



2.4. Особенности распространения радиоволн разных диапазонов частот

Общая характеристика распространения радиоволн. При работе систем радиосвязи в земных условиях уровень радиосигнала, принятого после его прохождения по трассе распространения от передающей антенны, зависит от характеристик местности на трассе, а также от изменчивости тропосферы и ионосферы в зависимости от сезона года, времени суток и ряда других условий. Вследствие этого радиосигнал на входе приемника имеет паразитные амплитудно-фазовые случайные изменения, которые, как общее явление, принято называть замиранием. В ряде случаев в зависимости от специфики условий распространения радиосигнала замирания имеют конкретные названия, например, мерцание, общие замирания, частотно-селективные замирания и т.д.

Существуют восемь механизмов (видов) распространения радиоволн, а именно: через тропосферный волновод, посредством земной волны, ионосферной волны, пространственной волны (состоящей из прямой волны и отраженных волн от различных поверхностей и слоистых неоднородностей атмосферы), за счет дифракции, путем тропосферного рассеяния, в пределах прямой видимости и, наконец, из-за рассеяния гидрометеорами. На рис. 2.32 и 2.33 схематично показаны основные из перечисленных выше механизмов распространения сигналов. При этом на рис. 2.32 показаны долгосрочные механизмы распространения сигналов (тропосферное рассеяние, дифракция и прямая видимость), которые могут являться носителями как полезного (ПС), так и мешающего (МС) сигналов. На рис. 2.33 показаны краткосрочные механизмы распространения сигналов, обусловленные возникновением в тропосфере аномальных условий, таких, как инверсное изменение температуры с высотой, выпадение гидрометеоров, появление тропосферного волновода и др. Данные механизмы распространения в силу их краткосрочности действия являются только носителями МС, хотя также вызывают и увеличение уровней ПС.

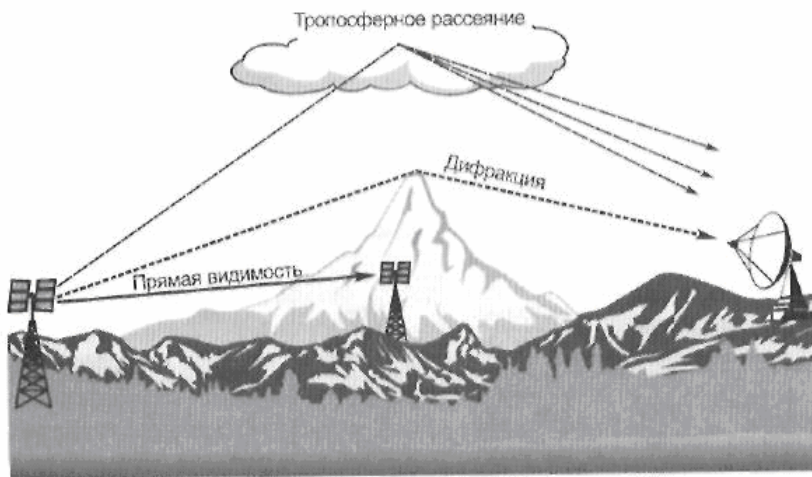


Рис. 2.32. Долгосрочные механизмы распространения сигналов

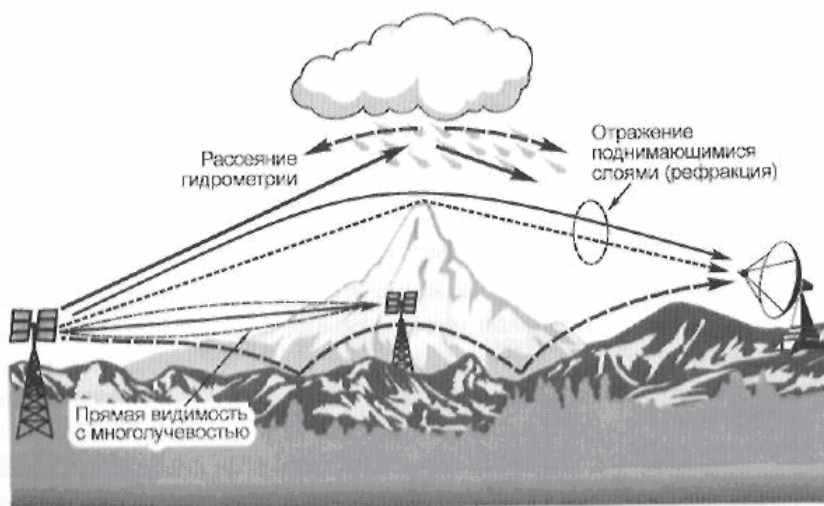


Рис. 2.33. Аномальные (краткосрочные) механизмы распространения сигналов

Для решения задач ЭМС в общем случае требуется знать характеристики распространения как ПС, так и МС, которые для повышения надежности статистических данных принято различать, а именно: данные для ПС соответствуют области значений уровней ниже его медианного значения, а для МС — в области уровней выше его медианного значения. Однако в зависимости от вида конкретной задачи и алгоритма ее решения бывает достаточно располагать только характеристиками распространения МС. Как пример можно привести методику расчета координационного расстояния (КР) и координационной зоны (КЗ), которая содержится в Регламенте радиосвязи и Рекомендациях МСЭ и основана на концепции худшего воздействия МС.

В табл. 2.9 приведены сводные данные о видах распространения радиоволн, дальности их действия, использовании полос частот и возможных уровнях помех для диапазонов частот от ОНЧ до КВЧ [25].

Таблица 2.9. Данные о видах распространения радиоволн

Диапазон	Частота	Вид	Дальность	Ширина	Дальность действия помех	Использование
ОНЧ	3...30 кГц	Волновод	Несколько тысяч км	Очень ограничена	Очень большая	В мировом масштабе, радионавигационная и стратегическая связь на большие расстояния
НЧ	30...300 кГц	Земная волна, ионосферная волна	Несколько тысяч км	Очень ограничена	Очень большая	Радионавигационная и стратегическая связь на большие расстояния
СЧ	0,3...3 МГц	Земная волна, ионосферная волна	Несколько тысяч км	Средняя	Очень большая	Связь пункта с пунктом на средние расстояния, радиовещательная и морская подвижная связь
БЧ	3...30 МГц	Ионосферная волна	До нескольких тысяч км	Широкая	Очень большая	Связь пункта с пунктом на большие и короткие расстояния, глобальное радиовещание, подвижная связь
ОБЧ	30...300 МГц	Пространственная волна, тропосферное рассеяние, дифракция	До нескольких сотен км	Очень широкая	Ограниченная	Связь пункта с пунктом на короткие и средние расстояния, подвижная связь, локальные сети, звуковое и телевизионное радиовещание, персональная связь
УВЧ	0,3...3 ГГц	Пространственная волна, тропосферное рассеяние, дифракция, в пределах прямой видимости	≤ 100 км; земля-космос	Очень широкая	Ограниченная	Связь пункта с пунктом на короткие и средние расстояния, подвижная связь, локальные сети, звуковое и телевизионное радиовещание, персональная связь, спутниковая связь
СВЧ	3...30 ГГц	В пределах прямой видимости	≤ 30 км; земля-космос	Очень широкая, до 1 ГГц	Обычно ограниченная	Связь пункта с пунктом на короткие расстояния, звуковое и телевизионное радиовещание, локальные сети, подвижная/персональная связь, спутниковая связь
КВЧ	30...300 ГГц	В пределах прямой видимости	≤ 20 км; земля-космос	Очень широкая, до 10 ГГц	Обычно ограниченная	Связь пункта с пунктом на короткие расстояния, микросотовые сети, локальные сети, персональная связь, спутниковая связь

Наиболее полные и надежные данные по распространению радиоволн представлены в основных Рекомендациях МСЭ серии Р [25–74], содержание которых отражает реальную и очень сложную ситуацию в этом вопросе. Следует отметить, что общее число Рекомендаций серии Р составляет несколько десятков и для их корректного использования имеется Рекомендация Р.1144 [26], которая является кратким руководством по практическому применению Рекомендаций серии Р в зависимости от вида службы связи.

Ниже рассматриваются основные особенности распространения радиоволн различных диапазонов частот и основные методы прогнозирования характеристик распространения ПС и МС.

2.4.1. Особенности распространения полезных радиосигналов

Диапазон частот 10 кГц...30 МГц. На частотах ниже 30 кГц потери при распространении радиосигналов приближаются к уровню потерь при распространении в свободном пространстве. На ОНЧ прохождение радиоволн в режиме волноводного распространения между ионосферой и поверхностью Земли может наблюдаться в глобальном масштабе.

