

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1812

Метод прогнозирования распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб "из пункта в зону" в диапазонах УВЧ и ОВЧ

(Вопрос МСЭ-R 203/3)

(2007)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации описывается метод прогнозирования распространения сигнала, пригодный для подробной оценки уровней сигнала наземных служб из пункта в зону в диапазоне частот от 30 МГц до 3 ГГц, превышаемых в течение заданного процента времени $p\%$, лежащего в пределах $1\% \leq p \leq 50\%$, и для данного процента мест размещения p_L , лежащего в пределах $1\% \leq p_L \leq 99\%$. Данный метод предусматривает подробный анализ трассы на основе профиля земной поверхности.

Этот метод пригоден для прогнозирования работы систем радиосвязи, использующих наземные сети с длиной трасс от 0,25 км до примерно 3000 км, когда оба терминала находятся на высоте не более 3 км над уровнем земли. Он не пригоден для прогнозирования распространения радиосигналов на линиях воздух-земля или космос-Земля.

Настоящая Рекомендация дополняет Рекомендацию МСЭ-R P.1546.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что для инженеров необходимо разработать рекомендации по планированию наземных служб радиосвязи в полосах частот УВЧ и ОВЧ;
- b) что для станций, работающих на одном и том же или на смежных частотных каналах, одним из важнейших вопросов является определение минимального географического разнорасстояния, обеспечивающего отсутствие неприемлемых помех из-за дальнего наземного распространения радиоволн,

отмечая,

- a) что в Рекомендации МСЭ-R P.528 содержится руководство по предсказанию потерь для воздушной подвижной службы на трассе распространения "из пункта в зону" для диапазона частот от 125 МГц до 30 ГГц и для расстояний до 1800 км;
- b) что в Рекомендации МСЭ-R P.452 содержится руководство по детальной оценке сверхвысокочастотных помех между станциями на поверхности Земли на частотах выше примерно 0,7 ГГц;
- c) что в Рекомендации МСЭ-R P.617 содержится руководство по предсказанию потерь на трассе распространения "из пункта в пункт" для тропосферных радиорелейных систем для диапазона частот выше 30 МГц и для расстояний от 100 до 1000 км;
- d) что в Рекомендации МСЭ-R P.1411 содержится руководство по предсказанию для служб малого радиуса действия (до 1 км), работающих вне зданий;
- e) что в Рекомендации МСЭ-R P.530 содержится руководство по предсказанию потерь на трассе распространения "из пункта в пункт" для наземных систем прямой видимости;

f) что в Рекомендации МСЭ-R P.1546 содержится руководство по предсказанию напряженности поля для систем "из пункта в зону" в полосах частот УВЧ и ОВЧ, основанное главным образом на статистическом анализе экспериментальных данных,

рекомендует,

1 что для детальной оценки уровней сигнала этих служб следует использовать процедуру, описанную в Приложении 1.

Приложение 1

1 Введение

Метод прогнозирования параметров распространения радиоволн, описанный в настоящем Приложении, рекомендуется для детальной оценки уровней сигнала и пригоден для линий связи с наземными системами радиосвязи "из пункта в зону" в полосах частот УВЧ и ОВЧ. Он предсказывает уровень сигнала (т. е. напряженность электрического поля), превышаемый в течение данного процента времени $p\%$ среднего года в пределах $1\% \leq p \leq 50\%$ и для $p_L\%$ мест размещения в пределах $1\% \leq p_L \leq 99\%$. Следовательно, этот метод может использоваться для предсказания как области обслуживания, так и готовности для желаемого уровня сигнала (площади покрытия), а также для предсказания уменьшения области обслуживания и готовности из-за мешающих сигналов, действующих в совпадающем и/или смежных каналах (помех).

