС, а затем повторить расчет ЭМС, с учетом этих рекомендаций.

2. ЭМС сотовых систем связи

2.1. Исходные данные для расчета

Проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) сотовых систем различных стандартов, действующих на одной территории, может возникнуть, если рабочие полосы частот в предусмотренных для этих систем диапазонах перекрываются или защитный интервал между ними недостаточен. Особенно тщательного исследования требует случай, когда одна из систем уже развернута и функционирует в выделенных для нее рабочих полосах частот, а вторая планируется к развертыванию на той же или сопредельной территории при дефиците частотных полос.

Оценка ЭМС систем EGSM-900 и CDMA-800 в Москве.

Распределение рабочих полос частот систем CDMA-800 (передача с БС; передача с МС) или (прием на МС; прием на БС):

- по России в целом: (873...876 МГц; 828...831 МГц) МГц;
- в Москве: (879...882 МГц; 834...837 МГц).

Полоса, выделенная для стандарта EGSM-900: 880...915 МГц. Следовательно, частотные полосы систем не только перекрываются, но, фактически, часть рабочей полосы частот EGSM-900 приходится на ранее выделенную и занятую полосу системы связи CDMA-800. В связи со сложившейся ситуацией необходимо провести оценку ЭМС этих двух систем.

Из анализа частот EGSM и CDMA в Москве, следует, что излучение передатчика БС CDMA воздействует на приемник БС EGSM. В свою очередь излучение передатчика МС EGSM воздействуют на приемник МС CDMA.

При анализе ЭМС проводится расчет для следующих исходных данных:

1. Характеристики передатчика БС CDMA:

- Максимальная мощность излучения БС CDMA: $P_{\text{БС CDMA}} = 17$ Вт;
- Рабочая частота передатчика БС CDMA: $f_{\text{БС CDMA}} = 881,25$ МГц (г. Москва);
- Полоса пропускания на уровне 3 дБ передатчика БС CDMA: 1,2 МГц;
- Потери радиочастотного кабеля, включая потери на радиочастотном разъеме: 3 дБ;
- Высота установки антенны передатчика БС CDMA: $H_{\text{БС CDMA}} = 30$ м;
- КУ секторной антенны передатчика БС CDMA: $G_{\text{БС CDMA}} = 14$ дБ;
- Уровень внеполосного излучения БС CDMA при отстройке от несущей на 2 МГц и более: менее -44 дБ;

2. Характеристики приемника МС CDMA:

- Частота приема МС CDMA: 881,25 МГц (г. Москва);
- Полоса пропускания на уровне 3 дБ приемника МС CDMA: 1,2 МГц;
- Выигрыш в отношении $S/(N+I)$ при использовании кодирования: 23 дБ;
- КУ антенны приемника МС CDMA: $G_{\text{МС EGSM}} = 0$ дБ;
- Чувствительность приемника МС CDMA: -120,65 дБ;
- Уровень внутрисистемной помехи в системе CDMA: 8 дБ;

- Требуемое отношение $S/(N+I)$ в системе CDMA: 5,5 дБ;
3. Характеристики передатчика MC EGSM:
 - Мощность излучения MC EGSM: $P_{MC\ EGSM} = 2$ Вт;
 - Несущая частота передатчика MC EGSM: $f_{MC\ EGSM} = 889,6$ МГц;
 - Полоса пропускания на уровне 3 дБ передатчика MC EGSM: 6 МГц;
 - Уровень внеполосного излучения MC EGSM при отстройке от несущей на 0,5 МГц и более: менее -60 дБ;
 - КУ антенны передатчика MC EGSM: $G_{MC\ EGSM} = 0$ дБ;
 4. Характеристики приемника BC EGSM:
 - Частота приема BC EGSM: $f_{BC\ EGSM} = 889,6$ МГц;
 - Полоса пропускания на уровне 3 дБ приемника BC EGSM: 6 МГц;
 - Высота установки антенны приемника BC EGSM: $H_{BC\ EGSM} = 30$ м;
 - КУ секторной антенны приемника BC EGSM: $G_{BC\ EGSM} = 14$ дБ;
 - Чувствительность приемника BC EGSM: -107 дБ;
 - Требуемое отношение $S/(N+I)$ в системе EGSM: 9 дБ;
 5. Условные характеристики трасс распространения сигналов:
 - Условия распространения сигнала передатчик BC CDMA – приемник BC EGSM: городская застройка;
 - Условия распространения сигнала передатчик BC CDMA – приемник MC CDMA: городская застройка;
 - Условия распространения сигнала передатчик MC EGSM – приемник MC CDMA: прямая видимость (распространение в свободном пространстве);
 - Условия распространения сигнала передатчик MC EGSM – приемник BC EGSM: городская застройка.

2.2. Анализ параметров источников полезного и мешающего сигналов

1. Мощность передатчиков:

Для передатчика BC CDMA:

$$P_{BC\ CDMA} = 10 \lg(P_{BC\ CDMA} [\text{Вт}] \cdot 1000) = 10 \lg(17 \cdot 1000) = 42,3, \text{ дБм};$$

Для передатчика MC EGSM:

$$P_{MC\ EGSM} = 10 \lg(P_{MC\ EGSM} [\text{Вт}] \cdot 1000) = 10 \lg(2 \cdot 1000) = 33, \text{ дБм}.$$

2. Уменьшение уровня мощности мешающего сигнала на гармониках:

Частоты приемника MC CDMA и передатчика MC EGSM примерно равны:

$$f_{MC\ CDMA} = 881,25 \approx f_{MC\ EGSM} = 889,6 \text{ МГц}.$$

Значит, уменьшение уровня мощности мешающего сигнала на гармониках отсутствует.

Частоты приемника BC EGSM и передатчика BC CDMA примерно равны:

$$f_{\text{БС CDMA}} = 881,25 \approx f_{\text{БС EGSM}} = 889,6 \text{ МГц.}$$

Значит, уменьшение уровня мощности мешающего сигнала на гармониках отсутствует.

3. Потери в фидерах:

Для передатчика БС CDMA: 3 дБ.

Для передатчика МС EGSM: 0 дБ.

4. Усиление антенн:

КУ секторной антенны передатчика БС CDMA: $G_{\text{БС CDMA}} = 14$ дБ.

КУ антенны передатчика МС EGSM: $G_{\text{МС EGSM}} = 0$ дБ;

5. Уменьшение уровня мощности для частот передатчика, лежащих вне рабочей полосы частот.

Уровень внеполосного излучения БС CDMA при отстройке от несущей на 2 МГц и более: менее -44 дБ;

Уровень внеполосного излучения МС EGSM при отстройке от несущей на 0,5 МГц и более: менее -60 дБ;

6. Уменьшение коэффициента усиления антенны передатчика в направлении рецептора.

