

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R Р.1406-2
(07/2015)

**Эффекты распространения радиоволн,
касающиеся наземных сухопутной
подвижной и радиовещательной служб
в диапазонах ОВЧ и УВЧ**

Серия Р
Распространение радиоволн



Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Приложении 1 к Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2016 г.

© ITU 2016

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1406-2

Эффекты распространения радиоволн, касающиеся наземных сухопутной подвижной и радиовещательной служб в диапазонах ОВЧ и УВЧ

(Вопрос МСЭ-R 203/3)

(1999-2007-2015)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации приводится информация о различных факторах распространения радиоволн, которые способны оказывать влияние на наземные сухопутную подвижную и радиовещательную службы. Эти факторы должны учитываться при разработке и планировании таких служб.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

a) что необходима информация о факторах распространения радиоволн, которые способны оказывать влияние на наземные сухопутную подвижную и радиовещательную службы,

отмечая,

что в Рекомендации МСЭ-R P.2040 представлено руководство в отношении влияния свойств строительных материалов и структур зданий на распространение радиоволн,

рекомендует,

1 что информация, содержащаяся в Приложении 1, должна учитываться при разработке и планировании таких служб.

Приложение 1**1 Введение**

В настоящей Рекомендации приводится информация о различных факторах распространения радиоволн, которые способны оказывать влияние на наземные сухопутную подвижную и радиовещательную службы. Эти факторы должны учитываться при разработке и планировании таких служб.

2 Ослабление под воздействием растительного покрова

Эти потери могут иметь большое значение для сухопутной подвижной службы. Они будут зависеть от категории рельефа местности, занимаемого растительностью объема, а также расположения, плотности застройки и высоты строений. В таблице 1 приводятся сведения об областях применения различных имеющихся Рекомендаций МСЭ-R:

ТАБЛИЦА 1

Рекомендации, в которых рассматривается растительный покров

МСЭ-R P.	Область применения
1546	Корректировка высоты антенны
452	Потери за счет отражения от препятствий
833	Ослабление в растительности (в частности в деревьях)
1058	Базы данных о рельефе местности
1146	Корректировка высоты антенны
1812	Потери в растительности и за счет отражения от препятствий
1238	Планирование систем радиосвязи внутри помещений
2040	Влияние строительных материалов и структур зданий

3 Колебание мощности сигнала**3.1 Общие вопросы**

Мощность принимаемого сигнала будет изменяться в зависимости от времени и места. Сигнал может включать прямую, дифрагированную, отраженную и преломленную составляющие. Качество приема будет зависеть от нескольких факторов, например условий приема, частотных сдвигов, временных задержек и типа модуляции. Аналогичным образом могут приниматься передачи нежелательных сигналов от других источников, совместно использующих те же самые частоты, что и полезный сигнал, или соседние частоты. Эти факторы также должны учитываться при оценке качества обслуживания. Передатчики нежелательных сигналов могут находиться на таком удалении от приемника, что потребуется количественно оценить степень изменения во времени, возникающего при различных аномальных условиях распространения. Сюда можно отнести ситуацию, при которой должна допускаться возможность помех в течение определенного процента времени в различных местах осуществления приема, с тем чтобы сеть(и) могла(и) работать.

Таким образом, оценка приема и определение зоны обслуживания включают анализ полезных и нежелательных сигналов во временной и пространственной областях, а также анализ степени взаимосвязи между ними.

3.2 Режимы замираний

Уменьшение мощности сигнала возникает в случае, если приемник находится в тени деревьев либо зданий, либо естественных препятствий, либо других объектов. В таком случае сигнал попадает в приемник после отклонения от этих препятствий или огибания их, либо после отражения от других объектов. Если размер и форма препятствий известны, то можно попытаться теоретически рассчитать дополнительные потери на трассе, вызванные этими препятствиями. В других случаях, если имеется только общая информация об условиях распространения, оценить потери на трассе можно на основе измерений, проводимых в аналогичных ситуациях. В любом случае, в достаточно малом числе ситуаций невозможно будет получить теоретическую оценку, и потребуется оценка на основе измерений. Такая оценка должна носить статистический характер. Оценка, в основном, включает измерение медианных потерь на трассе для определенного района, а также измерение их дисперсии.

Сигнал может явно изменяться во времени вследствие атмосферных изменений, однако на расстояниях менее порядка 50 км такой вид изменений не представляет особого интереса. Более важной для сухопутной подвижной службы является пространственная изменчивость, которая движущимся приемником воспринимается как изменчивость во времени.