Модель распространения для этого метода симметрична в том смысле, что она одинаковым образом учитывает оба оконечных радиоустройства. С точки зрения модели не имеет значения, какой терминал ведет передачу, а какой является приемником. Однако для удобства в описании модели используются термины "передатчик" и "приемник", обозначающие станции в начале и конце трассы распространения радиосигнала, соответственно.

Этот метод сначала описывает расчет основных потерь передачи (дБ), которые не превышаются в течение $p\%$ времени для среднего числа местоположений. Затем выполняется статистическое описание элементов, определяемых изменением местоположения, и потерь на проникновение в здания для мест размещения приемников. Затем выполняется процедура приведения к напряженности электрического поля дБ(мкВ/м) для эффективно излучаемой мощности = 1 кВт.

Этот метод предназначен главным образом для систем, использующих антенны с малым усилением. Однако на изменение точности при использовании антенн с высоким коэффициентом усиления влияет только один элемент из всего метода – тропосферное рассеяние, и изменение прогнозов достаточно мало. Например, даже если на обоих концах линии будут использоваться антенны с усилением 40 дБи, завышение оценки сигналов тропосферного рассеяния составит всего лишь около 1 дБ.

Этот метод пригоден для прогнозирований распространения сигналов систем радиосвязи, в которых используются наземные линии связи длиной от 0,25 км до примерно 3000 км, когда оба терминала располагаются не выше примерно 3 км над уровнем земли. Он не пригоден для прогнозирования распространения радиосигналов на линиях воздух-земля или космос-Земля.

Метод прогнозирования параметров распространения радиоволн в настоящем Приложении определяется конкретной трассой. Предсказания для систем "из пункта в зону", выполняемые с использованием этого метода, состоят из множества предсказаний для линий "из пункта в пункт" (т. е. точка передачи – точка приема), которые равномерно распределены в рассматриваемой области обслуживания. Количество точек должно быть достаточно большим, для того чтобы полученные таким образом предсказанные значения основных потерь передачи или напряженности поля были бы разумными оценками средних значений для конкретных мест и соответствующих величин для элементарных площадей, которые они описывают.

Вследствие этого предполагается, что пользователи настоящей Рекомендации имеют возможность подробно описать профили земной поверхности (т. е. высоты над средним уровнем моря) как функции от расстояния на траекториях дуги большого круга (т. е. геофизических линиях) между терминалами для множества различных мест размещения терминалов (точек приема). Для большинства практических применений этого метода для предсказаний областей покрытия "из пункта в зону" и помех такое предположение предусматривает наличие базы данных цифровых карт с высотами местности, с указанными соответствующих геодезических данных координатами широты и долготы, из которой можно автоматически получать профили земной поверхности. Если этих подробных профилей нет, то для предсказаний следует использовать Рекомендацию МСЭ-R P.1546.

С учетом изложенного выше элементы модели, определяемые изменением местоположения, и потерями, в настоящей Рекомендации описываются статистическими параметрами логнормального распределения для соответствующих точек размещения приемников. Хотя, как может показаться, такое статистическое описание задачи распространения "из пункта в зону" делает общую модель асимметричной (т. е. необратимой), пользователи настоящей Рекомендации должны помнить, что изменение местоположения может в принципе применяться к обоим окончаниям трассы (т. е. к обоим терминалам) или даже к обоим сразу (т. е. и к передатчику, и к приемнику). Однако корректировка изменения местоположения имеет смысл только в ситуациях, когда точное место расположения данного терминала неизвестно, и возможные места размещения этого терминала требуется описать статистически. Маловероятно, чтобы было много случаев, когда вышесказанное было применимо к точке размещения передатчика. Если места размещения обоих терминалов точно известны и эта процедура используется в режиме "из пункта в пункт", то настоящая Рекомендация применима только со значением $p_L=50\%$.