Секторная антенна БС CDMA должна обеспечивать примерно одинаковое усиление во всех направлениях, в т.ч. и направлении на БС EGSM. Следовательно, уменьшение КУ антенны БС CDMA принимаем равное 0 дБ.

Антенна МС является всенаправленной, поэтому уменьшение КУ антенны МС EGSM принимаем равным 0 дБ.

7. Итоговые данные по уровню эффективно передаваемой мощности с помощью расчета параметров передатчиков, полученные результаты сводятся в таблицу. Для нахождения результата необходимо сложить все строки таблицы.

Расчет уровня эффективной передаваемой мощности.

Пара сигнал - помеха	БС EGSM				МС CDMA			
	МС EGSM		БС CDMA		БС CDMA		МС EGSM	
	Сигнал	Помеха	Сигнал	Помеха	Сигнал	Помеха	Сигнал	Помеха
Параметр	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ
1. Мощность передатчика	33		42,3		42,3		33	
2. Уменьшение уровня мощности на гармониках				0				0
3. Потери в фидерах		0		3		3		0
4. КУ антенны передатчика	0		14		14		0	
5. Уменьшение уровня мощности вне рабочей полосы частот				44				60
6. Уменьшение КУ антенны в направлении рецептора		0		0		0		0
7. Уровень эффективной передаваемой мощности	+33		+9,3		+53,3		-27	

2.3. Потери энергии на трассе распространения радиоволн

8, 9. Медианные и дифракционные потери.

Для трассы БС CDMA - БС EGSM.

Определим потери на трассе распространения по формулам Хаты:

$h_1 = h_2 = 30\text{ м}$ – высоты антенн БС.

$H_m = \min(h_1, h_2) = 30\text{ м}$, $H_b = \max(h_1, h_2) = 30\text{ м}$.

Для $r \geq 0,1\text{ км}$, городская застройка, $f = 881,25\text{ МГц}$:

$$a(H_m) = (1,1 \log(f) - 0,7) \cdot \min\{10; H_m\} - (1,56 \log(f) - 0,8) + \max\left\{0; 20 \log\left(\frac{H_m}{10}\right)\right\};$$

$$a(H_m) = (1,1 \log(881,25) - 0,7) \cdot 10 - (1,56 \log(881,25) - 0,8) + \max\left\{0; 20 \log\left(\frac{30}{10}\right)\right\};$$

$$a(H_m) = 25,4 - 3,8 + 10 = 31,6;$$

$$b(H_b) = \max\left\{0; 20 \log\left(\frac{H_b}{30}\right)\right\} = 0;$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & r \leq 20\text{ км} \\ 1 + (0,14 + 1,87 \cdot 10^4 \cdot f + 1,07 \cdot 10^3 \cdot H_b) \cdot \left(\log\left(\frac{r}{20}\right)\right)^{0,8}, & 20\text{ км} < r < 100\text{ км} \end{cases};$$

т.к. берем расстояние между БС меньше 20 км, то $\alpha = 1$;

$$L = 69,6 + 26,2 \log(f) - 13,82 \log(\max\{30; H_b\}) + \\ + \alpha \cdot [44,9 - 6,55 \log(\max\{30; H_b\})] \cdot \log r - a(H_m) - b(H_b);$$

$$L = 69,6 + 26,2 \log(881,25) - 13,82 \log(30) + 1 \cdot [44,9 - 6,55 \log(30)] \cdot \log(r) - 31,6;$$

$$L = 69,6 + 77,2 - 20,4 + 35,2 \cdot \log(r) - 31,6;$$

$$L = 94,8 + 35,2 \log(r_{\text{БС}}).$$

Где $r_{\text{БС}}$ – расстояние между базовыми станциями CDMA и EGSM, км.

Для трассы распространения МС EGSM – БС EGSM.

Определим потери на трассе распространения по формулам Хаты:

Городская застройка, $f = 889,6$ МГц, $h_1=30$ м – высота расположения антенны БС EGSM, $h_2=1$ м – высота расположения антенны МС EGSM, r_{EGSM} – расстояние между МС и БС системы EGSM.

$$H_m = \min(h_1, h_2) = 1 \text{ м}, H_b = \max(h_1, h_2) = 30 \text{ м}.$$

В формулах Хаты рассматривается несколько случаев, в зависимости от расстояния r_{EGSM} , в данной задаче целесообразно рассматривать только худший для ЭМС случай, когда $r_{EGSM} \geq 0,1$ км (большее расстояние – большие потери).

$$a(H_m) = (1,1 \log(f) - 0,7) \cdot \min\{10; H_m\} - (1,56 \log(f) - 0,8) + \max\left\{0; 20 \log\left(\frac{H_m}{10}\right)\right\};$$

$$a(H_m) = (1,1 \log(889,6) - 0,7) \cdot 1 - (1,56 \log(889,6) - 0,8) = 2,5 - 3,8 = -1,3;$$

$$b(H_b) = \max\left\{0; 20 \log\left(\frac{H_b}{30}\right)\right\} = 0;$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & r \leq 20 \text{ км} \\ 1 + (0,14 + 1,87 \cdot 10^4 \cdot f + 1,07 \cdot 10^3 \cdot H_b) \cdot \left(\log\left(\frac{d}{20}\right)\right)^{0,8}, & 20 \text{ км} < r < 100 \text{ км} \end{cases}$$

т.к. расстояние между МС и БС меньше 20 км, то $\alpha = 1$;

$$L = 69,6 + 26,2 \log(f) - 13,82 \log(\max\{30; H_b\}) + \\ + \alpha \cdot [44,9 - 6,55 \log(\max\{30; H_b\})] \cdot \log r - a(H_m) - b(H_b);$$

$$L = 69,6 + 26,2 \log(889,6) - 13,82 \log(30) + 1 \cdot [44,9 - 6,55 \log(30)] \cdot \log r_{EGSM} + 1,3 - 0;$$

$$L = 69,6 + 77,3 - 20,41 + 35,2 \cdot \log r_{EGSM} + 1,3 = 127,8 + 35,2 \cdot \log r_{EGSM}.$$

Для трассы распространения БС CDMA – МС CDMA.