В этом диапазоне частот важно учитывать два различных режима распространения: режим земной волны, который часто определяет уровни ПС, и режим ионосферной волны, с помощью которого часто распространяются МС. Амплитуда отраженного от ионосферы сигнала характеризуется выраженными суточными колебаниями из-за изменений уровня поглощения в ионосфере. Природа ионосферного распространения предполагает, что линии связи большой протяженности будут подвержены искажениям, обусловленным многолучевостью, помехам, воздействующим на сигнал, и перерывам в работе.

В рамках моделей распространения на ВЧ применяют числовые карты ионосферных характеристик (Рекомендация Р.434 МСЭ-Р [27]), а в Рекомендации Р.533 МСЭ-Р [28] изложен метод прогноза для любой трассы, любого сезона года и числа солнечных пятен основной и рабочей МПЧ, уровня напряженности поля, уровня принимаемой мощности и отношения сигнал/шум.

Вопросы распространения земных волн для частот от 10 кГц до 30 МГц рассматриваются в Рекомендации Р.368 МСЭ-Р [29]. Ввиду сложности расчетов в Рекомендации Р.368 используется семейство кривых напряженности поля при распространении земной волны для ряда типичных значений частот и характеристик поверхности Земли (ϵ — относительной диэлектрической проницаемости, σ — проводимости) при ЭИИМ передающей станции 1 кВт (рис. 2.34). Эти кривые могут использоваться для определения напряженности поля только в случаях, когда известно, что отражения от ионосферы будут незначительны по амплитуде, и когда приемная антенна расположена низко над поверхностью Земли.

Эти кривые, приведенные для однородных трасс, могут также использоваться для определения напряженности поля на смешанных трассах в соответствии с методами, приведенными в Рекомендации Р.368 [29].

Основные потери передачи можно получить из значений напряженности поля E , дБмкВ/м, по кривым на рис. 2.35 из следующего уравнения:

$$L_b = 142,0 + 20 \log f_{(\text{МГц})} - E, \text{ дБ.} \quad (2.73)$$

Влияние окружающей среды на передающую и на приемную антенны рассмотрено в Рекомендации Р.341 МСЭ-Р [30].

Диапазон частот 30 МГц...1 ГГц. В этом диапазоне частот, за исключением самого нижнего края полосы, распространения радиоволн через регулярную ионосферу не происходит. Влияние погоды ограничивается явлениями сверхрефракции и волноводного распространения, которые могут вызываться инверсиями нормального градиента индекса рефракции в воздухе. Другими существенными отклонениями от распространения в свободном пространстве являются тропосферное рассеяние и дифракция, вызываемые влиянием препятствий на трассе распространения, включая выпуклость Земли и дифракцию на рельефе местности и зданиях.

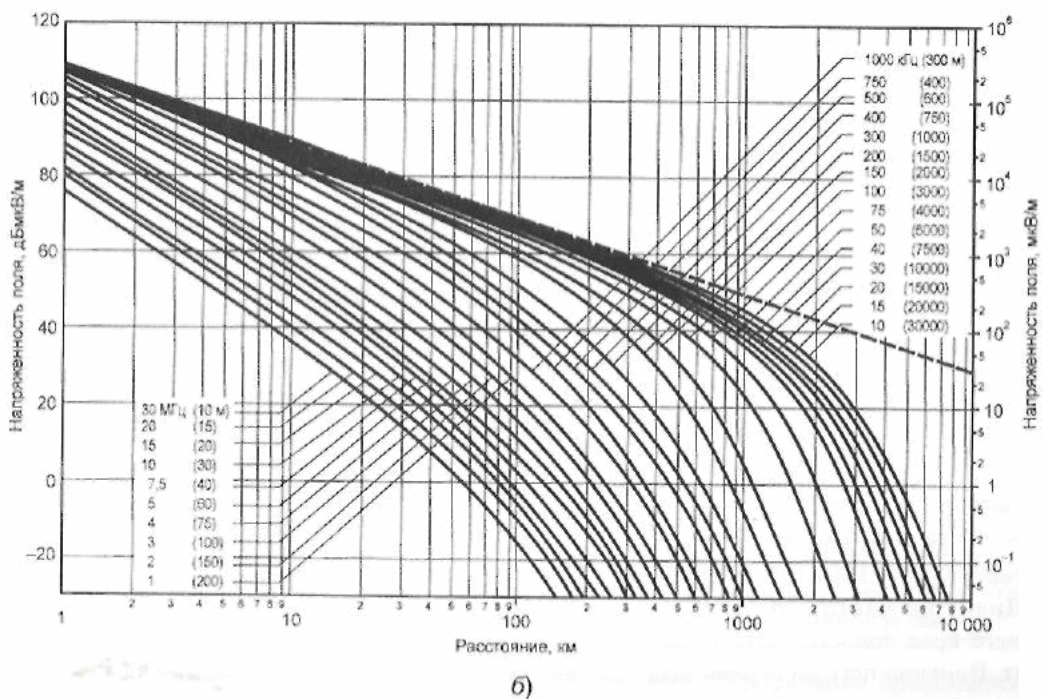
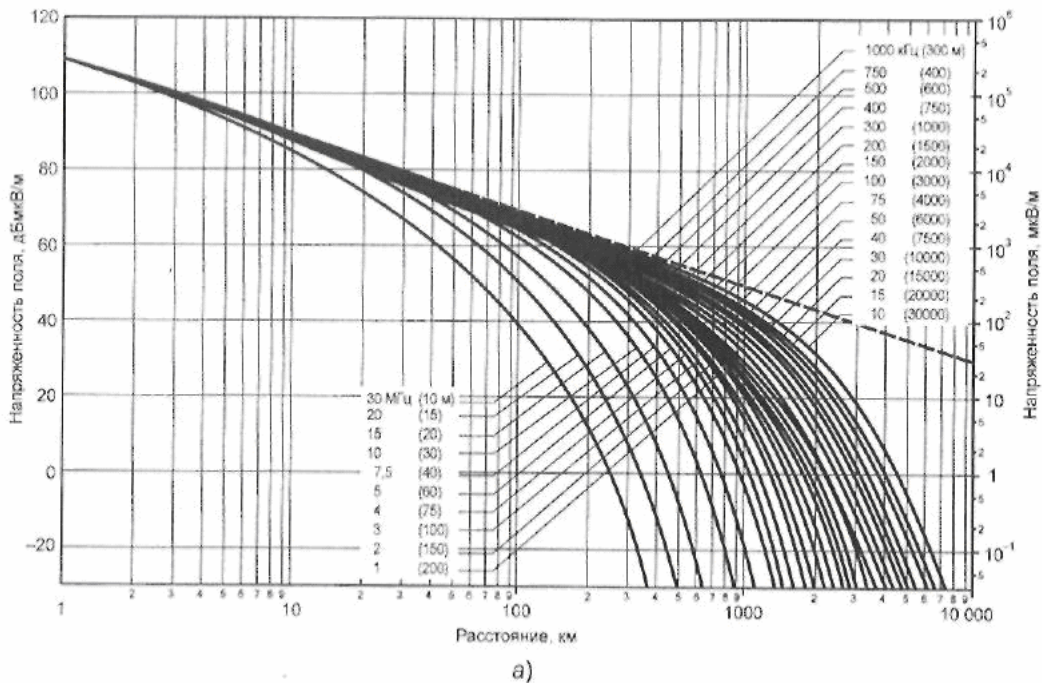
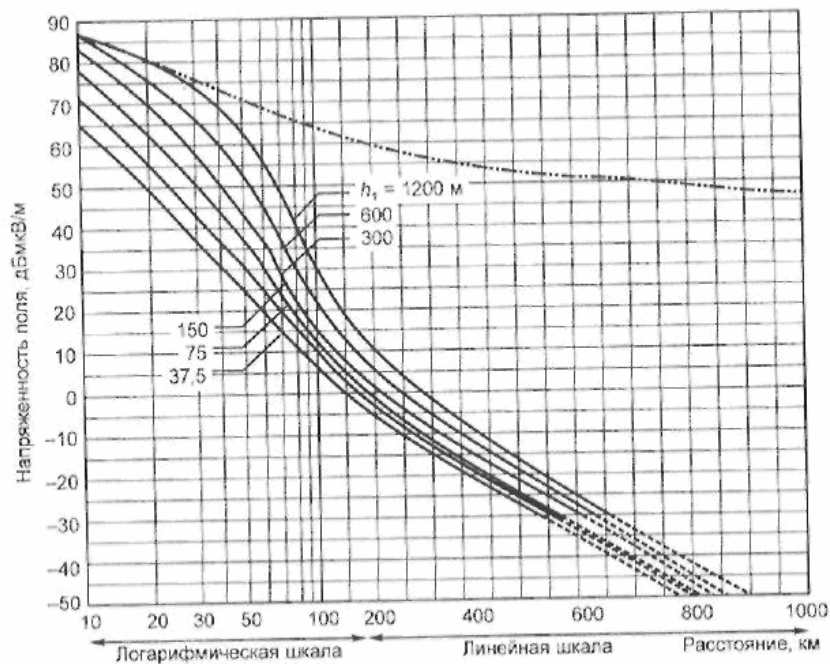
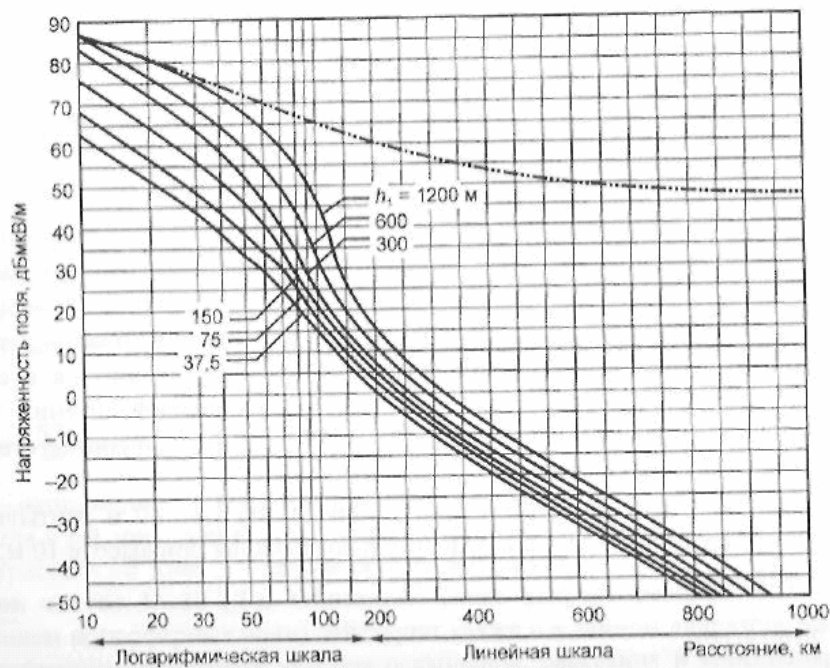