Аналогичное заявление справедливо и для потерь на проникновение в здания. Аргумент здесь несколько сложнее, чем для потери из-за изменения местоположения, вследствие того факта, что коэффициент коррекции средних потерь на проникновение не равен нулю. На стороне передатчика пользователи должны также добавить потери на проникновение в здания к базовым потерям передачи, но пользователи должны также знать, что если передатчик расположен не в "среднем" местоположении, то средние значения потерь, приведенные в таблице 6, могут вводить в заблуждение.

2 Элементы модели прогнозирования параметров распространения радиоволн

Данный метод прогнозирования учитывает следующие элементы модели:

- *прямая видимость;*
- *дифракция* (учитывает случаи гладкой Земли, пересеченной местности и случаи закрытых трасс);
- *тропосферное рассеяние;*
- *аномальное распространение* (атмосферные волноводы и отражение/преломление в слоях);
- *изменение усиления в зависимости от высоты препятствий;*
- *изменение местоположения;*
- *потери на проникновение в здания.*

3 Исходные параметры

3.1 Базовые исходные данные

В таблице 1 описаны базовые исходные данные, которые определяют точки размещения терминалов, частоту и процент времени и мест размещения, для которого требуется предсказание.

Широта и долгота двух станций указывается как базовые исходные данные на основании того, что они необходимы для определения профиля земной поверхности. Радиометеорологические параметры должны быть представлены для одного места трассы распространения, и для дальних трасс в качестве такой точки должна быть выбрана середина трассы. Если выполняется предсказание области покрытия передатчика, то вполне разумно получить радиометеорологические параметры для точки размещения передатчика.

ТАБЛИЦА 1

Базовые исходные данные

Параметр	Единицы измерения	Мин.	Макс.	Описание
f	ГГц	0,03	3,0	Частота (ГГц)
p	%	1,0	50,0	Процент времени среднего года, в течение которого превышает рассчитанный уровень сигнала
p_L	%	1	99	Процент мест размещения, в которых превышает рассчитанный уровень сигнала
φ_t, φ_r	градусы	-80	+80	Широта передатчика, приемника
ψ_t, ψ_r	градусы	-180,0	180,0	Долгота передатчика, приемника (положительные значения = на восток от Гринвича)
h_{tg}, h_{rg}	м	1	3 000	Высота центра антенны над уровнем земли

3.2 Профиль земной поверхности

Для применения данного метода прогнозирования параметров распространения требуется профиль земной поверхности трассы передачи радиосигнала. В принципе, он состоит из трех массивов, каждый из которых имеет одинаковое число n следующих значений:

$$d_i = \text{расстояние от передатчика до } i\text{-той точки профиля (км);} \quad (1a)$$

$$h_i = \text{высота } i\text{-той точки профиля над уровнем моря (м);} \quad (1b)$$

$$g_i = h_i + \text{высота препятствия в } i\text{-той точки профиля (м),} \quad (1c)$$

где:

i : 1, 2, 3 ... n = номер точки профиля;

n : количество точек профиля.

Отметим, что первой точкой профиля является передатчик. Следовательно, $d_1 = 0$, а h_1 равна высоте земной поверхности в точке размещения передатчика (в метрах над уровнем моря). Аналогично, n -ой точкой профиля является приемник. Следовательно, d_n = протяженности трассы в км, а h_n равна высоте земной поверхности в точке размещения приемника (в метрах над уровнем моря). Если для профиля трассы нет данных о преобладающих высотах препятствий, то $g_i = h_i$.

Поскольку стандартных значений для категорий препятствий не существует, то и в настоящей Рекомендации не определяется, какие типы препятствий или какие высоты следует использовать. Следует отметить, что, если используются значения высоты препятствия, то это должны быть "типовые" значения высоты, которые повышают точность модели, а не физические значения высоты существующих препятствий. Для сведения могут быть полезными типы препятствий, приведенные в таблице 2. В настоящей Рекомендации установка высоты препятствий, равной нулю, соответствует исключению из модели потерь на препятствии.