Определим потери на трассе распространения по формулам Хаты:

Городская застройка, $f = 881,25$ МГц, $h_1=30$ м – высота расположения антенны БС CDMA, $h_2=1$ м – высота расположения антенны МС CDMA, r_{CDMA} – расстояние между МС и БС системы CDMA.

$$H_m = \min(h_1, h_2) = 1 \text{ м}, H_b = \max(h_1, h_2) = 30 \text{ м}.$$

В формулах Хаты рассматривается несколько случаев, в зависимости от расстояния, но в данной задаче целесообразно рассматривать только худший для ЭМС случай, когда $r_{EGSM} \geq 0,1$ км.

$$a(H_m) = (1,1 \log(f) - 0,7) \cdot \min\{10; H_m\} - (1,56 \log(f) - 0,8) + \max\left\{0; 20 \log\left(\frac{H_m}{10}\right)\right\};$$

$$a(H_m) = (1,1 \log(881,25) - 0,7) \cdot 1 - (1,56 \log(881,25) - 0,8) = 2,5 - 3,8 = -1,3;$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & r \leq 20 \text{ км} \\ 1 + (0,14 + 1,87 \cdot 10^4 \cdot f + 1,07 \cdot 10^3 \cdot H_b) \cdot \left(\log\left(\frac{d}{20}\right) \right)^{0,8}, & 20 \text{ км} < r < 100 \text{ км} \end{cases}$$

т.к. расстояние между МС и БС меньше 20 км, то $\alpha = 1$;

$$L = 69,6 + 26,2 \log(f) - 13,82 \log(\max\{30; H_b\}) + \\ + \alpha \cdot [44,9 - 6,55 \log(\max\{30; H_b\})] \cdot \log r - a(H_m) - b(H_b);$$

$$L = 69,6 + 26,2 \log(881,25) - 13,82 \log(30) + 1 \cdot [44,9 - 6,55 \log(30)] \cdot \log r_{\text{CDMA}} + 1,3 - 0;$$

$$L = 69,6 + 77,2 - 20,41 + 35,2 \cdot \log r_{\text{CDMA}} + 1,3 = 127,7 + 35,2 \cdot \log r_{\text{CDMA}}.$$

Для трассы распространения МС EGSM – МС CDMA.

Для оценки ЭМС МС систем связи с различными методами разделения каналов при их пространственном разнесении в пределах прямой видимости, целесообразно использовать модель распространения сигналов в свободном пространстве.

Несущая частота передатчика МС EGSM: $f_{\text{МС EGSM}} = 889,6$ МГц.

$$A = 32,441 + 20 \lg r_{\text{МС}} + 20 \lg f = 32,441 + 20 \lg r_{\text{МС}} + 20 \lg 889,6;$$

$$A = 91,42 + 20 \lg r_{\text{МС}}, \text{ [дБ]}.$$

Где $r_{\text{МС}}$ – расстояние между мобильными станциями CDMA и EGSM, км.

10. Замирание сигнала.

В формулах Хаты потери на замирание полезного сигнала лежат в пределах 3,5 – 17 дБ, в зависимости от расстояния и распространения выше или ниже уровня крыш. Т.к. расстояние между БС и МС – не определено, а сигнал может идти как выше уровня крыш, так и ниже, то берем наибольшие потери на замирание 17 дБ.

Для «худшего случая» потери на замирание мешающих сигналов берем 0 дБ.

11. Потери в атмосферных осадках сказываются на частотах выше 5 ГГц. На частотах ниже 5 ГГц потери практически отсутствуют.

12. Суммарные потери на трассе распространения подсчитываются с помощью таблицы сложением значений всех строк.

Потери на трассе распространения.

Пара сигнал – помеха	БС EGSM				МС CDMA			
	МС EGSM		БС CDMA		БС CDMA		МС EGSM	
	Сигнал		Помеха		Сигнал		Помеха	
Параметр	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ
8. Медианные потери	-127,8- 35,2logr _{EGSM}		-94,8 – 35,2logr _{БС}		-127,7- 35,2logr _{CDMA}		-91,42 - 20lgr _{МС}	
9. Дифракционные потери								
10. Потери при замирании сигнала (интерференция)		17		0		17		0
11. Потери в атмосферных осадках		0		0		0		0
12. Суммарные потери на трассе распространения	-144,8- 35,2logr _{EGSM}		-94,8 - 35,2logr _{БС}		-144,7- 35,2logr _{CDMA}		-91,42 - 20lgr _{МС}	

2.4. Характеристики рецептора

13. Коэффициент усиления приемной антенны.

КУ антенны МС – 0 дБ, КУ антенны БС – 14 дБ.

14. Уменьшение коэффициента усиления приемной антенны в направлении передатчика.

Секторная антенна БС EGSM должна обеспечивать примерно одинаковое усиление во всех направлениях, в т.ч. и направлении на БС CDMA. Следовательно, уменьшение КУ антенны БС EGSM принимаем равное 0 дБ. Антенна МС является всенаправленной, поэтому уменьшение КУ антенны МС CDMA принимаем равным 0 дБ.

15. Уменьшение коэффициента усиления антенны из-за рассогласования поляризации.

Принимаем равными 0 дБ.

16. Потери в фидере приемного тракта.

Для приемника БС EGSM: 3 дБ.

Для приемника МС CDMA: 0 дБ.

17. Суммарное усиление антенны определяется с помощью таблицы путем суммирования значений для сигнала и помехи всех строк таблицы:

Суммарное усиление антенны рецептора.

Пара сигнал – помеха	BC EGSM				MC CDMA			
	MC EGSM		BC CDMA		BC CDMA		MC EGSM	
	Сигнал		Помеха		Сигнал		Помеха	
Параметр	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ
13. Коэффициент усиления приемной антенны	14		14		0		0	
14. Уменьшение КУ приемной антенны в направлении источника помехи				0				0
15. Уменьшение КУ антенны из-за рассогласования поляризаций				0				0
16. Потери в фидерах		3		3		0		0
17. Суммарное усиление антенны	+11		+11		0		0	

18. Мощность на входе приемника определяется по результатам проведенных расчетов по таблице.

Мощность на входе приемника.

Пара сигнал – помеха	BC EGSM				MC CDMA			
	MC EGSM		BC CDMA		BC CDMA		MC EGSM	
	Сигнал		Помеха		Сигнал		Помеха	
Параметр	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ
7. Уровень эффективной передаваемой мощности	+33		+9,3		+53,3		-27	
12. Суммарные потери на трассе распространения	-144,8- 35,2logr _{EGSM}		-94,8 - 35,2logr _{BC}		-144,7- 35,2logr _{CDMA}		-91,4 - 20lgr _{MC}	
17. Суммарное усиление антенны рецептора	+11		+11		0		0	
18. Мощность на входе приемника – рецептора	-100,8- 35,2logr _{EGSM}		-74,5 - 35,2logr _{BC}		-91,4- 35,2logr _{CDMA}		-118,4- 20lgr _{MC}	

9. Поправка на несовпадение рабочих частот.

Полоса пропускания на уровне 3 дБ передатчика MC EGSM: $B_T = 6$ МГц.
 Полоса пропускания на уровне 3 дБ приемника MC CDMA: $B_R = 1,2$ МГц.

Несовпадение частоты приема MC CDMA и передачи MC EGSM равно:

$$\Delta F = 889,6 - 881,25 = 8,35 \text{ МГц.}$$

Параметр B позволяющий использовать графики на рисунке 1.9. равен:

$$B = (B_R + B_T)/2 = (6+1,2)/2 = 3,6 \text{ МГц.}$$

По графику на рисунке 1.9. поправочный коэффициент $K(\Delta F, B) \approx -39$ дБ.