Удобно разделить пространственную изменчивость на два режима: быстрые замирания, вызванные многолучевым распространением, которые возникают на некоторых длинах волн, и более медленные

замирания вследствие изменений затенения. При аналитических измерениях эти два режима можно разделить следующим образом: следует провести ряд измерений через равные отрезки на расстоянии порядка 40 длин волн, и определить для данного расстояния медианный уровень сигнала или потери на трассе. Для получения медианного значения с точностью в пределах 1 дБ и вероятностью 90% требуется провести порядка 36 таких измерений. Критерием, при котором данные условия будут соблюдены, служит расстояние между местами измерений, которое должно быть не менее 0,8 длины волны, с тем чтобы соседние изменения были некоррелированными. Данная процедура повторяется при других отрезках расстояний в 40 длин волн, до тех пор пока не будет охвачен интересующий район. Как показывает опыт, распределение этих медианных значений будет логарифмически нормальным, и следовательно, такое распределение можно описать с помощью медианы и стандартного отклонения. Данное распределение является распределением колебаний мощности сигнала, вызванных затенением, при исключении влияния колебаний, вызванных многолучевым распространением.

3.2.1 Затенение

Проводится ряд измерений для получения распределения колебаний мощности сигнала, вызванных затенением. Важно определить, является ли интересующий район большим по размеру (т. е. все трассы заданной длины вокруг базового передатчика или все трассы заданной длины в географическом районе) или небольшим (т. е. район размером несколько сот метров, на протяжении которых профиль трассы и общие условия приема изменяются незначительно). Изменчивость сигнала будет больше в большом районе, чем в небольшом.

В сельских районах для всех трасс заданной длины стандартное отклонение, σ_L , соответствующее распределению изменчивости в зависимости от места, можно оценить следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_L &= 6 + 0,69 \left(\frac{\Delta h}{\lambda} \right)^{1/2} - 0,0063 \left(\frac{\Delta h}{\lambda} \right) && \text{дБ при } \Delta h/\lambda < 3\,000, \\ \sigma_L &= 25 && \text{дБ при } \Delta h/\lambda > 3\,000 \end{aligned} \quad (1)$$

где:

Δh : интердецильный размах высоты (м)

λ : длина волны (м)

$\lambda = 300/f$

f : частота (МГц).

В равнинных городских районах стандартное отклонение в большом районе можно оценить следующим образом:

$$\sigma_L = 5,25 + 0,42 \log(f/100) + 1,01 \log^2(f/100) \quad \text{дБ.} \quad (2)$$

Данная формула справедлива на частотах от 100 МГц до 3000 МГц.

Стандартное отклонение изменчивости в зависимости от места в небольших районах менее изучено. Считается, что оно зависит от растительного покрова, но характер данной зависимости неочевиден. Имеются некоторые данные, что стандартное отклонение уменьшается с увеличением расстояния от передатчика, но это не всегда очевидно. Следующая формула (3), в которой сохраняется частотная зависимость из формулы (2), дает приближенную оценку на основе ряда измерений в диапазоне УВЧ на расстояниях до 50 км и при всех типах растительного покрова:

$$\sigma_L = 2,7 + 0,42 \log(f/100) + 1,01 \log^2(f/100) \quad \text{дБ.} \quad (3)$$

В Рекомендации МСЭ-R P.1546 приведено другое эмпирическое выражение для таких замираний, вызванных затенением.

3.2.2 Замирания, вызванные многолучевым распространением

В масштабе нескольких длин волн изменчивость сигнала определяется влиянием многолучевого распространения. Ожидается, что как минимум будет присутствовать отраженная от земли составляющая, в результате чего на практике всегда наблюдается многолучевое распространение. Это многолучевое распространение, как правило, приводит к тому, что канал подпадает под определение "релеевского" или "райсовского" канала.

В рассмотренном ранее случае принятый сигнал является суммой многих составляющих с независимыми замираниями, который можно представить с помощью релеевского распределения (см. Рекомендацию МСЭ-R P.1057). Такой канал является характерным для узкополосной сотовой подвижной службы, работающей в городском районе со множеством препятствий, при отсутствии прямой видимости до передатчика.