ТАБЛИЦА 2

Типовые типы препятствий

Тип препятствий	Типовая высота препятствия (м)	Модель потерь на препятствии
Открытая местность/сельская местность/водная поверхность	10	уравнение (54b)
Пригороды	10	уравнение (54a)
Городские кварталы/отдельные деревья/лес	15	уравнение (54a)
Плотная городская застройка	20	уравнение (54a)

3.3 Климатические зоны для радиосвязи

Необходимы также данные о том, трассы какой длины находятся в климатических зонах для радиосвязи, описанных в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3

Климатические зоны для радиосвязи

Тип зоны	Код	Определение
Побережье	A1	Побережье и береговые зоны, т. е. суша, граничащая с морем на высоте до 100 м относительно среднего уровня морской воды, на расстоянии до 50 км от ближайшего моря. Там, где нет данных с точностью 100 м, может использоваться примерное значение
Территория, удаленная от моря	A2	Вся суша, за исключением побережья и береговых зон, определенных выше, как "побережье"
Море	B	Моря, океаны и иные большие водоемы (т. е. покрывающие круг диаметром, как минимум, 100 км)

Для максимального соответствия результатов, полученных различными администрациями, настоятельно рекомендуется, чтобы расчеты по этой процедуре выполнялись по цифровой карте мира МСЭ (IDWM), которую можно получить в БР как в серверном варианте, так и для ПК. Если все точки трассы находятся, как минимум, на расстоянии 50 км от моря и иных больших водоемов, то используется только категория "территория, удаленная от моря".

3.4 Расстояние от терминалов до побережья

Если трасса проходит по зоне B, то требуется еще два параметра – d_{ct} , d_{cr} , определяющие расстояние от берега до передатчика и приемника (км), соответственно, в направлении на другой терминал. Для терминалов, расположенных на судне или на морской платформе, это расстояние = 0.

3.5 Основные радиометеорологические параметры

В процедуре предсказания для описания изменения рефракции атмосферы требуется два радиометеорологических параметра:

- ΔN (N -единиц/км), средняя вертикальная скорость изменения коэффициента рефракции в нижнем километре атмосферы, она представляет собой данные, на основе которых может быть рассчитан соответствующий эффективный радиус Земли для выполнения анализа профиля трассы и препятствий на трассе. Отметим, что в этой процедуре ΔN является положительным значением;
- N_0 (N -единицы), преломляющая способность поверхности на уровне моря, используется только в модели тропосферного рассеяния в качестве меры изменчивости механизма тропосферного рассеяния.

В Дополнении 1 приводятся мировые карты значений ΔN и N_0 и файлы данных, содержащие цифровые карты, имеющиеся в Бюро.

3.6 Распространение по атмосферному волноводу

Степень, до которой будут увеличены уровни сигналов из-за аномального распространения, в частности, по атмосферному волноводу, оценивается параметром β_0 (%), процентом времени, в течение которого можно ожидать, что в нижних 100 м атмосферы вертикальные скорости изменения коэффициента рефракции превышают значение 100 N -единиц/км. Значение β_0 рассчитывается следующим образом.

Рассчитать параметр μ_1 , который зависит от того, какая часть трассы пролегает над сушей (территория, удаленная от моря и/или побережье), и какая – над водой:

$$\mu_1 = \left(10^{\frac{-d_{tm}}{16-6,6\tau}} + 10^{-5 \cdot (0,496+0,354\tau)} \right)^{0,2}, \quad (2)$$

где величина μ_1 должна ограничиваться значениями $\mu_1 \leq 1$

и

$$\tau = 1 - e^{-\left(4,12 \times 10^{-4} \times d_{tm}^{2,41}\right)}, \quad (3)$$

d_{tm} : наиболее продолжительная непрерывная сухопутная часть (территория, удаленная от моря + побережье) дуги большого круга (км);

d_{lm} : наиболее продолжительная непрерывная сухопутная часть дуги большого круга (км), пролегающая по территории, удаленной от моря.