Полоса пропускания на уровне 3 дБ передатчика БС CDMA: $B_T = 1,2$ МГц.

Полоса пропускания на уровне 3 дБ приемника БС EGSM: $B_R = 6$ МГц.

Несовпадение частоты приема БС EGSM и передачи БС CDMA равно:

$$\Delta F = 889,6 - 881,25 = 8,35 \text{ МГц.}$$

Параметр B позволяющий использовать графики на рисунке 1.9. равен:

$$B = (B_R + B_T)/2 = (6+1,2)/2 = 3,6 \text{ МГц.}$$

По графику на рис. 1.9. поправочный коэффициент $K(\Delta F, B) \approx -39$ дБ.

20. Поправка на ширину полосы частот.

Для пары МС EGSM - МС CDMA:

$B_R < B_T$, следовательно, по таблице 1.8. коррекция на ширину полосы пропускания равна $10 \lg(B_R / B_T) = 10 \lg(1,2/6) = -7$ дБ.

Для пары БС CDMA - БС EGSM:

$B_R > B_T$, следовательно, по таблице 1.8. коррекция на ширину полосы пропускания равна 0.

21. Чувствительность приемника.

Чувствительность приемника МС CDMA: -120,65 дБ.

Чувствительность приемника БС EGSM: -107 дБ.

22. Выигрыш в отношениях S/N и I/N при детектировании.

Выигрыш в отношениях S/N и I/N в приемнике МС CDMA при детектировании составляет 23 дБ.

Так как в приемнике БС EGSM не предусмотрено никаких специальных средств или приемов по выделению сигналов при детектировании, то отношения S/N и I/N останутся такие же, как и на входе детектора.

23. Отношение S/N и I/N на выходе детектора.

Отношения S/N для полезного сигнала и I/N для помехи с помощью таблицы 1.9., просуммировав данные соответствующих столбцов, беря значения строки 21 (чувствительность приемника) со знаком “минус”.

24. Отношение сигнал/(помеха+шум).

Определяется по итоговым данным строки 23 таблицы 1.9. следующим образом:

$$S/(N+I)=S/N - I/N.$$

Отношение S/N и I/N на входе детектора приемника.

Пара сигнал – помеха	БС EGSM				МС CDMA			
	МС EGSM		БС CDMA		БС CDMA		МС EGSM	
	Сигнал		Помеха		Сигнал		Помеха	
Параметр	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ
18. Мощность на входе приемника	-100,8- 35,2log r_{EGSM}		-74,5 - 35,2log r_{BC}		-91,4- 35,2log r_{CDMA}		-118,4- 20lg r_{MC}	
19. Поправка на несовпадение рабочих частот				39				39
20. Поправка на ширину полосы				7				0
21. Чувствительность приемника		-107		-107		-120,7		-120,7
22. Выигрыш на детекторе	0		0		+23		0	
23. Отношение S/N и I/N на выходе детектора	+6,2- 35,2log r_{EGSM}		-13,5 - 35,2log r_{BC}		+52,3- 35,2log r_{CDMA}		-36,7- 20lg r_{MC}	
24. Отношение $S/(N+I)$	+19,7+35,2log(r_{BC}/r_{EGSM})				+89-35,2log r_{CDMA} +20lg r_{MC}			

2.5. Оценка условий обеспечения ЭМС

Для пары БС CDMA - БС EGSM.

Минимально допустимый уровень сигнала, при котором обеспечивается приемлемое качество речи, в системе EGSM равен 9 дБ. Это значит, что расстояние между МС и БС системы EGSM, r_{EGSM} , при котором уровень сигнала будет больше 9 дБ, находится из условия:

$$6,2-35,2\log r_{EGSM} > 9 \text{ дБ};$$

$$r_{EGSM} < 832 \text{ м.}$$

Расстояние r_{BC} между источником и рецептором помехи для пары БС CDMA - БС EGSM, при котором она может влиять на соотношение $S/(N+I)$, можно найти из неравенства:

$$-13,5 -35,2\log r_{BC} > 0;$$

$$r_{BC} < 413 \text{ м.}$$

Если $r_{BC} < 413$ м, то необходимо оценить уровень $S/(N+I)$, который должен быть больше 9 дБ:

$$S/(N+I) = 19,7+35,2\log(r_{BC}/r_{EGSM}) \geq 9 \text{ дБ.}$$

Для пары МС EGSM - МС CDMA.

Минимально допустимый уровень сигнала, при котором обеспечивается приемлемое качество речи, в системе CDMA равно 5,5 дБ. Внутрисистемные помехи в системе CDMA поднимают минимально допустимый уровень сигнала на 8 дБ. Это значит, что расстояние между МС и БС системы EGSM, r_{CDMA} , при котором уровень сигнала будет больше $5,5+8=13,5$ дБ, находится из условия:

$$52,3-35,2\log r_{CDMA} > 13,5 \text{ дБ};$$

$$r_{CDMA} < 12,7 \text{ км.}$$

Расстояние r_{MC} между источником и рецептором помехи для пары БС CDMA - БС EGSM, при котором она может влиять на соотношение $S/(N+I)$, можно найти из неравенства:

$$-36,7 - 20\lg r_{MC} > 0;$$

$$r_{MC} < 15 \text{ м.}$$

Если $r_{MC} < 15$ м, то необходимо оценить уровень $S/(N+I)$, который должен быть больше 13,5 дБ:

$$89 - 35,2\log r_{CDMA} + 20\lg r_{MC} \geq 13,5 \text{ дБ.}$$

При оценке ЭМС сетей CDMA и EGSM не были учтены потери сигналов на проникновение в здания, автотранспорт и т.д. Влияние этих потерь уменьшает зону обслуживания сотовых сетей связи, но не сказывается на уровнях мешающих сигналов МС EGSM и БС CDMA. Антенны БС обеих систем располагаются на улице, следовательно, потери на проникновение сигнала от БС CDMA к БС EGSM отсутствуют. Расстояние, при котором сигнал МС EGSM может влиять на приемник МС CDMA – невелико, а значит можно считать, препятствия (а следовательно и потери на проникновение) между ними отсутствуют.

Выводы по результатам оценки ЭМС систем EGSM-900 и CDMA-800 в Москве:

Разнос БС CDMA и EGSM на расстояние 410 и более метров, обеспечивает ЭМС БС этих систем. Это расстояние можно уменьшить, применяя специальные преселекторы и/или фильтры.