Рис. 2.34. Кривые распространения земной волны на частотах 10 кГц...30 МГц над водной поверхностью, морская вода средней солености: $\sigma = 5$ с/м; $\epsilon = 70$ (а) и над сушей, почва средней сухости: $\sigma = 10^{-3}$ с/м; $\epsilon = 15$ (б)



а)



б)

Рис. 2.35. Напряженность поля на сухопутных и морских трассах на частотах 30...250 МГц для эффективной высоты передающей антенны h_1 : 50% времени; ЭИИМ = 1 кВт; $h_2 = 10$ м:
 а — сухопутные трассы; б — морские трассы

В зависимости от конкретных условий распространения радиоволн для оценки потерь при распространении могут использоваться следующие данные.

Ослабление радиоволн в свободном пространстве. При некоторых условиях достаточно будет предположить, что полезный сигнал подвергается только ослаблению, обусловленному распространением в свободном пространстве (Рекомендация Р.525 МСЭ-Р [30]).

Дифракция вокруг гладкой поверхности Земли. Для прогнозирования уровня полезного сигнала на расстояниях, превышающих расстояние прямой видимости, необходимо учитывать кривизну Земли. Эти вопросы рассматриваются в [31].

Распространение радиоволн в конкретных регионах мира или над земной поверхностью с определенной степенью неровности. В Рекомендациях Р.370, Р.528 и Р.529 МСЭ-Р [32–34] приведены кривые для различных радиослужб, диапазонов частот, регионов мира и высот антенн, которые могут применяться для конкретной рассматриваемой ситуации.

Распространение радиоволн в городской инфраструктуре. Эта модель основывается частично на Рекомендации Р.529 МСЭ-Р [34] и использует формулу Окамура–Хата для расчета ослабления в зависимости от расстояния и эквивалентной высоты передающей антенны, процента застройки зданиями вокруг места приема, типа трассы и степени неровности земной поверхности. Кроме того, может также оказаться необходимым учет и других механизмов распространения, которые могут привести к возникновению помех. Эти механизмы включают следующие явления.

Ионосферное распространение. В определенные сезоны года и время суток режимы ионосферного распространения, такие, как распространение через спорадический слой E, могут обеспечивать распространение радиоволн на большие расстояния на частотах примерно до 70 МГц. Данные вопросы рассмотрены в Рекомендации Р.534 МСЭ-Р [35].

Волноводное распространение и сверхрефракция. Эти явления рассматриваются в Рекомендациях Р.834 и Р.452 МСЭ-Р [36, 37].

В Рекомендации Р.370 МСЭ-Р [32] используется метод расчета для вещательных радиослужб на основе экспериментальных кривых распространения, представляющих значения напряженности поля в полосах ОВЧ (30...250 МГц) и СВЧ (250 МГц...1 ГГц) как функции протяженности трассы при различных эффективных высотах передающей антенны на наземных и морских трассах и для 1...50% времени. Все кривые соответствуют высоте приемной антенны 10 м, а кривые для наземных трасс относятся к величине неровности местности $\Delta h = 50$ м, которая обычно применяется в расчетах для условий типовой неровной местности. Определение эффективной высоты антенны должно проводиться в соответствии с Рекомендацией Р.341 [30]. Для эффективных высот передающей антенны h_1 , больших 1200 м и меньших 37,5 м, в Рекомендации Р.370 приводится метод и соответствующие формулы для расчета напряженности поля.

Изменение высоты приемной антенны (h_2) в диапазоне 1,5...40 м учитывается в виде поправки напряженности поля ΔE_h , дБ, относительно значения при высоте 10 м, которая определяется по формуле

$$\Delta E_h = \frac{c}{6} 20 \lg(h_2/10), \quad (2.71)$$

где $c = 4...8$ дБ в зависимости от типа зоны (сельская, пригород, город).

Когда трассы проходят над зонами с разными характеристиками распространения, используется следующий метод, который учитывает характеристики различных частей трас-

сы. На СВЧ для времени $p < 10\%$ используется следующая процедура для расчета напряженности поля $E_m(p)$ для смешанных трасс, пересекающих границу земля/море:

$$E_m(p) = E_l(p) + E_p[E_s(p) - E_l(p)], \quad (2.72)$$

где $E_l(p)$ — напряженность поля для наземной трассы длиной, равной длине смешанной трассы, для $p\%$ времени; $E_s(p)$ — напряженность поля для морской трассы длиной, равной длине смешанной трассы, для $p\%$ времени; E_p — поправочный коэффициент, определяемый в соответствии с графиками, представленными на рис. 2.36.



Рис. 2.36. Зависимость поправочного коэффициента E_p от относительной длины трассы над морем

В случаях, когда трасса пересекает более двух зон (из которых по крайней мере одна — море), применяется линейная процедура, приведенная выше, сначала к тем частям трассы, которые пересекают морские зоны, и потом к тем частям, которые пересекают сухопутные зоны. Эти два результирующих значения напряженности поля объединяют, используя процедуру, описанную выше. Для всех других случаев применяется процедура, приведенная выше.

В диапазонах ОВЧ и СВЧ для времени $p \geq 10\%$ должна быть использована следующая формула:

$$E_m(p) = \frac{1}{d} \sum d_i E_i(p), \quad (2.73)$$

где $E_m(p)$ — напряженность поля для смешанной трассы для $p\%$ времени; $E_i(p)$ — напряженность поля в i -й зоне, длина которой равна длине смешанной трассы, для $p\%$ времени; d_i — длина трассы в i -й зоне; d — длина общего маршрута.