Райсовские каналы характерны для ситуации, при которой одна из составляющих принимаемого сигнала, например та, которая распространяется от передатчика по трассе прямой видимости, обладает постоянной мощностью в масштабе времени замираний, вызванных многолучевым распространением. В этом случае для моделирования общих замираний сигнала можно использовать распределение Накагами-Райса (см. Рекомендацию МСЭ-R P.1057). Это распределение обычно выражают как функцию параметра K ("коэффициент Райса"), который определяется как отношение мощности постоянной составляющей сигнала к мощности случайной составляющей. При $K = 0$ это распределение становится релеевским.

3.3 Отражения от местных предметов

Поступающие в подвижный приемник радиоволны могут отразиться от земли и от близлежащих объектов, например зданий, деревьев и машин. Отраженная от земли волна когерентна с прямой волной, и она приводит к изменению принимаемого сигнала при изменении высоты антенны приемника. Однако у отраженных от близлежащих объектов волн амплитуды и фазы являются случайными.

Конструктивная и деструктивная интерференция прямых и отраженных волн создает интерференционную картину, при которой расстояние между минимумами составляет не менее половины длины волны.

В городских или лесных районах существует много отраженных волн, и в случае измерения на расстояниях в несколько десятков длин волн мгновенные значения напряженности поля имеют приблизительно релеевское распределение.

Такая интерференционная картина приводит к быстрым замираниям сигнала в подвижном приемнике, а отражения от движущихся машин могут вызвать замирания сигнала даже в стационарном приемнике.

Характерны замирания в 30 дБ ниже среднего уровня.

Отражения от местных предметов также могут быть полезны тем, что устраняют до некоторой степени зоны радиотени.

3.4 Корреляция сигнала

Корреляция средней принимаемой мощности сигналов от различных источников играет важную роль при оценке отношения сигнала несущей к помехе, C/I .

Пусть C – мощность полезной несущей (дБ) со средним значением C_m и стандартным отклонением σ_C , а I – мощность (дБ) одного источника помех со средним значением I_m и стандартным отклонением σ_I , тогда среднее значение отношения C/I , $(C/I)_m$, равно:

$$(C/I)_m = C_m - I_m \quad \text{дБ.} \quad (4)$$

Это значение не зависит от корреляции.

Стандартное отклонение отношения C/I , $\sigma_{C/I}$, равно:

$$\sigma_{CI} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_I^2 - 2\rho\sigma_c\sigma_I}, \quad (5)$$

где ρ – коэффициент корреляции. В случае, если $\sigma = \sigma_I = \sigma_c$, уравнение (5) упрощается:

$$\sigma_{CI} = \sigma \sqrt{2(1-\rho)}. \quad (6)$$

Коэффициенты корреляции, которые определяются из наборов выборочных данных о принимаемой мощности, показывают, что при приеме с противоположных направлений не наблюдается значительной корреляции. В случае если разница между углами прихода сигнала в подвижный приемник меньше, существует значительная корреляция. Типовые значения ρ для расположенных в одном месте источников в сельскохозяйственных и густо поросших лесом районах составляют 0,8–0,9. В городских районах корреляция, в основном, ниже (ρ составляет 0,4–0,8). В горных районах, по большей части, корреляция чрезвычайно низкая. Однако в отдельных случаях в горных районах наблюдаются значения $\rho > 0,8$.

4 Разброс задержки

Многие типы радиосистем, в частности те, в которых используются цифровые методы, чувствительны к многолучевому распространению сигнала, возникающему из-за характеристик трассы. Это явление возникает вследствие прихода вслед за прямым сигналом ряда отраженных сигналов. Используя значения амплитуд и временных задержек этих сигналов можно рассчитать импульсную характеристику канала (CIR). Некоторые параметры, описывающие канал распространения, можно извлечь из CIR (см. Рекомендацию МСЭ-R P.1407).

Одним из важных параметров является среднеквадратический разброс задержки, S , задаваемый в уравнениях (3) и (4) Рекомендации МСЭ-R P.1407. Эффективным показателем степени временной задержки является разброс задержки при многолучевом распространении, T_m , равный:

$$T_m = 2 S. \quad (7)$$

Использование конкретной схемы модуляции влияет на то, какой из рассмотренных выше параметров является наиболее эффективным.