Разнос МС CDMA и EGSM на расстояние 15 и более метров обеспечивает ЭМС МС этих систем. Но, т.к. расстояние между МС - случайный фактор, обеспечить защитное расстояние между МС – нельзя. Если принять, что МС будут находиться на расстоянии не ближе 0,5 м, то из-за мешающего сигнала МС EGSM, зона обслуживания БС CDMA уменьшается:

$$89-35,2\log r_{CDMA} + 20\lg 0,005 \geq 13,5;$$

$$r_{CDMA} \leq 6,9 \text{ км.}$$

Если учитывать потери на проникновение в здания, автотранспорт и т.д., равные 20 дБ, то на уровень помехи они не скажутся (расстояние между МС 0,5 м,

следовательно, ни о каких потерях проникновения не может быть и речи), а зона обслуживания БС CDMA составит:

$$89-35,2\log r_{\text{CDMA}}+20\lg 0,5 \geq 13,5 + 20;$$

$$r_{\text{CDMA}} \leq 1,85 \text{ км.}$$

Зона обслуживания 1,8 км для системы CDMA вполне приемлема, т.к. она определяется в основном параметрами обратной линии связи, т.е. параметрами сигнала МС CDMA – БС CDMA. Зона обслуживания МС CDMA немного больше зоны обслуживания МС EGSM, и составляет 1...2 км. При уменьшении расстояния между МС до 10 см, зона обслуживания БС CDMA уменьшается до 750 м, что уже нежелательно.

Т. к. нахождение двух одновременно работающих МС двух разных систем CDMA и EGSM на расстоянии меньше полуметра, - событие очень маловероятное, то можно считать, что ЭМС МС CDMA и EGSM – обеспечивается.

3. Прогнозирования ЭМС РРЛ и РЛС

3.1. Исходные данные для прогнозирования ЭМС

- Мощность передатчика РРЛ, $P_{PPJ}=10$ [Вт];
- Частота сигнала передатчика РРЛ, $f_{PPJ}=3500$ [МГц];
- Высота установки антенны передатчика РРЛ, $H_{PPJ}=20$ [м];
- Полоса пропускания передатчика РРЛ, 10 МГц;
- Коэффициент затухания фидера РРЛ равен 0,046 [дБ/м];
- Антенна передатчика РРЛ
 - Пирамидальная рупорная антенна;
 - Параметры раскрыва антенны:
 - $A=0,1$ [м], $B=0,3$ [м];
 - $R_H = 0,5$ [м], $R_E = 0,5$ [м];
 - Поляризация: горизонтальная;
 - Отклонение главного направления передающей антенны РРЛ от направления на приемник РРЛ – 0° .

- Мощность передатчика РЛС, $P_{PJC}=1$ МВт;
- Частота 1-й гармоники передатчика РЛС, $f_{PJC} = 1166$ МГц;
- Высота установки антенны передатчика РРЛ, $H_{PJC}=1$ м;
- Коэффициент затухания фидера передатчика РЛС равен 0,03 дБ/м;
- Длительность импульса РЛС, $\tau = 0,6$ мкс;
- Антенна передатчика РЛС
 - Зеркальная параболическая;
 - $R_0 = 1$ [м] - радиус раскрыва рефлектора;
 - $f = 0,1$ [м] – фокусное расстояние антенны;
 - $n = 4$ - характеризует технологическую точность изготовления антенны;
 - $g = 0,5$ – эффективность зеркальной антенны;
 - Поляризация: круговая;
 - Минимальное отклонение главного направления передающей антенны РЛС, при круговом обзоре, от направления на приемник РРЛ – 0° .

- Частота приема РРЛ, $f_{приема} = f_{PPJ} = 3500$ МГц;
- Полоса пропускания приемника РРЛ, 10 МГц;
- Коэффициент шума приемника, $F = 36$ дБм
- Коэффициент затухания фидера приемника РРЛ равен 0,046 дБ/м;
- Защитное отношение для приемника РРЛ $\Delta = 10$ дБ;
- Антенна приемника РРЛ
 - Пирамидальная рупорная антенна;
 - Параметры раскрыва антенны:
 - $A=0,1$ [м], $B=0,3$ [м];
 - $R_H = 0,5$ [м], $R_E = 0,5$ [м];
 - Поляризация: горизонтальная;
 - Отклонение главного направления приемной антенны РРЛ от направления на передатчик РРЛ – 0° ;
 - Отклонение главного направления приемной антенны РРЛ от направления на передатчик РЛС – 20° ;

- Трасса распространения передатчик РРЛ – приемник РРЛ – прямая видимость (т.е. дифракционные потери отсутствуют);
- Расстояние передатчик РРЛ – приемник РРЛ – 20 км;
- Трасса распространения передатчик РЛС – приемник РРЛ – характеристики трассы неизвестны;
- Расстояние передатчик РЛС – приемник РРЛ – 6 км;

3.2. Анализ параметров источников полезного и мешающего сигналов

1. Мощность передатчиков:

Для передатчика РРЛ: $P_{PPЛ} = 10 \lg(P_{PPЛ} [\text{Вт}] \cdot 1000) = 10 \lg(10 \cdot 1000) = 40$, дБм;

Для передатчика РЛС: $P_{РЛС} = 10 \lg(P_{РЛС} [\text{Вт}] \cdot 1000) = 10 \lg(1000 \cdot 1000) = 60$, дБм.

2. Уменьшение уровня мощности мешающего сигнала на гармониках:

В полосу частот приемника попадает 3 гармоника передатчика мешающего сигнала: $f_{\text{приема}} \approx 3 \cdot f_{РЛС} = 3 \cdot 1166 = 3498$ МГц. При этом уровень мощности гармонических составляющих уменьшается на 64 дБ (из таблицы 1.1.).

3. Потери в фидерах:

Длину фидеров принимаем равной высоте установки антенн передатчиков.

Для передатчика РРЛ:

$$\text{потери} = \text{длина} \cdot \text{коэффициент затухания} = 20 \cdot 0,046 = 0,92, \text{ дБ.}$$

Для передатчика РЛС:

$$\text{потери} = \text{длина} \cdot \text{коэффициент затухания} = 1 \cdot 0,03 = 0,03, \text{ дБ.}$$

4. Усиление антенн:

Усиление пирамидальной рупорной антенны передатчика РРЛ:

$$G_{\text{пер. РРЛ}} = \eta_{\text{руп. а.}} D_{\text{пер. РРЛ}} = 1 \cdot 32,6 = 32,6 \text{ [отн. ед.]}$$

$$D_{\text{пер. РРЛ}} = 4\pi vS/\lambda^2 = 4 \cdot 3,14159 \cdot 0,64 \cdot 0,03 / 0,086^2 = 32,6 \text{ [отн. ед.]}$$

Где $S = A \cdot B = 0,1 \cdot 0,3 = 0,03$ [м²] - площадь раскрыва рупора;

$\lambda = c/f = (3 \cdot 10^8) / (35 \cdot 10^8) = 0,086$ [м] - длина волны излучения РРЛ;

$c = 3 \cdot 10^8$ [м/с] – скорость света;

$\nu = 0,64$ – коэффициент использования поверхности (КИП) рупора.