Диапазон частот 3...20 ГГц. Описанные ранее факторы распространения радиоволн (за исключением ионосферных волн) действуют также и в данном диапазоне частот. Однако при этом необходимо учитывать явления ослабления, рассеяния и кроссполяризации, вызванные влиянием гидromеторов и других атмосферных частиц. На частотах выше примерно 15 ГГц необходимо также учитывать ослабление в атмосферных газах.

Дожди, выпадающие на трассе распространения радиоволн, могут создавать ряд проблем. На частотах выше примерно 10 ГГц ослабление в дождевых каплях может привести к

существенному ухудшению качества сигнала. Методы оценки распределения вероятностей уровней ослабления обычно основаны на значениях интенсивности дождей R_0 , мм/ч, превышаемых в течение 0,01% времени. Эти значения должны быть получены при длительных наблюдениях за выпадением дождей с помощью дождемеров, имеющих временную разрешающую способность 1 мин. Если для интересующего региона такие данные длительных наблюдений отсутствуют, то вышеупомянутые значения можно определить по картам, приведенным в Рекомендации Р.837 МСЭ-Р [37]. Для рассматриваемой частоты и поляризации «погонное» ослабление можно затем рассчитать согласно Рекомендации Р.838 МСЭ-Р [38]. Статистические данные по климатическим изменениям содержатся в Рекомендации Р.453 МСЭ-Р [39].

При наземном распространении радиоволн в условиях ясного неба могут иметь место замирания, обусловленные дифракцией, многолучевым распространением в атмосфере и вдоль земной поверхности, расширением луча, расфокусировкой антенны, ослаблением в атмосферных газах, а в некоторых регионах — песчаными и пыльными бурями. В Рекомендации Р.530 МСЭ-Р [40] дается описание методов прогноза распространения на трассах прямой видимости с учетом большинства этих явлений. При этом используется модель, учитывающая следующие основные факторы, влияющие на характеристики распространения:

- субрефракция, приводящая к экранированию радиоволны препятствием;
- усиление сигнала из-за возникновения волноводных условий распространения;
- отражение радиоволн от слоистых неоднородностей тропосферы;
- отражение радиоволн от подстилающей поверхности;
- ослабление в гидрометеорах;
- деполяризация радиоволн из-за многолучевости и дождя;
- искажения сигнала из-за частотно-селективных замираний (ЧСЗ).

Процент времени p , в течение которого превышает глубину замирания A , дБ, для худшего среднего месяца определяется соотношением

$$p = 100 \left[1 - \exp \left(-10^{-qA/2} \right) \right], \quad (2.74)$$

где $q = 2 + 10^{-0,0164} [1 + 0,3 \cdot 10^{-A/2}] [q_i + 4,3(10^{-A/2} + A/800)]$; (2.75)

$$q_i = (-20 \lg \{-\ln \{ (100 - p_0 \cdot 10^{-A/10}) / 100 \} / A - 2\}) / (10^{-0,0164} [1 + 0,3 \cdot 10^{-A/2}] - 4,3(10^{-A/2} + A/800)). \quad (2.76)$$

В (2.76) параметр p_0 — частота появления ЧСЗ, %, определяется в соответствии с формулой

$$p_0 = K d^3 (1 + |\epsilon_p|)^{-1,2} \cdot 10^{0,033f - 0,001h_t}, \quad (2.77)$$

где K — геоклиматический коэффициент для усредненного худшего месяца по замираниям d — длина трассы, км; f — частота, ГГц; h_t — меньшая из высот передающей и приемной антенн; ϵ_p — наклон трассы, мрад, определяемый по формуле

$$|\epsilon_p| = |h_1 - h_2| / d, \quad (2.78)$$

в которой h_1 , h_2 — высота антенн над уровнем моря, м. Геоклиматический коэффициент K рассчитывается в соответствии с формулой [39]

$$K = 10^{-4,2 - 0,0029 \Delta N_1}, \quad (2.79)$$

в которой ΔN_1 — градиент рефракции на первых 65 м высоты атмосферы, не превышаемый в течение 1% среднего года, значение ΔN_1 определяется в соответствии с Рекомендацией Р.453 [39].

На рис. 2.37 приведены зависимости $p(A)$, построенные по (2.77)–(2.79) для различных значений параметра частоты ЧСЗ $p_0 = 0,01 \dots 1000\%$.

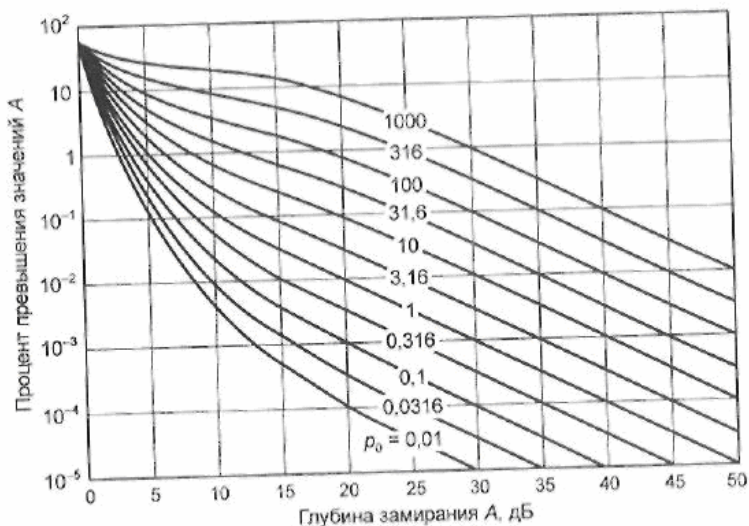


Рис. 2.37. Процент превышения глубины замирания A на трассе прямой видимости для разных значений параметра активности ЧСЗ ρ_0

Пример 4. Рассчитать процент времени, в течение которого будет превышать глубину замирания $A = 35$ дБ на трассе прямой видимости, имеющей параметры: тип трассы — сухопутная; регион расположения трассы — Центрально-Европейская часть РФ; рабочая частота — 11 ГГц; длина пролета — 30 км; высоты антенн станций над уровнем моря 250 и 220 м.

Решение. Искомый процент времени может быть наиболее просто найден по графикам, приведенным на рис. 2.37. Решение можно также найти по (2.74)–(2.79). Далее используется первый способ расчета в следующей последовательности. По (2.78) рассчитывается наклон трассы ϵ_p :

$$|\epsilon_p| = |250 - 220|/30 = 1 \text{ мрад.}$$

Для расчета параметра K по (2.79) сначала определяется показатель ΔN_1 для заданной территории, в данном случае $\Delta N_1 = -300$ 1/м. Подставляя это значение в (2.79), получаем

$$K = 10^{-4,2 - 0,0029(-300)} = 4,7 \cdot 10^{-4}.$$

Находится значение параметра $h_L = \min(250, 220) = 220$ м.

Подставляя в (2.77) эти данные, получаем

$$\rho_0 = 4,7 \cdot 10^{-4} (30)^3 (1 + |\epsilon_p|)^{-1,2} \cdot 10^{0,033 \cdot 11 - 0,001 \cdot 220} = 7,1\%.$$

По графикам на рис. 2.37 при $\rho_0 = 7,1\%$ и $A = 35$ дБ находим значение искомого процента времени $p = 2,2 \cdot 10^{-3}\%$.

Ослабление радиоволн из-за рассеяния гидрометеорами становится заметным на частотах выше 5 ГГц и для процентов времени $p = 0,001 \dots 1\%$ рассчитывается в соответствии с формулой [40]

$$A_r(p) = 0,12 A_{0,01} p^{-[0,546 + 0,043 \lg p]}, \quad (2.80)$$

$$\text{где } A_{0,01} = k(I_{0,01})^\alpha d/[1 + d/35e^{-0,015I_{0,01}}]; \quad (2.81)$$

$$k = 0,5[k_r + k_v + (k_r - k_v) \cos^2 \epsilon_p \cos 2\tau]; \quad (2.82)$$

$$\alpha = 0,5[k_r \alpha_r + k_v \alpha_v + (k_r \alpha_r - k_v \alpha_v) \cos^2 \epsilon_p \cos 2\tau]/k. \quad (2.83)$$

Здесь $I_{0,01}$ — интенсивность дождя, превышаемая в течение 0,01% времени; k_r , α_r , k_v , α_v — коэффициенты аппроксимации частотной зависимости погонного ослабления в дожде для горизонтальной и вертикальной поляризации сигнала, значения которых приведены в табл. 2.10 [41, 42]; τ — угол между плоскостью поляризации и горизонталью, обычно при расчетах принимается $\tau = 45^\circ$.