Для получения значений d_{tm} и d_{lm} должны использоваться климатические зоны для радиосвязи, определенные в таблице 3. Если все точки трассы находятся на расстоянии, как минимум, 50 км от моря или других больших водоемов, то используется только категория "территория, удаленная от моря", и значения d_{tm} и d_{lm} равны длине трассы d .

Рассчитать параметр μ_4 , который зависит от μ_1 и от географической широты середины трассы в градусах:

$$\begin{aligned} \mu_4 &= \mu_1^{(-0,935+0,0176|\varphi|)} && \text{для } |\varphi| \leq 70^\circ \\ \mu_4 &= \mu_1^{0,3} && \text{для } |\varphi| > 70^\circ \end{aligned}, \quad (4)$$

где:

φ : географическая широта середины трассы (градусы).

Рассчитать β_0 :

$$\beta_0 = \begin{cases} 10^{-0,015|\varphi|+1,67} \mu_1 \mu_4 & \% & \text{для } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 4,17 \mu_1 \mu_4 & \% & \text{для } |\varphi| > 70^\circ \end{cases}. \quad (5)$$

3.7 Эффективный радиус Земли

Средний коэффициент k_{50} эффективного радиуса Земли для трассы определяется уравнением:

$$k_{50} = \frac{157}{157 - \Delta N}. \quad (6)$$

Значение средней вертикальной скорости изменения коэффициента рефракции ΔN можно получить из рисунка 1, используя в качестве описателя трассы широту и долготу середины трассы.

Среднее значение эффективного радиуса Земли a_e определяется выражением:

$$a_e = 6371 \cdot k_{50} \quad \text{км}. \quad (7a)$$

Эффективный радиус Земли a_β , превышаемый в течение времени β_0 , определяется выражением:

$$a_\beta = 6371 \cdot k_\beta \quad \text{км}, \quad (7b)$$

где $k_\beta = 3,0$ – оценка коэффициента эффективного радиуса Земли, превышаемого в течение времени β_0 .

3.8 Параметры, полученные из анализа профиля трассы

Значения множества параметров трассы, необходимых для расчетов, и показанных в таблице 4, должны быть получены в ходе начального анализа профиля трассы на основе значения a_e , вычисленного из уравнения (7а). Информация о получении данных, формировании и анализе профиля трассы приведена в Дополнении 2 настоящего Приложения.

ТАБЛИЦА 4

Значения параметров, которые должны быть получены из анализа профиля трассы

Параметр	Описание
d	Расстояние по дуге большого круга (км)
d_{lt}, d_{lr}	Расстояние от передающей и приемной антенн до соответствующих им горизонтов (км)
θ_t, θ_r	Углы места передающей и приемной антенн соответственно (мрад)
θ	Угловое расстояние трассы (мрад)
h_{ts}, h_{rs}	Высота антенного центра над средним уровнем моря (м)
h_{tc}, h_{rc}	максимум(h_{ts}, g_t) и максимум (h_{rs}, g_n) соответственно
h_{te}, h_{re}	Эффективные высоты антенн над уровнем земли (м)
d_b	Суммарная длина участков трасс, проходящих над водной поверхностью (км)
ω	Доля общей трассы, проходящая над водной поверхностью: $\omega = d_b/d,$ где d – расстояние по дуге большого круга (км), рассчитанное по уравнению (63). Для полностью сухопутных трасс: $\omega = 0$

4 Процедура предсказания

4.1 Общее описание

В настоящем разделе описана полная процедура предсказания. Во-первых, оцениваются основные потери передачи L_b (дБ), не превышаемые в течение требуемого процента времени года $p\%$ и в 50% мест размещения, как описано в § 4.2–4.6 (т. е. основные потери передачи из-за распространения по линии прямой видимости, потери за счет дифракции, потери за счет тропосферного рассеяния, потери из-за распространения по атмосферному волноводу/отражения от слоев атмосферы и потери из-за комбинации этих механизмов распространения, для того чтобы предсказать основные потери передачи, соответственно). В § 4.7–4.10 описываются методы учета влияния препятствий на терминал, влияния изменения местоположения и потери на проникновение внутрь здания. В итоге в § 4.11 приводятся выражения, которые связывают основные потери передачи с напряженностью поля (дБ(мкВ/м)) для эффективной изучаемой мощности = 1 кВт.