4.1 Влияние на качество работы системы

В зависимости от соотношения разброса задержки и длительности символа различные явления оказывают влияние на коэффициент ошибок по битам. Фаза многолучевых сигналов быстро изменяется в пространстве и с частотой. При использовании в схемах модуляции какой-либо угловой модуляции, например относительной фазовой манипуляции (ОФМн), эти фазовые изменения приводят к так называемым неустраняемым погрешностям, сохраняющимся даже при больших отношениях сигнала к шуму. До тех пор пока разброс задержки меньше длительности символа, неустраняемые погрешности зависят в большей степени от разброса задержки, чем от точной формы импульсной характеристики. Однако если разброс задержки превышает длительность символа, возникают межсимвольные искажения, которые в большей степени зависят от формы CIR.

4.2 Задержка сигналов, вызванная местными рассеивающими объектами

Сигналы с небольшими задержками часто возникают в районах с равномерным распределением местных рассеивающих объектов. Такие сигналы, в основном, встречаются в городских и пригородных районах, в которых отсутствует прямая видимость на больших расстояниях до крупных отражающих объектов (гор, холмов). Равномерное распределение отраженных сигналов, как правило, приводит к тому, что импульсные характеристики являются равномерными (см. также Рекомендацию МСЭ-R P.1238). Иногда обнаруживаются сильные отраженные сигналы, приводящие к тому, что помимо равномерного участка в импульсной характеристике образуется неравномерный участок. Кроме того, неравномерности в импульсных характеристиках наблюдаются при пересечении улиц.

Типовые значения среднеквадратического разброса задержки, наблюдаемого в городских и пригородных районах, находятся в пределах 0,8–3 мкс. Для высокоскоростных систем передачи данных могут потребоваться более подробные данные об импульсной характеристике. При проведении соответствующих подробных расчетов мощности сигнала для многолучевых сигналов используются методы отслеживания траектории луча и методы возбуждения луча в сочетании с применением данных о зданиях с высоким разрешением.

4.3 Задержка сигналов, вызванная крупными удаленными рассеивающими объектами

Сигналы с большой задержкой, в основном, возникают в районах, в которых горы расположены рядом с равнинным участком, например долиной. Данное явление, в частности, наблюдается там, где обширные равнинные районы соседствуют с одним горным хребтом, при этом уменьшается эффект ослабления влияния за счет других горных хребтов. Наблюдаемые типовые значения составляют до 25 мкс.

Мощность прямого сигнала следует рассчитывать с использованием соответствующих метода и пределов, в которых данный метод является справедливым, определенных в Рекомендации МСЭ-R P.1144. Мощность отраженных сигналов можно рассчитать по формуле (8):

$$P_{rs} = \frac{P_t G_t G_r}{32\pi^3} \left(\frac{\lambda}{r_1 r_2} \right)^2 \Gamma A \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2, \quad (8)$$

где:

- P_{rs} : мощность принятого сигнала
- P_t : выходная мощность передатчика
- G_t : эффективное усиление передающей антенны (включая потери в линии и фильтре)
- G_r : эффективное усиление приемной антенны (включая потери в линии и фильтре)
- λ : длина волны в тех же единицах измерения, что r_1 и r_2
- r_1, r_2 : расстояния от плоскости рассеяния (поверхности гор) до передатчика и приемника
- Γ : отражательная способность плоскости рассеяния
- A : площадь плоскости рассеяния в тех же единицах измерения (в квадрате), что r_1 и r_2
- θ_1, θ_2 : острые углы, которые образует нормаль к плоскости рассеяния с лучами до передатчика и приемника.

Приведенная выше формула (8) не учитывает вертикальный угол, но она должна достаточно точно подходить для работы сухопутной подвижной службы. Следует также отметить, что данная формула будет менее точной при наличии туннелей и других преломляющих сред. В крайних случаях формула может быть совершенно неприменима, если отражающий объект, который обычно учитывается, больше не находится в пределах прямой видимости радиосигнала или наоборот, если сторона горы, которая обычно расположена за пределами прямой видимости, оказывается в пределах прямой видимости.