Таблица 2.10. Значения коэффициентов аппроксимации

$f, \text{ГГц}$	k_r	k_b	α_r	α_b
10	0,0101	0,00887	1,276	1,264
12	0,0188	0,0168	1,217	1,200
15	0,0367	0,0335	1,154	1,128
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
25	0,124	0,113	1,061	1,030
30	0,187	0,167	1,021	1,000
35	0,263	0,233	0,978	0,963
40	0,350	0,310	0,939	0,929

Пример 5. Рассчитать ослабление сигнала в дожде на трассе, имеющей те же параметры, что в примере 1, для двух значений процента времени $p_1 = 0,01\%$ и $p_2 = 0,001\%$. Принять значение $I_{0,01} = 30 \text{ мм/час}$.

Решение. По табл. 2.10 находим значения параметров k_r , α_r , k_b , α_b и подставляем в (2.82)–(2.83). Далее полученные значения k и α подставляем в (2.81), откуда при $\tau = 45^\circ$ получаем $A_{0,01}$. Подставляя полученное значение $A_{0,01}$ в (2.80), находим при соответствующих значениях p_1 и p_2 искомые значения ослабления сигнала в дожде $A_r(0,01\%)$ и $A_r(0,001\%)$.

Результаты расчетов всех величин приведены в табл. 2.11.

Таблица 2.11

k_r	α_r	k_b	α_b	α	k	$A_{0,01}$, дБ	$A_r(0,01\%)$, дБ	$A_r(0,001\%)$, дБ
0,01445	1,2465	0,012835	1,2320	1,1429	0,0095	20,5	20,5	44,2

Сильный дождь на трассе распространения сигнала приводит в течение малых процентов времени к уменьшению кроссполяризационной развязки XPD , оценка которой может быть сделана с помощью соотношения

$$XPD = U - V(f) \lg(CPA), \quad (2.84)$$

где $U = 15 + 30 \lg(f)$; $V(f) = 12,8f^{0,19}$ для $8 \leq f \leq 20 \text{ ГГц}$; $V(f) = 22,6$ для $20 < f \leq 35 \text{ ГГц}$; $CPA = |A_r - A_b|$ — кроссполяризационное ослабление на трассе распространения, т.е. разность ослабления на горизонтальной поляризации A_r , дБ, и на вертикальной поляризации A_b , дБ. На реальных трассах как для линейной, так и для круговой поляризации, $CPA = 1,5 \dots 2 \text{ дБ}$.

Влияние ЧЗ учитывается дополнительным процентом нарушения связи по соотношению

$$p_s = 2,15 \eta_s \left(W_m \cdot 10^{-B_m/20} \tau_m^2 |\tau_{r,m}| + W_{nm} \cdot 10^{-B_{nm}/20} \tau_m^2 / |\tau_{r,nm}| \right), \quad (2.85)$$

где η_s — параметр активности многолучевости на данной трассе [40],

$$\eta_s = 1 - \exp(-0,2[p_0/100]); \quad (2.86)$$

W_m — ширина сигнатуры, ГГц, указывается в технических данных аппаратуры; B_m и B_{nm} — глубина сигнатуры, дБ, указывается в технических данных аппаратуры; $\tau_{r,nm}$ — эталонное значение задержки отраженного сигнала, указывается в технических данных аппаратуры и обычно имеет место соотношение $\tau_{r,m} = \tau_{r,nm} = \tau_0 = 6,3 \text{ нс}$; τ_m — задержка отраженного сигнала, нс, определяемая по формуле

$$\tau_m = 0,7d/30. \quad (2.87)$$

В (2.85) индекс «м» соответствует минимально-фазовым ЧСЗ, а индекс «нм» — неминимально-фазовым ЧСЗ. Определение параметров сигнатуры и описание способа ее получения приведены в Рекомендации F.1093 МСЭ-Р [41].

Пример 6. Рассчитать процент нарушения связи из-за влияния ЧСЗ на пролете РРЛ при следующих исходных данных: параметры трассы те же, что в примере 1; ширина сигнатуры для минимально-фазовых ЧСЗ и неминимально-фазовых ЧСЗ составляет $W_X = 28$ МГц; глубина сигнатуры для минимально-фазовых ЧСЗ и неминимально-фазовых ЧСЗ $B_X = 22$ дБ; эталонная задержка $\tau_0 = 6,3$ нс. (Данные ширины и глубины сигнатуры взяты из технических данных аппаратуры «InterLink» фирмы Nera, Норвегия.)

Решение. Подстановкой исходных данных в (2.77), (2.78) и (2.79) находим параметры ϵ_p , K и p_0 , с учетом которых по (2.87) получаем значение параметра η_s . Далее по (2.87) рассчитываем τ_p . Подставляя данные в (2.85), находится искомый процент нарушения связи. Результаты расчетов всех необходимых величин сведены в табл. 2.12.

Таблица 2.12

ϵ_p	K	$p_0, \%$	η_s	$W_X, \text{МГц}$	$B_X, \text{дБ}$	$\tau_m, \text{нс}$	$\tau_0, \text{нс}$	$p_s, \%$
1	$4,7 \cdot 10^{-4}$	7,4	0,03	28	22	0,7	6,3	$2,2 \cdot 10^{-5}$

На трассах земля–космос важное значение имеют такие явления распространения радиоволн, как ослабление сигнала, замирания за счет мерцаний и деполяризация сигнала, причем важность каждого из этих явлений определяется геометрией трассы, климатом и параметрами системы связи. Дополнительную информацию можно найти в Рекомендациях P.679 МСЭ-Р, P.680 МСЭ-Р, P.681 МСЭ-Р и P.682 МСЭ-Р [42–45].

В Рекомендации P.618 МСЭ-Р [46] приведены методы определения потерь сигнала в случаях поглощения в газах и ослабления в дожде. Пространственное разнесение может значительно уменьшить уровень ослабления, соответствующий заданному годовому проценту времени на трассах, испытывающих большое ослабление, а также уменьшить эффекты мерцания и деполяризации. В Рекомендации P.618 МСЭ-Р также приведен метод прогнозирования глубины замираний, обусловленных мерцаниями, для диапазона процентов времени года между 0,01 и 50%.

Асимметричные рассеивающие объекты (дождевые капли, кристаллы льда) на трассе распространения радиоволн приводят к деполяризации сигнала в системах связи с повторным использованием частот и с применением двойной поляризации. В Рекомендации P.618 МСЭ-Р представлен метод оценки кроссполяризационной развязки XPD для частот от 8 до 35 ГГц для углов места на трассе 60° и менее. В качестве фактора, влияющего на ожидаемую величину XPD в условиях дождя, дается также описание эмпирической поправки на деполяризацию за счет льда.

Характеристики распространения радиоволн и методы их предсказания на трассах тропосферных РРЛ (ТРЛ) приводятся в Рекомендации МСЭ P.617 [47] для девяти климатических регионов мира в виде среднегодовых потерь передачи для разных частот и процентов времени и разной протяженности трасс.

Модели распространения радиоволн в вещательных радиослужбах и системах «точка–зона» («точка–многоточка», беспроводный доступ, локальные радиосети) в диапазоне частот от 300 МГц до 100 ГГц содержатся в Рекомендациях P.1145, P.1146, P.1238, P.1410, P.1411, P.1546 [48–52].

Диапазон частот выше 20 ГГц. Основные преимущества использования этого диапазона частот, которые обеспечивают необычайные возможности для распределения и присвоения частот, несомненно состоят в широкой доступной полосе частот и меньших по раз-

мерам антенн. Основной недостаток — высокая подверженность атмосферным эффектам, которые приводят к большим ослаблениям сигнала и ограничивают или исключают использование многих систем радиосвязи. Однако такие эффекты ослабления можно также использовать в интересах обеспечения защиты систем от помех вследствие значительно более высоких потерь в свободном пространстве на этих частотах.

Данный диапазон частот характеризуется «окнами», которые являются полосами с относительно низким ослаблением, и полосами поглощения, где наблюдается очень высокое ослабление. Окна и полосы поглощения определяются в первую очередь поглощающими свойствами газов, в основном кислорода и водяного пара. Поглощение в кислороде максимальны на частотах 60 и 119 ГГц, а поглощение в водяном паре максимально вблизи частот 22 и 183 ГГц. Однако следы газов могут значительно влиять на величину ослабления при отсутствии водяного пара на частотах выше примерно 70 ГГц. Методика определения средних значений плотности водяных паров в атмосфере вблизи земной поверхности, оказывающих существенное влияние на системы, работающие на частотах выше 20 ГГц, дана в Рекомендации Р.836 МСЭ-Р [53].