4.2 Распространение по линии прямой видимости (с учетом кратковременных явлений)

Приведенные далее значения следует оценить, как для трасс прямой видимости, так и для трансгоризонтных трасс.

Основные потери передачи в свободном пространстве определяются выражением:

$$L_{bfs} = 92,44 + 20 \log f + 20 \log d \quad \text{дБ.} \quad (8)$$

Корректировка, учитывающая влияние многолучевости и фокусировки в течение p и β_0 процентов времени, соответственно, описываются выражениями:

$$E_{sp} = 2,6 \cdot \left(1 - e^{-\frac{d_{lt} + d_{lr}}{10}} \right) \cdot \log\left(\frac{p}{50}\right) \quad \text{дБ}, \quad (9a)$$

$$E_{s\beta} = 2,6 \cdot \left(1 - e^{-\frac{d_{lt} + d_{lr}}{10}} \right) \cdot \log\left(\frac{\beta_0}{50}\right) \quad \text{дБ}. \quad (9b)$$

Рассчитаем основные потери передачи по линии прямой видимости (вне зависимости от того, является ли трасса в действительности трассой прямой видимости), которые не превышаются в течение $p\%$ времени, следующим образом:

$$L_{b0p} = L_{bfs} + E_{sp} \quad \text{дБ}. \quad (10)$$

Рассчитаем основные потери передачи по линии прямой видимости (вне зависимости от того, является ли трасса в действительности трассой прямой видимости), которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени, следующим образом:

$$L_{b0\beta} = L_{bfs} + E_{s\beta} \quad \text{дБ}. \quad (11)$$

4.3 Распространение за счет дифракции

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Было найдено, что этому методу, взятому из Рекомендации МСЭ-R P.452, присущи некоторые ограничения¹ и, следовательно, в настоящее время ведется разработка улучшенного метода. Разрабатывается совершенно иной метод предсказания для распространения за счет дифракции, завершение работы над которым приведет к обновлению материала данного раздела.

Потери за счет дифракции рассчитываются по методу, основанному на конструкции Дейго для максимум, трех границ. Основная граница существует всегда и определяется как точка профиля с наибольшим параметром дифракции v . Вторичные границы могут также существовать на стороне передатчика и приемника основной границы. Потери из-за дифракции на существующих границах затем объединяются, и к ним применяется эмпирическая корректировка. Этот метод дает оценку потерь дифракции для трасс всех типов, включая трассы над морем и над территорией, удаленной от моря, или побережьем, вне зависимости от того, является и трасса гладкой или пересеченной.

Вышеописанный метод всегда используется для получения среднего эффективного радиуса Земли, как описано в § 4.3.1. Если требуется полное предсказание для $p = 50\%$, то выполнять расчет дифракции во второй раз не требуется.

В общем случае, когда $p < 50\%$, расчеты должны быть выполнены во второй раз для эффективного радиуса Земли = 3, как описано в § 4.3.2. Этот второй расчет позволяет получить оценку потерь за счет дифракции, которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени, где β_0 определяется из уравнения (5).

Затем вычисляются потери за счет дифракции, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, для $0,001\% \leq p \leq 50\%$, с применением процедуры ограничения или интерполяции, описанной в § 4.3.3.

В данном методе используется аппроксимация до единственного отображения потерь из-за дифракции на границе в функции безразмерного параметра v определяемого выражением:

$$J(v) = 6,9 + 20 \cdot \log\left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1\right). \quad (12)$$

Отметим, что $J(-0,78) \approx 0$, и это значение является нижним пределом, когда еще может использоваться аппроксимация. Для $v \leq -0,78$ $J(v)$ устанавливается равным нулю.