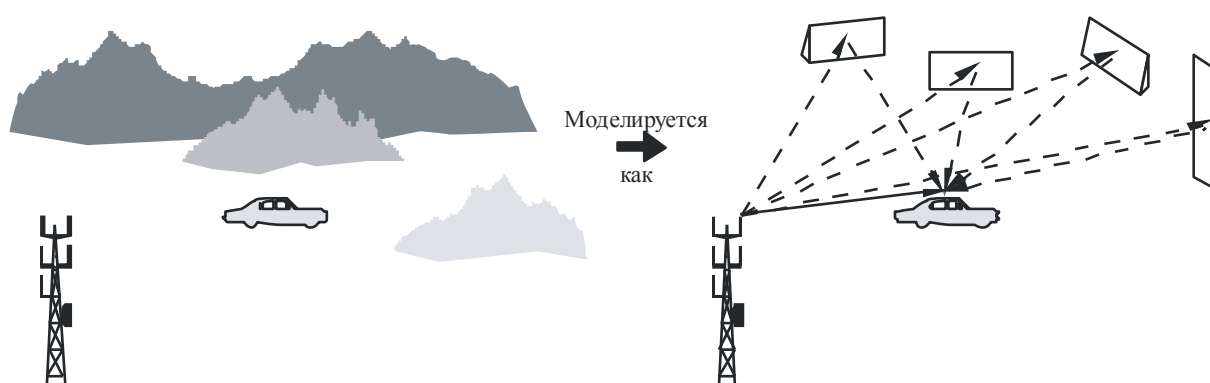
Для простоты и скорости расчета каждый горный хребет рассматривается как одна плоскость рассеяния с такой же азимутальной ориентацией, как и гребень горного хребта. Площадь A представляет собой площадь участка хребта, расположенного в пределах ширины лучей по половинной мощности как передающей, так и приемной антенн, и не затененного ни для одной антенны. Параметры r_1 , r_2 , θ_1 , и θ_2 рассчитываются по центру вышеупомянутого участка горного хребта.

Если участок горного хребта, создающий отражение, затенен либо для передающей, либо для приемной станции расположенным ближе горным хребтом, так, что отражающая область дальнего хребта разделена на секции, то расчет производится таким образом, что незатененные участки считаются отдельными горными хребтами. Данный метод изображен на рисунке 1.

Отражательная способность, Γ , может принимать значения от 0,001 до 0,2 (от -30 дБ до -7 дБ). Для гор, поросших лесом, отражательная способность вряд ли превышает 0,05 (-13 дБ). Для гор, лишенных растительности, маловероятно, что отражательная способность превысит 0,2 (-7 дБ).

Любые потери за счет отражения от препятствий, используемые при расчете прямого сигнала, должны применяться при расчете отраженного сигнала.

РИСУНОК 1
Моделирование прямых и отраженных сигналов



P.1406-01

5 Эффекты в антенне

5.1 Эффекты поляризации

5.1.1 Явление деполяризации в условиях сухопутной подвижной службы

В условиях сухопутной подвижной службы степень исходной поляризации части передаваемой энергии или всей энергии может уменьшиться вследствие дифракции и отражения радиоволны. Данный эффект деполяризации удобно учитывать с помощью коэффициента выделения кроссполяризации (XPD), определенного в Рекомендации МСЭ-R P.310.

Измерения XPD в диапазоне 900 МГц показывают, что:

- XPD мало зависит от расстояния;
- среднее значение XPD в городских и жилых районах находится в пределах 5–8 дБ и составляет свыше 10 дБ на открытых участках;
- средняя корреляция между вертикальной и горизонтальной поляризациями равна 0.

XPD увеличивается с уменьшением частоты примерно до 18 дБ при 35 МГц.

XPD имеет логарифмически-нормальное распределение со стандартным отклонением, которое несколько зависит от частоты. Средняя величина разности между значениями 10% и 90% (в диапазоне частот от 30 МГц до 1000 МГц) составляет порядка 15 дБ. Наблюдения в этом вопросе показали наличие незначительной разницы в зависимости от того, является ли исходная поляризация вертикальной или горизонтальной.

Обнаружено два типа изменений эффекта поляризации во времени. Первый тип представляет собой изменения, возникающие под воздействием электрических свойств земли, меняющихся в зависимости от погодных условий. Данный эффект наиболее ярко выражен в области более низких

частот. Изменения второго типа вызваны подвижностью деревьев, которая приводит к появлению замираний за счет деполяризации величиной в несколько децибел по амплитуде при достаточно умеренных скоростях ветра.

5.1.2 Поляризационное разнесение

В связи со значительной величиной рассеяния сигнала в городских и жилых районах и, как следствие, низких значения XPD, полезным методом улучшения приема может являться поляризационное разнесение. Основным вариантом является использование базовой станцией двух ортогональных линейных поляризаций.

Альтернативой разнесению является использование круговой поляризации базовой станцией и линейной поляризации подвижным терминалом, при котором, несмотря на рассогласование по поляризации 3 дБ, можно добиться преимуществ с точки зрения деполяризации за счет рассеяния и обеспечить более постоянный уровень принимаемого сигнала в условиях подвижной службы.