Осадки, особенно в виде дождя, вызывают сильное поглощение и рассеяние радиоволн, а также, в меньшей степени, вращение плоскости поляризации волн. Эти эффекты имеют тенденцию к объединению вызывающему значительное ослабление. Расчеты погонного ослабления на данных частотах в очень большой мере зависят от микроструктуры дождя (например, температуры, распределения конечной скорости, размеров и формы капель и т.п.) и затрудняются недостатком точных эмпирических данных и сложностью моделирования микроструктуры дождя.

2.4.2. Распространение мешающих радиосигналов

Механизмы распространения помех. Мешающие сигналы (помехи) между станциями различных систем радиосвязи могут возникать из-за долгосрочных и краткосрочных механизмов распространения [34]. При этом имеются некоторые особенности действия этих механизмов распространения как носителей МС. Трассы распространения МС могут иметь самые произвольные характеристики. Поэтому проблема надежного прогнозирования уровней МС связана с трудностью учета большого разнообразия типов и параметров трасс и условий распространения на них. При этом в некоторые периоды времени на определенном расстоянии от передающей станции наблюдаются преобладания того или иного механизма распространения или одновременное действие нескольких механизмов распространения МС [36]. Особенности основных механизмов распространения МС рассматриваются ниже (см. также рис. 2.32 и 2.33).

Прямая видимость. Уровни МС могут часто значительно увеличиваться в короткие периоды времени из-за многолучевого распространения и фокусирующих эффектов, вызываемых слоистой структурой атмосферы.

Дифракция. За прямой видимостью и при нормальных условиях эффекты дифракции обычно доминируют там, где обнаруживаются значительные уровни сигнала. Дифракционный прогноз должен достаточно точно учитывать округлость Земли, естественные и искусственные препятствия на трассе распространения МС.

Тропосферное рассеяние. Этот механизм определяет уровень фоновой помехи для трасс протяженностью более 100...150 км, когда дифракционное поле становится очень слабым. Тем не менее, за исключением некоторых специальных случаев (земные станции спутниковых систем связи и станции радиолокационных систем), помеха из-за тропосферного рассеяния будет на достаточно низком уровне.

Поверхностный волновод. Этот наиболее важный краткосрочный механизм распространения МС может вызывать высокие уровни сигнала на больших расстояниях (более 500 км над морем). Уровень таких МС при определенных условиях может превысить уровень, соответствующий распространению в свободном пространстве.

Отражение и преломление поднимающимися слоями. Отражение и/или преломление от слоев на высотах до нескольких сот метров имеет большое значение как механизма распространения, обуславливающего при благоприятной геометрии трассы уровни МС выше, чем при распространении за счет дифракции. Кроме того, влияние данного механизма распространения может быть существенным на очень больших расстояниях (вплоть до 250...300 км).

Рассеяние гидрометеорами может являться потенциальным источником МС между передатчиками наземных линий связи и земными станциями из-за фактически всенаправленного характера переизлучения радиоволн и может, следовательно, оказывать мешающее влияние по трассам, лежащим вне плоскости большого круга. Уровни таких МС могут быть значительны так же, как и при тропосферном рассеянии, только в специфических случаях (земные станции спутниковых систем связи или станции радиолокационных систем).

Экранирование локальными неоднородностями (строения, деревья и т.п.). Этот фактор при распространении МС играет защитную роль, поскольку в определенной степени понижает уровни МС в точке их приема.

Методы прогноза уровней МС в диапазоне частот 0,7...100 ГГц содержатся в Рекомендации Р.452 МСЭ-Р [36]. Ниже кратко рассматривается ее основное содержание, касающееся особенностей распространения МС и прогнозирования их уровней в различных условиях.

Радиометеорологические данные. В процедурах прогноза характеристик распространения МС применяются три радиометеорологических параметра [34]:

- ΔN — изменение среднего индекса рефракции атмосферы на 1 км высоты;
- β_0 — процент времени, для которого преломляющее индексное превышение погрешности $\Delta N > 100$ ед./км может ожидать на первых 100 м высоты атмосферы; β_0 должен определяться на географической широте середины трассы;
- N_0 — индекс рефракции на уровне поверхности моря.

Радиоклиматические зоны, для которых применимы методы прогнозирования Рекомендации Р.452 [34], приведены в табл. 2.13.

Таблица 2.13. Радиоклиматические зоны

Тип зоны	Код	Определение
Береговая зона	A1	Береговая земля и области берега, т.е. земля, смежная с морем, с высотой до 100 м относительно среднего уровня моря или воды, по ограниченной расстоянием 50 км от ближайшей морской зоны
Материки	A2	Вся земля, кроме береговой зоны и области берега, определенной выше как «береговая земля»
Моря	B	Моря, оксаны и другие большие водные пространства (т.е. покрывающие территории не менее 100 км в диаметре)

Эффективный радиус Земли. Медианное значение параметра эффективного радиуса Земли k_{50} для трассы определяется из соотношения

$$k_{50} = \frac{157}{157 - \Delta N}. \quad (2.88)$$

С учетом действительного радиуса Земли 6371 км, медианное значение эффективного радиуса Земли

$$a_e = 6371 k_{50} \text{ км.}$$

Распространение МС в условиях прямой видимости. Основные потери при передаче, дБ, не превышаемые для $p\%$ времени,

$$L_{\text{вд}}(p) = 92,5 + 20 \lg(f) + 20 \lg(d) + E_s(p) + A_g, \quad (2.89)$$

где f — частота, ГГц; d — длина трассы, км; $E_s(p)$ — параметр коррекции, учитывающий эффекты многолучевого распространения и фокусировки, дБ,

$$E_s(p) = 2,6(1 - e^{-d/10}) \lg(p/50), \quad (2.90)$$

A_g — общее поглощение атмосферными газами, дБ [54],

$$A_g = [\gamma_0 + \gamma_w(\rho)]d; \quad (2.91)$$

γ_0 и $\gamma_w(\rho)$ — специфическое ослабление в сухом воздухе и водяных парах соответственно; ρ — плотность водяных паров.

Пример 7. Определить основные потери передачи для двух значений процентов времени $p_1 = 0,01\%$ и $p_2 = 0,001\%$ при распространении МС в пределах прямой видимости на расстоянии 50 км над сухопутной территорией на частоте 11 ГГц.

Решение. В соответствии с [54] находим $\gamma_0 = 0,13$ дБ/км. Поскольку трасса распространения МС сухопутная, то $\gamma_w(\rho) = 0$. Далее по (2.91) находим показатель A_g и по (2.90) — показатель $E_s(p)$. Подставляя данные в (2.89), получаем искомые потери $L_{\text{вд}}(p)$. Результаты расчета представлены в табл. 2.14.

Таблица 2.14

γ_0 , дБ/км	$A_{\text{св}}$, дБ	$E_s(p)$, дБ	A_g , дБ	p , %	$L_{\text{вд}}(p)$, дБ
0,13	146,5	-12,2	6,5	0,001	140,5
0,13	146,5	-9,6	6,5	0,01	143,4

Следует отметить, что величина $A_{\text{св}}$ в табл. 2.14 представляет собой потери в свободном пространстве и ее значение определяется суммой первых трех слагаемых в (2.89). Как видно из представленных значений, основные потери передачи на трассе распространения МС в пределах прямой видимости для малых процентов времени меньше, чем в свободном пространстве. Причиной этого является интерференция прямой волны и волн, отраженных от слоистых неоднородностей тропосферы на высоте несколько десятков метров. Причем возникновение такой слоистой структуры тропосферы происходит при определенных погодных условиях, которые складываются обычно в летние месяцы (утренние и вечерние часы при отсутствии ветра).