Коэффициент усиления G зеркальной параболической антенны передатчика РЛС определяется по формуле:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_a g e^{-\sigma^2} = \frac{4 \cdot 3,14159}{0,086^2} \cdot 3,14159 \cdot 0,5 \cdot 0,9999596 = 667,20 \text{ [отн. ед.]}$$

ед.]

Где $\lambda = c/f = (3 \cdot 10^8)/(34,98 \cdot 10^8) = 0,086$ [м] - длина волны 3-й гармоники излучения РЛС;

$n = 4$ - характеризует технологическую точность изготовления антенны;

$R_0 = 1$ [м] $< R_{0 \max} = 0,2\lambda 10^n = 17,2$ [м] – радиус раскрыва рефлектора;

$g = 0,5$ – эффективность зеркальной антенны.

$\sigma = 23,5 \cdot 10^{-2n} (2R_0/\lambda) = 23,5 \cdot 10^{-8} (2/0,086) = 0,00006355$ - дисперсия фазовой ошибки в раскрыве зеркала;

$S_a = \pi \cdot R_0^2 = 3,14159 \cdot 1 = 3,14159$ [м²] – площадь раскрыва антенны;

Таким образом, коэффициент усиления G -

Для антенны передатчика РРЛ:

$$G_{РРЛ} = 10 \lg(G_{РРЛ} \text{ [отн. ед.]} \cdot 1000) = 10 \lg(32,6 \cdot 1000) = 45,13 \text{ [дБм]};$$

Для антенны передатчика РЛС:

$$G_{РЛС} = 10 \lg(G_{РЛС} \text{ [отн. ед.]} \cdot 1000) = 10 \lg(667,2 \cdot 1000) = 58,24 \text{ [дБм]}.$$

5. Уменьшение уровня мощности для частот передатчика, лежащих вне рабочей полосы частот. Учитывается в пунктах 19 и 20, которые дают интегральную оценку потерь вне рабочей полосы.

6. Уменьшение коэффициента усиления антенны передатчика в направлении рецептора определяется в зависимости от ориентации антенны передатчика мешающего сигнала и ее диаграммы направленности.

Т.к. в курсовой мешающий сигнал создается РЛС при круговом обзоре, это означает что, в определенный момент времени рецептор находится точно по направлению максимума диаграммы направленности антенны передатчика РЛС. Передающая антенна РРЛ направлена точно на приемник РРЛ. Это значит, что в строку 6 как для приемника, так и для передатчика записывается 0.

7. Итоговые данные по уровню эффективно передаваемой мощности с помощью расчета параметров передатчиков, полученные результаты сводятся в

таблицу 1.3. Для нахождения результата необходимо сложить все строки таблицы.

Расчет уровня эффективной передаваемой мощности

Параметр	Сигнал		Помеха	
	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ
1. Мощность передатчика	40		60	
2. Уменьшение уровня мощности на гармониках				64
3. Потери в фидерах		0,9		0,03
4. Усиление антенны	45,1		58,2	
5. Уменьшение уровня мощности вне рабочей полосы частот				0
6. Уменьшение коэффициента усиления антенны в направлении рецептора		0		0
7. Уровень эффективной передаваемой мощности	+86,1		+54,2	

3.3. Потери энергии на трассе распространения радиоволн

8. Медианные потери.

Для трассы передатчик РРЛ – приемник РРЛ:

$$A_{мед.} = 32,4 + 20\lg L + 20\lg f = 32,4 + 20\lg 20 + 20\lg(3500\text{МГц}) = 129,3 \text{ [дБ];}$$

Для трассы передатчик РЛС – приемник РРЛ:

$$A_{мед.} = 32,4 + 20\lg L + 20\lg f = 32,4 + 20\lg 6 + 20\lg(3488\text{МГц}) = 118,8 \text{ [дБ];}$$

9. Дифракционные потери.

Т.к. между передатчиком и приемником РРЛ установлена прямая видимость, а характер местности неизвестен, то для сигнала РРЛ дифракционные потери на трассе распространения примем нулевыми.

Т.к. данные о трассе распространения мешающего сигнала РЛС отсутствуют, то для «худшего случая» дифракционные потери берем равными 0 дБ.

10. Замирание сигнала.

Т.к. данные о трассе распространения отсутствуют, то берем запас на замирание полезного сигнала 40дБ.

Т.к. данные о трассе распространения отсутствуют, то для «худшего случая» потери при замирании мешающего сигнала берем 0 дБ.

11. Потери в атмосферных осадках сказываются на частотах выше 5 ГГц. На частотах ниже 5 ГГц потери практически отсутствуют.

12. Суммарные потери на трассе распространения подсчитываются с помощью таблицы 1.3 сложением значений всех строк.

Потери на трассе распространения

Параметр	Сигнал		Помеха	
	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ
8. Медианные потери		129,3		118,8
9. Дифракционные потери		0		0
10. Потери при замирании сигнала (интерференция)		40		0
11. Потери в атмосферных осадках		0		0
12. Суммарные потери на трассе распространения	- 169,3		-118,8	

3.4. Характеристики рецептора

13. Коэффициент усиления приемной антенны.

Приемная антенна РРЛ такая же, как и у передатчика РРЛ, частота принимаемого полезного сигнала примерно равна частоте 3 гармоники мешающего сигнала. Значит КУ приемной антенны равен 45,13 дБ, записываем его в таблицу одинаковым и для сигнала и для помехи.

14. Уменьшение коэффициента усиления приемной антенны в направлении передатчика.

Ширина диаграммы направленности приемной антенны в плоскости Н:

$$BW = \Theta_{0,7} = (80\lambda/A)/2 = (80 \cdot 0,086/0,1)/2 = 34,4^\circ.$$

Отклонение главного направления приемной антенны РРЛ от направления на передатчик РРЛ 0° , значит он находится в зоне главного лепестка приемной антенны, следовательно уменьшение КУ приемной антенны в направлении передатчика РРЛ равно 0.

Отклонение главного направления приемной антенны РРЛ от направления на передатчик РЛС: $20^\circ < BW$, значит РЛС попадает в главный лепесток приемной антенны РРЛ, следовательно, уменьшение КУ приемной антенны в направлении передатчика РРЛ равно 0.

15. Уменьшение коэффициента усиления антенны из-за рассогласования поляризации приемной и передающей антенн выбирается из таблицы 1.4.

Для пары приемник РРЛ – передатчик РРЛ:

горизонтальная поляризация - горизонтальная поляризация = 0 дБ;

Для пары приемник РРЛ – передатчик РЛС:

горизонтальная поляризация - круговая поляризация = 3 дБ;

16. Потери в фидере приемного тракта. Определяются так же, как и для передатчиков. Так как по фидеру приемного тракта идет как сигнал от РРЛ, так и от РЛС, то в таблицу заносится одинаковое значение.

$$\text{потери} = \text{длина} \cdot \text{коэффициент затухания} = 20 \cdot 0,046 = 0,92, \text{ дБ.}$$

17. Суммарное усиление антенны определяется с помощью таблицы 1.5 путем суммирования значений для сигнала и помехи всех строк таблицы.