5.2 Выигрыш за счет высоты: базовая и подвижная станции

Выигрыш за счет высоты означает изменение мощности принимаемого сигнала в зависимости от высоты антенны. Несмотря на то что мощность, как правило, увеличивается с высотой (положительный выигрыш за счет высоты), она может также уменьшаться с высотой (отрицательный выигрыш за счет высоты). При отсутствии местных препятствий прямой сигнал может взаимодействовать с отраженным от земли лучом того же самого приемника. Изменение результирующей напряженности поля в вертикальном направлении представляет собой серию максимумов и минимумов, ввиду того, что из-за геометрии трассы два сигнала приходят в фазе или в противофазе.

На практике, в частности в подвижных приемниках, эффект двулучевого распространения уменьшается под влиянием препятствий и других отраженных сигналов, и на частотах выше 200 МГц в большинстве ситуаций им можно пренебречь. Вместо этого, как правило, оказывается, что при поднятии антенны очевидно уменьшаются потери за счет отражения от препятствий, что приводит к увеличению мощности принимаемого сигнала с высотой. В связи с тем, что высота антенны, таким образом, связана с потерями за счет отражения от препятствий, данный вид выигрыша за счет высоты можно распределить по типу земного покрова, в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.370. В других методах прогнозирования, в особенности тех, в которых используется база данных о рельефе местности, высота антенны часто напрямую используется при расчете потерь за счет отражения.

Для базовых станций, действующих на частотах ниже 200 МГц и расположенных на открытых участках, в некоторых случаях может наблюдаться эффект двулучевого распространения, так что возможно потребуются изменить положение антенны, чтобы не допустить отрицательного выигрыша за счет высоты. Такие эффекты трудно прогнозировать точно, поскольку для этого требуются подробные данные о профиле рельефа местности и точках отражения. На частотах свыше 200 МГц за счет более коротких длин волн данная конкретная проблема уменьшается, а в диапазоне УВЧ и выше ей можно пренебречь.

5.3 Корреляционное/пространственное разнесение

Пространственное разнесение целесообразно использовать для антенн со взаимной корреляцией, составляющей вплоть до 0,7. В целом, это условие приводит к тому, что разнесенный прием на переносимое и подвижное оборудование почти практически нецелесообразен. Однако в случае базовой станции возможно применение ряда методов для уменьшения взаимной корреляции между антеннами. К двум наиболее целесообразным методам относится вертикальный и горизонтальный разнос.

Чтобы уменьшить взаимную корреляцию до 0,7 или еще меньше, вертикально расположенные антенны должны быть разнесены приблизительно на 17 или более длин волн. В зависимости от относительной ориентации плоскостей антенн по отношению к направлению движения подвижного оборудования более эффективным может быть горизонтальный разнос. Если вертикальная плоскость,

проходящая через антенны, перпендикулярна движению подвижного оборудования, взаимная корреляция будет приблизительно такой же, как при вертикальном разnose. При оптимальной ориентации горизонтальные антенны можно разносить до 8 длин волн. Следует помнить, что почти оптимальную ориентацию можно сохранить только в особых случаях, например в системах, использующих секторные антенны.

5.4 Реально достижимое усиление антенны автомобильной подвижной станции

В связи с тем что автомобильные подвижные станции обычно работают в условиях многолучевого распространения, не удивительно, что усиление подвижной антенны в большинстве случаев не будет соответствовать усилению, измеренному на антенном полигоне. Кроме того, даже в условиях прямой видимости и отсутствия многолучевого распространения, вертикальный угол прихода не обязательно совпадает с горизонтальной плоскостью. Действительно, на практике бывают случаи, при которых вертикальный угол прихода может превышать 10° . В последнем случае вертикальный угол прихода вполне может прийти на нулевой уровень или на боковой лепесток, а не на главный лепесток диаграммы направленности антенны подвижной станции в вертикальной плоскости.

Испытания по измерению антенн подвижных станций с расчетным усилением в 3 и 5 дБ для четвертьволнового вертикального несимметричного вибратора в практических условиях показали, что их фактические значения усиления редко соответствуют значениям, измеренным на антенном полигоне. В условиях многолучевого распространения или в понятной ситуации при высоких углах прихода ($>2^\circ$), практическое усиление любой антенны составляет приблизительно 1,5 дБ для вертикального несимметричного вибратора в диапазоне расстояний не менее, чем до 55 км. В понятной ситуации при низких углах места можно реально достичь полного усиления.