Распространение МС из-за дифракции. Основные потери при передаче, дБ, не превышаемые для $p\%$ времени,

$$L_{\text{вд}}(p) = 92,5 + 20 \lg(f) + 20 \lg(d) + L_d(p) + E_{\text{сд}}(p) + A_g, \quad (2.92)$$

где $L_d(p) = L_d(50\%) - F_i(p)[L_d(50\%) - L_d(\beta_0)]$. (2.93)

Здесь $L_d(50\%)$ — дифракционные потери для $p = 50\%$, вычисляемые в соответствии Рекомендацией Р.526 [31] для $a_e(50\%)$; $L_d(\beta_0)$ — дифракционные потери для β_0 , %, вычисляемые в соответствии Рекомендацией Р.526 [31] для $a_e(\beta_0)$; $F_i(p)$ — параметр интерполяции, основанный на том, что дифракционные потери для процентов $\beta_0 < p < 50\%$ подчиняются лог-нормальному закону распределения,

$$F_i(p) = I(p/100)/I(\beta_0/100). \quad (2.94)$$

Здесь $I(\cdot)$ — обращение (обратная функция) интеграла вероятности [31], которое находится в соответствии с соотношением

$$I(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt;$$

$E_{sd}(p)$ — поправка на многолучевые эффекты между антеннами и препятствиями, дБ, которая находится по формуле

$$E_{sd}(p) = 2,6 \left[1 - e^{-(d_h + d_r)/10} \right] \lg(p/50), \quad (2.95)$$

где d_h и d_r — расстояния от передающей и приемной антенны до их радиогоризонтов, км, соответственно, эти величины определяются из профиля трассы распространения МС в соответствии с методикой, описанной в [31].

Пример 8. Рассчитать основные потери передачи на дифракционной сухопутной трассе распространения МС для условий сферической Земли при следующих исходных данных: длина трассы — 100 км; расстояние от передающей антенны до радиогоризонта 48 км; расстояние от приемной антенны до радиогоризонта 33 км; частота — 11 ГГц; процент времени — 0,01%; относительная проницаемость земли $\epsilon = 3$; проводимость земли $\sigma = 10^{-4}$ с/м; географическая широта середины трассы — 40°; высота передающей антенны над землей — 80 м; высота приемной антенны над землей — 50 м. Принять параметр атмосферы $\Delta N = 40$ ед.

Решение. В соответствии с [34] определяются значения параметров β_0 и $a_d(\beta_0)$, а затем по методике [31] рассчитываются значения показателей $L_d(50\%)$ и $L_d(\beta_0)$. Далее по (2.94), (2.93) рассчитываются значения величин $F_d(p)$ и $L_d(p)$, а по (2.95), (2.91) — значения величин $E_{sd}(p)$ и A_g , подставляя которые в (2.92), получаем искомый результат. В табл. 2.15 приведены результаты расчета основных величин, полученных по описанной выше методике.

Таблица 2.15

$\beta_0, \%$	$a_d(\beta_0),$ км	$A_{св},$ дБ	$A_g,$ дБ	$L_d(50\%),$ дБ	$L_d(\beta_0),$ дБ	$F_d(p)$	$L_d(p),$ дБ	$E_{sd}(p),$ дБ	$L_{sd}(p),$ дБ
0,0022	1911,3	153,3	13	81,0	14,4	0,911	20,3	-9,6	176,0

Как видно из представленных результатов, на дифракционной трассе в отсутствие значительных препятствий величина дополнительных потерь по сравнению с потерями в свободном пространстве составляет около 23 дБ (для $p = 0,01\%$).

Распространение МС путем тропосферного рассеяния. При малых процентах времени трудно установить действительный тропосферный эффект распространения, поскольку имеются и второстепенные эффекты такого способа распространения, такие, как тропосферный волновод и отражения слоя. Это допускает непрерывный прогноз основных потерь передаче в пределах процентов времени $0,001\% \leq p \leq 50\%$.

Основные потери при передаче $L_{bs}(p)$, дБ, не превышаемые в течение $p \leq 50\%$, могут быть определены по формуле

$$L_{bs}(p) = 190 + L_f + 20 \lg d + 0,573\theta - 0,15 N_0 + L_c + A_g - 10,1 [-\lg(p/50)]^{0,7}, \quad (2.96)$$

где θ — угол рассеяния на трассе распространения, мрад; L_f — частотно-зависимые потери, дБ,

$$L_f = 25 \lg(f) - 2,5 [\lg(f/2)]^2. \quad (2.97)$$

Потери усиления антенн L_c , дБ, определяются по формуле

$$L_c = 0,051 e^{0,055(G_t + G_r)}, \quad (2.98)$$

где G_t и G_r — коэффициенты усиления передающей и приемной антенны соответственно; A_g — поглощение в газах, рассчитываемое по (2.91) при $\rho = 3$ г/м³ для полной длины трассы.

Пример 9. Рассчитать основные потери передачи на трассе тропосферного рассеяния МС при следующих исходных данных: длина трассы — 150 км; частота сигнала — 11 ГГц; коэффициент усиления передающей антенны мешающей станции в направлении на станцию-реципиент — 40 дБ; коэффициент усиления антенны станции-реципиента в направлении прихода МС — 20 дБ; погонные потери в атмосфере — 0,05 дБ/км; индекс рефракции на уровне моря — 315 ед.; процент времени — 0,01; высота препятствия над горизонтальной плоскостью на стороне мешающей станции — 20 м; расстояние до препятствия от мешающей станции — 45 км; просвет от препятствия до горизонтальной плоскости на стороне станции-реципиента — 10 м; расстояние до препятствия от станции-реципиента — 10 км.

Решение. В соответствии с [36] определяем углы возвышения на передающей стороне θ_t и на приемной стороне θ_r и далее угол рассеяния θ . Затем по (2.91), (2.97), (2.98) находим A_g , L_c и L_f , подставляя которые в (2.96) получаем искомые основные потери передачи $L_{ba}(0,01)$. Результаты расчета представлены в табл. 2.16.

Таблица 2.16

θ_t , мрад	θ_r , мрад	θ , мрад	A_g , дБ	L_c , дБ	L_f , дБ	$L_{ba}(\theta,01)$, дБ
-2,18	-8,26	7,1	7,5	0,002	24,7	197,3

Можно отметить, что альтернативно угол рассеяния на трассе θ может определяться геометрически непосредственно по профилю трассы.

Распространение МС за счет волновода и отражений от слоев. Основные потери передачи $L_{ba}(p)$, дБ, для этого механизма распространения МС определяются формулой

$$L_{ba}(p) = A_f + A_d(p) + A_g, \quad (2.99)$$

где A_f — общие постоянные потери (за исключением потерь из-за локальных инфраструктурных неоднородностей), дБ, обусловленные аномальной структурой распространения в пределах атмосферы,

$$A_f = 102,45 + 20 \lg(f) + 20 \lg(d_{it} + d_{ir}) + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr}. \quad (2.100)$$

Здесь A_{st} , A_{sr} — дифракционные потери из-за экранирования местностью для передающей и приемной станции соответственно; A_{ct} , A_{cr} — параметры коррекции, связанные с волноводным распространением над морем для передающей и приемной станции соответственно; $A_d(p)$ — потери из-за аномальных условий распространения, зависящие от угла рассеяния [36].

Пример 10. Рассчитать основные потери передачи МС для 0,01% времени на трассе распространения, имеющей основные параметры такие же, как в примере 9. Дополнительные параметры трассы: погонные потери в атмосфере — 0,13 дБ/км; средняя неровность местности по всей трассе — 50 м; высоты передающей и приемной антенн над уровнем моря — 280 и 250 м соответственно; высоты передающей и приемной антенн над средним уровнем местности («сферической Земли») — 85 и 45 м соответственно.

Решение. В соответствии с [36] определяем углы возвышения на передающей стороне θ_t и на приемной стороне θ_r , угол рассеяния θ , ряд вспомогательных параметров и далее показатель $A_d(p)$. Затем по (2.91), (2.100) находим A_g и A_f , подставляя которые в (2.99), получаем искомые основные потери передачи $L_{ba}(0,01)$. Результаты расчета представлены в табл. 2.17. В таблицу не включены значения показателей A_{st} , A_{sr} , A_{ct} , A_{cr} , которые для данных условий равны 0.

Таблица 2.17

θ_t , мрад	θ_r , мрад	θ , мрад	A_g , дБ	$A_d(p)$, дБ	A_f , дБ	$L_{ba}(0,01)$, дБ
-2,18	-8,26	7,1	19,5	12,0	158,1	196,3

Как видно из полученных результатов, основные потери передачи при волноводном распространении на трассе распространения МС, идентичной трассе распространения с тропосферным рассеянием, имеют примерно одинаковые значения.