Суммарное усиление антенны рецептора

Параметр	Сигнал		Помеха	
	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ
13. Коэффициент усиления приемной антенны	45,1		45,1	
14. Уменьшение коэффициента усиление в направлении источника помехи		0		0
15. Уменьшение коэффициента усиления антенны из-за рассогласования поляризаций		0		3
16. Потери в фидерах		0,9		0,9
17. Суммарное усиление антенны	+44,2		+41,2	

18. Мощность на входе приемника определяется по результатам проведенных расчетов по таблице 1.6.

Мощность на входе приемника

Параметр	Сигнал		Помеха	
	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ
7. Уровень эффективной передаваемой мощности	+86,1		+54,2	
12. Суммарные потери на трассе распространения	-169,3		-118,4	
17. Суммарное усиление антенны рецептора	+44,2		+41,2	
18. Мощность на входе приемника – рецептора	-39		-23	

19. Поправка на несовпадение рабочих частот.

Несовпадение частоты приема РРЛ и 3-й гармоники РЛС равно:

$$\Delta F = 3500 - 3498 = 2 \text{ МГц.}$$

Полосы пропускания на уровне 3 дБ приемника РРЛ $B_R=10$ МГц. Полоса пропускания передатчика РЛС $B_T = 2/\pi\tau = 2/(3,14159 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6}) = 1,06$ МГц

Параметр B позволяющий использовать графики на рисунке 1.9. равен:

$$B = (B_R + B_T)/2 = (10+1,06)/2 = 5,53 \text{ МГц.}$$

По графику на рисунке 1.3. поправочный коэффициент $K(\Delta F, B) = 0$ дБ.

20. Поправка на ширину полосы частот.

$B_R > B_T$, следовательно, по таблице 1.7. коррекция на ширину полосы пропускания равна 0 дБ.

21. Чувствительность приемника.

Так как один и тот же приемник обрабатывает полезный и мешающий сигналы, то заданное значение чувствительности приемника учитывается как для сигнала, так и для помехи.

Чувствительность определяется уровнем эффективно передаваемой мощности шума:

$$N = -144 + F + 10\lg B_R = -144 + 36 + 10\lg 10 = -98 \text{ дБм},$$

22. Выигрыш в отношениях S/N и I/N при детектировании

Так как в приемнике РРЛ не предусмотрено никаких специальных средств или приемов по выделению сигналов при детектировании, то отношения S/N и I/N останутся такие же, как и на входе детектора.

23. Отношение S/N и I/N на выходе детектора.

Определим отношения S/N для полезного сигнала и I/N для помехи с помощью таблицы 1.7., просуммировав данные соответствующих столбцов, беря значения строки 21 (чувствительность приемника) со знаком “минус”.

24. Отношение сигнал/(помеха+шум).

Отношение $I/N = 75,02 > 3$, следовательно сигнал/(помеха+шум) определяется по итоговому данным строки 23 таблицы 1.8. следующим образом:

$$S/(N+I) = S/N - I/N = 59,36 - 75,02 = -15,66.$$

Отношение S/N и I/N на входе детектора приемника

Параметр	Сигнал		Помеха	
	+дБ	-дБ	+дБ	-дБ
18. Мощность на входе приемника	-39		-23	
19. Поправка на несовпадение рабочих частот		0		0
20. Поправка на ширину полосы частот		0		0
21. Чувствительность приемника		-98		-98
22. Выигрыш в отношениях S/N и I/N при детектировании	0		0	
23. Отношение S/N и I/N на выходе детектора	+59		+75	
24. Отношение S/(N+I)	-16			

3.5. Оценка условий обеспечения ЭМС

Так как условие $S/(N+I) = -16 \text{ дБ} \geq \Delta = 10 \text{ дБ}$ не соблюдается, -необходимо разработать рекомендации по обеспечению ЭМС, а затем повторить расчет ЭМС, с учетом этих рекомендаций.

4. Задание на курсовую работу

4.1. Анализ ЭМС РРЛ и РЛС

В курсовой работе требуется провести анализ ЭМС радиорелейной линии (РРЛ) и радиолокационной станции (РЛС). По каналам РРЛ передается полезный сигнал, а мешающий сигнал создается РЛС при круговом обзоре. Это значит, что в какой-то определенный момент времени приемник РРЛ находится точно по направлению максимума диаграммы направленности передатчика РЛС.

Схема расположения систем на местности приводится на рис. 4.1.

Исходные данные для курсового проекта определяются по таблицам 4.1 – 4.3. Числа в номере варианте ($K_1 K_2 K_3 \dots K_8$) задают:

число K_1 в первом разряде ($N=1$) номера варианта – задает тип местности, в которой расположены приемник и передатчик РРЛ, передатчик РЛС;

K_2 – расположение на местности.

K_3 – задает частоту сигнала в РРЛ;

K_4 – мощность излучения передатчика РРЛ;

K_5 – характеристики приемника РРЛ;

K_6 – характеристики антенн РРЛ;

K_7 – характеристики РЛС;

K_8 – характеристики антенн РЛС;

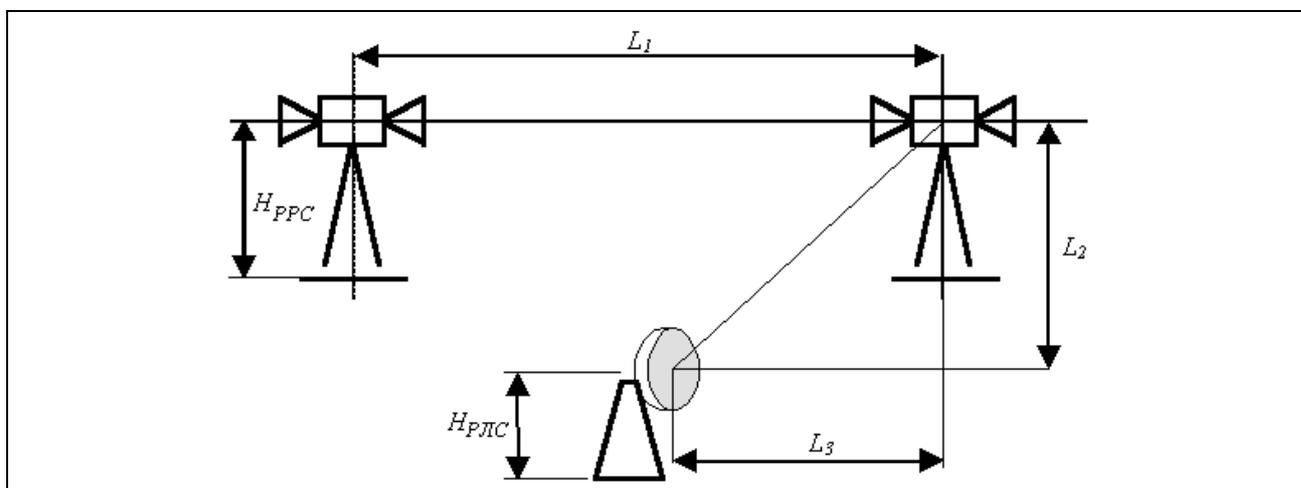


Рис. 4.1. Условная схема расположения систем на местности

Табл. 4.1. Характеристики трасс распространения.