6 Эффекты в переносимом оборудовании

6.1 Потери на входе в здание

Потери распространения, возникающие при входе в здание, могут существенно изменяться в зависимости от типа здания и строительных материалов. Также важны частота сигнала и угол его падения. Следовательно, значения потерь могут меняться в пределах от нескольких децибел до многих десятков децибел.

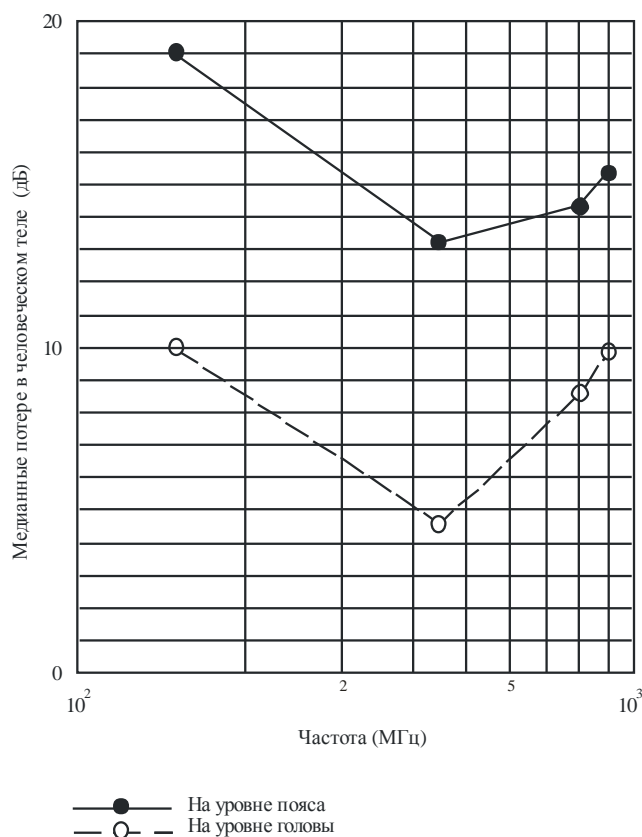
В Рекомендации МСЭ-R P.2040 представлена информация о потерях, которые испытывают радиосигналы при входе в здания и выходе из них. После захода в здание могут возникать дополнительные потери, вызванные его внутренним строением и тем, что в нем находится, но этот вопрос рассматривается в Рекомендации МСЭ-R P.1238.

6.2 Потери в человеческом теле

Присутствие человеческого тела в поле вокруг переносимого приемопередатчика, сотового телефона или приемника пейджинговой связи, может ухудшить фактическое качество антенны – чем ближе антенна находится к телу, тем больше ухудшение. Как показано на рисунке 2, этот эффект также зависит от частоты, о чем свидетельствует недавнее подробное исследование по переносимым приемопередатчикам, проведенное на четырех широко используемых частотах.

РИСУНОК 2

Типовые потери в человеческом теле: переносимый приемопередатчик



P.1406-02

При рассмотрении приемников пейджинговой связи нельзя говорить лишь о "потере в человеческом теле", потому что антенна приемника встроена в блок. По этой причине чувствительность приемника пейджинговой связи, в основном, определяется в терминах напряженности поля (как правило, в мкВт/м). Однако полезно знать какое усиление обеспечивает типовая встроенная антенна, если пейджер носится на боку. В таблице 2 показаны значения для конкретного пейджера на трех различных частотах.

ТАБЛИЦА 2

Усиление приемника пейджинговой связи

Частота (МГц)	Усиление антенны (дБ)
160	-25
460	-22
930	-19

7 Направленное распространение

Распространение можно считать "направленным", в случае если фронт волны не может свободно распространяться в трех измерениях. В качестве примеров можно привести волновое тропосферное распространение, связь в "уличных каньонах", а также технологии, используемые в линиях передачи, в частности в волноводах.

В разделе 7.1 рассматривается распространение по туннелям, которое следует учитывать в случае, когда радиосигнал приходит на любом конце или излучается антенной внутри туннеля. В разделе 7.2 рассматривается тесно связанная тема излучающих фидеров.

7.1 Распространение в туннелях

В автомобильных и железнодорожных туннелях радиосистемы, в основном, нужны для радиовещательной и подвижной телефонной служб, а в шахтах и иных подземных сооружениях – для целей безопасности и эксплуатации.