Экранирование МС локальными неоднородностями. Этот механизм распространения МС является источником дополнительных дифракционных потерь в случае размещения антенн в окружении локальных инфраструктурных неоднородностей (строения, растительность и т.п.). Когда достоверная информация о таких неоднородностях отсутствует, потери из-за рассеяния на инфраструктурных неоднородностях не должны учитываться. Потери этого вида рассчитывают для номинальных параметров типовых неоднородностей (высоты и расстояние от неоднородности до антенны), данные по которым представлены в табл. 2.18.

Таблица 2.18. Номинальные параметры типовых неоднородностей

Категория неоднородности (по типу местности)	Номинальная высота, неоднородности h_a , м	Номинальное расстояние от неоднородности до антенны, d_k , км
Поля, парки, редко растущие деревья, сады, редко стоящие дома	4	0,1
Центр деревни	5	0,07
Лиственные леса	15	0,05
Хвойные леса	20	0,05
Тропические леса	20	0,03
Пригород	9	0,025
Пригород с плотной застройкой	12	0,02
Город	20	0,02
Город с плотной застройкой	25	0,02
Промышленная зона	20	0,05

Дополнительные потери из-за экранирования локальными неоднородностями

$$A_b = 10,25 e^{-d_k} \{1 - \text{th}(6[h/h_a - 0,625])\} - 0,33, \quad (2.101)$$

где d_k — расстояние от точки расположения неоднородности до антенны, км; h — высота антенны над локальным уровнем земли, м; h_a — номинальная высота неоднородности над локальным уровнем земли, м.

Пример 11. Определить потери из-за экранирования локальными неоднородностями городской застройки при высоте антенны 10 м.

Решение. По табл. 2.18 находим типовые значения $h_a = 20$ м и $d_k = 0,02$ км, подставляя которые в (2.101), получаем искомые потери

$$A_b = 10,25 e^{-0,02} \{1 - \text{th}(6[10/20 - 0,625])\} - 0,33 = 16,1 \text{ дБ.}$$

Распространение МС из-за рассеяния гидрометеорами. Модель этого механизма распространения МС базируется на двух фундаментальных предположениях [31, 38]:

- рассеяние происходит только в пределах ячейки дождя, имеющей цилиндрическое поперечное сечение, диаметр которой зависит от интенсивности дождя в ячейке. В пределах ячейки дождя интенсивность дождя и, следовательно, отражаемость являются постоянными вплоть до высоты дождя, среднее значение которой зависит от географической широты, но со специфическим распределением относительно этого значения. Выше высоты дождя принимается линейное уменьшение отражаемости;
- ослабление происходит как внутри, так и снаружи ячейки, но только ниже высоты дождя. Внутри ячейки принимается хорошо известная зависимость специфического ослабления от интенсивности дождя.

С помощью данной модели можно вычислять уровни МС как на длинных трассах (более 100 км), так и на коротких (вплоть до нескольких километров) с произвольными углами возвышения на обоих терминалах, а также на трассах с боковым рассеянием (т.е. вне плоскости большого круга) и на трассах распространения МС через боковой лепесток ДНА одной станции и главный лепесток ДНА другой станции.

Диаметр дождевой ячейки d_c , км, зависит от интенсивности дождя R , мм/ч, как

$$d_c = 3,3 R^{0,08}. \quad (2.102)$$

Ячейка центрируется на точке пересечения ДНА взаимодействующих станций, как показано на рис. 2.38.

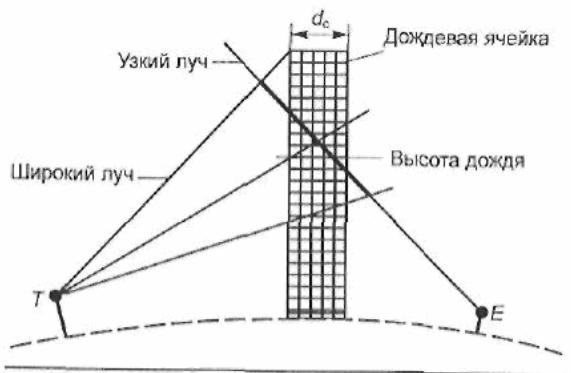


Рис. 2.38. Геометрия трассы распространения МС из-за рассеяния радиоволн дождевой ячейкой

Потери передачи L_R , дБ, из-за рассеяния гидрометеорами для данной интенсивности дождя R и высоты дождя h_R могут быть выражены соотношением

$$L_R(p) = 197 - 10 \lg(\eta_E) + 20 \lg(d_T) - 20 \lg(f) - 10 \lg(z_R) + 10 \lg(S) + A_g - 10 \lg C, \quad (2.103)$$

где η_E — параметр эффективности антенны ЗС ($\eta_E < 1$), типовое значение $\eta_E = 0,6$; d_T — расстояние между станциями через объем рассеяния (ОР), км; f — частота, ГГц; z_R — параметр отражаемости единичного объема дождя ниже или выше высоты дождя, мм⁶/м³,

$$z_R = 400 R(p)^{1,4}. \quad (2.104)$$

Здесь $R(p)$ — среднеминутная интенсивность дождя в точке, превышаемая в течение $p\%$ времени; S — поправочный параметр на отклонение закона рассеяния от релейевского на частотах выше 10 ГГц [31]:

$$10 \lg(S) = \begin{cases} R(p)^{0,4} \cdot 10^{-3} \left[4(f-10)^{1,6} (1 + \cos \theta)/2 + \right. \\ \left. + 5(f-10)^{1,7} (1 + \cos \theta)/2 \right] & \text{для } f > 10 \text{ ГГц;} \\ 0 & \text{для } f \leq 10 \text{ ГГц;} \end{cases} \quad (2.105)$$

где θ — угол рассеяния трассы распространения МС; A_g — ослабление в кислороде и парах воды, рассчитываемое по (2.94) при $\rho = 7,5 \text{ г/м}^3$ [36]; C — эффективная передаточная функция рассеяния,

$$C = g_{T0} \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} g_T(h) \zeta(h) A_T(h) A_E(h) \frac{1}{\sin \epsilon_E} dh, \quad (2.106)$$

где h_{\min} , h_{\max} — минимальная и максимальная высота интегрирования; g_{TB} — коэффициент усиления антенны наземной станции; g_T — ДНА наземной станции в направлении на ОР; ε_E — угол возвышения оси ДНА земной станции; $\zeta(h)$ — отражаемость объема рассеяния, нормализованная к z_R ,

$$\zeta(h) = \begin{cases} 1 & \text{для } h \leq h_R; \\ 10^{-0,55(h-h_R)} & \text{для } h > h_R. \end{cases} \quad (2.107)$$

Здесь h_R — средняя высота дождя, значения которой приведены в Рекомендации Р.838 [38]; A_T , A_E — ослабление в дожде от наземной станции до ОР и от ОР до земной станции, соответственно.

При данных расчетах ДНА наземной станции аппроксимируется гауссовской функцией вида

$$g_i(h) = \exp\{-4 \ln[2(h - h_R + 0,36)/\Delta h_{0,5}]^2\}, \quad (2.108)$$

где $\Delta h_{0,5}$ — разность высот точек пересечения осью антенны земной станции луча антенны наземной станции по уровню 0,5 (точки -3 дБ).

Пример 12. Рассчитать основные потери передачи при распространении МС между земной станцией ФСС и наземной станцией НФС за счет рассеяния дождем для 0,01% времени при следующих исходных данных: частота сигнала — 11 Гц; коэффициент усиления антенны наземной станции в направлении на объем рассеяния — 40 дБ; интенсивность дождя для 0,01% времени — 100 мм/ч; расстояние между станциями — 50 км; угол возвышения антенны земной станции — 20°; погонные потери в атмосфере — 0,13 дБ/км.

Решение. По [38] находим значение h_R . Далее по (2.106) с учетом (2.107), (2.108) рассчитываем показатель C . Затем по (2.104) и (2.105) получаем z_R и $10 \lg(S)$. По очевидным геометрическим соотношениям рассчитываем d_T . Далее, принимая типовое значение $\eta_E = 0,6$ и подставляя данные в (2.103), получаем искомый результат. Результаты расчета основных показателей расчета, выполненного по программе на ЭВМ, представлены в табл. 2.19.

Таблица 2.19

η_E	h_R , км	h_{\min} , км	h_{\max} , км	C	θ , град.	S , дБ	z_R	A_E , дБ	$L_R(\rho)$, дБ
0,6	3,36	7,6	9,2	$3,1 \cdot 10^{-4}$	76,5	0,03	4,5-105	7,0	198,4