N	Параметр	Число в N-м разряде варианта	
		1	2
Характеристики трасс распространения сигналов			
1	Местность, в которой расположены приемник и передатчик РРЛ, передатчик РЛС	Пригородная местность	Сельская местность
2	L_1 , [км]	25	30
	L_2 , [км]	7	8
	L_3 , [км]	6	5

Табл. 4.2. Характеристики радиорелейной станции.

N	Параметр	Число в N-м разряде варианта		
		1	2	
Характеристики радиорелейной линии				
3	Частота сигнала в РРЛ $f_{РРЛ}$, [МГц]	2350	2300	
Характеристики передатчика РРС				
4	Мощность излучения $P_{РРЛ}$, [Вт]	10	12	
Характеристики приемника РРС				
5	Чувствительность приемника, [дБм]	130	140	
	Полоса пропускания приемника на уровне 3 дБ, [МГц]	10	7	
	Коэффициент затухания фидера, [дБ/м]	0,05	0,05	
	Минимальный уровень сигнала на выходе детектора приемника, [дБм]	9	8	
Характеристики антенн РРС				
6	Характеристики приемопередающих антенн РРС	Тип антенны	Рупорная антенна	Рупорная антенна
		Коэффициент усиления, [дБм]	20	25
		Ширина ДН, °	20	10
		Уровень боковых лепестков	-10	-15
		Поляризация	горизонтальная	горизонтальная
	Коэффициент затухания антенного фидера, [дБ/м]	0,05	0,06	
	Высота установки антенны $H_{РРЛ}$, [м]	20	40	

Табл. 4.3. Характеристики радиолокационной станции.

N	Параметр	Число в N-м разряде варианта		
		1	2	
Характеристики РЛС				
7	Мощность излучения $P_{РЛС}$, [Вт]	1000	1000	
	Основная частота $f_{РЛС}$, [МГц]	1160	1180	
	Длительность импульса РЛС τ , мкс	1	0,7	
Характеристики антенн РЛС				
8	Технические характеристики приемопередающих антенн РЛС	Тип антенны	Зеркальная параболическая антенна	Зеркальная параболическая антенна
		Коэффициент усиления, [дБм]	45	40
		Ширина ДН, °	1	2
		Уровень боковых лепестков	-15	-10
		Поляризация	круговая	круговая
	Коэффициент затухания антенного фидера, [дБ/м]	0,04	0,04	
	Высота установки антенны $H_{РЛС}$, [м]	0,5	1	

4.2. Анализ ЭМС сотовых сетей связи

В качестве задания на курсовую работу может быть задан анализ ЭМС сотовых сетей связи. В этом случае исходные данные определяются по таблице 4.4.

Исходные данные задаются номеров варианта, и типом местности, на которой происходит помеховое взаимодействие. Тип местности может быть:

- городской (г);
- пригородный (п);
- сельский (с).

P.S. Только часть исходных данных имеют реальные значения, остальные подобраны специально для курсового проекта.

Табл. 4.4. Варианты для расчета ЭМС сотовых сетей.

Вариант	Система - рецептор	Помеха	Частота сигнала	Частота помехи
1	CDMA	BC AMPS	873,75 МГц	871,75 МГц
2	CDMA	BC AMPS	875,75 МГц	871,75 МГц
3	CDMA	BC AMPS	875,75 МГц	877,75 МГц
4	CDMA	BC AMPS	879,75 МГц	877,75 МГц
5	CDMA	MC AMPS	828,75 МГц	826,75 МГц
6	CDMA	MC AMPS	830,25 МГц	832,75 МГц
7	CDMA	MC AMPS	834,75 МГц	832,75 МГц
8	CDMA	MC AMPS	836,25 МГц	832,75 МГц
9	AMPS	BC CDMA	871,75 МГц	873,75 МГц
10	AMPS	BC CDMA	877,75 МГц	875,75 МГц
11	AMPS	BC CDMA	877,75 МГц	879,75 МГц
9	AMPS	MC CDMA	826,75 МГц	828,75 МГц
10	AMPS	MC CDMA	832,75 МГц	830,75 МГц
11	AMPS	MC CDMA	832,75 МГц	834,75 МГц
12	CDMA	MC EGSM	881,75 МГц	889,6 МГц
13	EGSM	BC CDMA	889,6 МГц	881,75 МГц

Табл. 4.5. Характеристики БС сотовых сетей.

Параметр	Система сотовой связи		
	CDMA-800	AMPS-800	EGSM-900
Характеристики БС			
Мощность излучения БС, [Вт]	17	10	10
Рабочая частота передатчика БС, [МГц]	873,75	875,75	871,75
	879,75	881,75	877,75
Полоса пропускания на уровне 3 дБ приемника БС, [МГц]	1,2	6	6
Потери радиочастотного кабеля, включая потери на радиочастотном разъеме, [дБ]	3	3	3
Высота установки антенны БС, [м]	30	30	6
Уровень внеполосного излучения БС при отстройке от несущей на 2 МГц и более, дБ	-44	-40	-40
КУ секторной антенны передатчика БС	14	14	14
Чувствительность приемника БС, [дБм]	108	07	107
Требуемое отношение S/(N+I) в системе	13,5	18	9

Табл. 4.6. Характеристики МС сотовых сетей.

Параметр	Система сотовой связи			
	CDMA-800		AMPS-800	EGSM-900
Характеристики МС				
Мощность излучения МС, [Вт]	1		1	1
Рабочая частота передатчика МС, [МГц]	834,75	836,25	832,75	889,6
	828,75	830,25	826,75	
Полоса пропускания на уровне 3 дБ приемника МС, [МГц]	1,2		6	6
Потери радиочастотного кабеля, включая потери на радиочастотном разъеме, [дБ]	0		0	0
Высота установки антенны МС, [м]	1,5		1,5	1,5
Уровень внеполосного излучения МС при отстройке от несущей на 0,5 МГц и более, [дБ]	-60		-60	-60
КУ антенны передатчика МС, [дБ]	0		0	0
Чувствительность приемника МС, [дБм]	120		120	120