Распространение в туннелях, для которого характерна некоторая закономерность, можно выразить в терминах теории волноводов. В зависимости от частоты, радиоволны будут распространяться по длине туннеля в виде поперечной электрической (ТЕ) или поперечной магнитной волн, в которых электрическая и магнитная составляющие, соответственно, располагаются только в поперечном направлении к оси туннеля. У каждого типа волны есть критическая частота, ниже которой волна не будет распространяться. Выше своей критической частоты волна каждого типа распространяется со своими собственными коэффициентами распространения и фазы. Тип волны с наименьшей частотой определяет предельную частоту волновода, ниже которой распространение неосуществимо. Для прямоугольных волноводов предельная частота соответствует длине волны, равной удвоенной ширине более длинной стороны. Для сложнопрофильного туннеля применима следующая аппроксимация: длина волны равна периметру поперечного сечения.

Для обычных транспортных или пешеходных туннелей частоты радиослужб ОВЧ диапазона, как правило, находятся выше предельной частоты, а УВЧ диапазона – гораздо выше.

На частотах гораздо выше предельной распространение в туннеле можно также выразить в терминах лучевой теории, и в общем, данная теория является более приемлемой, поскольку длина волны становится очень малой по сравнению с поперечным сечением туннеля. Туннель со сторонами, которые сопоставимы с длиной волны, будет обеспечивать распространение за счет отражений от стен при углах скольжения, при которых большинство материалов демонстрируют высокие коэффициенты отражения. Вследствие большого числа имеющихся трасс отраженных сигналов распространение обладает многолучевыми характеристиками с релеевским или райсовским замиранием.

Препятствия в туннеле будут создавать радиоволны с частотами, значительно выше предельной, которые, в основном, будут рассеиваться под большими углами, и следовательно, будут прерывать процесс отражений при скользящем падении. Сразу за препятствием возникнут дифракционные потери за счет затенения.

Конкретные значения коэффициента ослабления при распространении в туннелях существенно различаются и, в частности, зависят от неоднородностей и изменений в направлении туннеля, а также от препятствий, включая транспорт. В типовом автомобильном туннеле типичным может считаться ослабление в пределах от 0,1 до 1 дБ/м, однако несомненно, могут существовать значения, выходящие за эти пределы. В связи с одновременным существованием многих типов волн выше критической частоты, в зависимости от обстоятельств, коэффициент ослабления может либо увеличиваться, либо уменьшаться с увеличением частоты.

7.2 Излучающие фидеры

Излучающие фидеры широко используются для преодоления препятствий на пути распространения волн в туннеле и зачастую являются единственными практическими средствами обеспечения работы служб на частотах ниже предельной, например радиовещательной службы на средних волнах.

Если сигналы радиослужб, которые должны обеспечиваться, передаются по коаксиальному кабелю, проложенному по длине туннеля на некотором удалении от его стены, и если во внешнем проводнике имеется зазор, то часть энергии будет излучаться внешним проводником в виде поперечной электромагнитной волны типа ТЕМ между внешним проводником коаксиального кабеля и стенами туннеля. Данный процесс называется преобразованием типов волн. Неоднородности в системе коаксиальный кабель-тоннель, включая крепежную арматуру фидера, также будут приводить к преобразованию типов волн. В целях управления процессом преобразования типов волн в ряде систем используются секции из неизлучающих фидеров со вставленными дискретными устройствами для преобразования типов волн.

Конструкция систем излучающих фидеров приспособляется к конкретным условиям. Практическая проблема заключается в высоких потерях за счет переходного затухания между излучающим фидером и подвижными терминалами, в случае если фидер крепится близко к стенам тоннеля, в то время как по практическим соображениям, касающимся зазора, не допускается крепление далеко от стены.

8 Изменения во времени

Помимо места и характера рельефа местности напряженность поля принимаемого сигнала будет изменяться во времени.

В таблице 3 приведено стандартное отклонение изменчивости во времени, σ_f .

ТАБЛИЦА 3
Стандартное отклонение σ_f

Диапазон	d (км)	σ_f (дБ)			
		50	100	150	175
ОВЧ	Суша и море	3	7	9	11
УВЧ	Суша	2	5	7	
	Море	9	14	20	

При определенных радиометеорологических условиях может возникнуть явление волноводного тропосферного распространения, вызывающее существенное увеличение сигнала, которое приводит к возможным помехам (см. Рекомендацию МСЭ-R P.452). Эти эффекты имеют прерывистый и кратковременный характер.