¹ В частности, при измерениях, выполненных в Швейцарии, обнаружено, что результаты для девиации 15 дБ не соответствуют действительности.

4.3.1 Средние потери за счет дифракции

Средние потери за счет дифракции L_{d50} (дБ), вычисляются с применением среднего значения эффективного радиуса Земли a_e , определенного из уравнения (7а).

Средние потери за счет дифракции для основной границы

Рассчитать корректировку ζ_m для наклона всей трассы из уравнения:

$$\zeta_m = \cos \left(\tan^{-1} \left(10^{-3} \cdot \frac{h_{rc} - h_{tc}}{d} \right) \right). \quad (13)$$

Найти параметр дифракции для главной (т. е. основной) границы v_{m50} , используя выражение:

$$v_{m50} = \max_{i=2}^{n-1} \left(\zeta_m H_i \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d}{\lambda d_i \cdot (d - d_i)}} \right), \quad (14)$$

где просвет по вертикали H_i равен:

$$H_i = g_i + 10^3 \frac{d_i \cdot (d - d_i)}{2a_e} - \frac{h_{tc} \cdot (d - d_i) + h_{rc} \cdot d_i}{d}, \quad (14a)$$

и:

λ : длина волны (м) = $0,3/f$;

f : частота (ГГц);

d : протяженность трассы (км);

d_i : расстояние от передатчика до i -той точки профиля (км), см. § 3.2;

$h_{tc,rc}$: $\max(h_{ts,rs}, g_{1,n})$, соответственно.

Установить i_{m50} = номеру точки профиля с максимальным значением v_{m50} .

Рассчитать средние потери за счет дифракции на границе для основной границы L_{m50} , используя выражение:

$$\begin{aligned} L_{m50} &= J(v_{m50}), \quad \text{если } v_{m50} \geq -0,78, \\ &= 0 \quad \text{в ином случае.} \end{aligned} \quad (15)$$

Если $L_{m50} = 0$, то и средние потери за счет дифракции L_{d50} , и потери за счет дифракции $L_{d\beta}$, которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени, равны нулю, и нет необходимости далее считать потери за счет дифракции.

В противном случае следует исследовать возможные дополнительные потери из-за вторичных границ на стороне передатчика и приемника основной границы, следующим образом.

Средние потери за счет дифракции для вторичной границы на стороне передатчика

Если $i_{m50} = 2$, то вторичной границы на стороне передатчика не существует, и соответствующие потери из-за дифракции L_{t50} должны быть установлены равными нулю. В противном случае, расчет выполняется следующим образом. Рассчитать корректировку ζ_t для наклона трассы от передатчика до основной границы:

$$\zeta_t = \cos \left(\tan^{-1} \left(10^{-3} \cdot \frac{g_{i_{m50}} - h_{tc}}{d_{i_{m50}}} \right) \right). \quad (16)$$

Найти вторичную границу на стороне передатчика и рассчитать для нее параметр дифракции v_{t50} , используя выражение:

$$v_{t50} = \max_{i=2}^{i_{m50}-1} \left(\zeta_t H_i \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d_{i_{m50}}}{\lambda d_i \cdot (d_{i_{m50}} - d_i)}} \right), \quad (17)$$

где:

$$H_i = g_i + 10^3 \frac{d_i \cdot (d_{i_{m50}} - d_i)}{2a_e} - \frac{h_{rc} \cdot (d_{i_{m50}} - d_i) + g_{i_{m50}} \cdot d_i}{d_{i_{m50}}}. \quad (17a)$$

Установить i_{t50} = номеру точки профиля для вторичной границы на стороне передатчика (т. е. номеру элемента массива высот поверхности земли, соответствующего величине v_{t50}).

Рассчитать средние потери за счет дифракции на границе для вторичной границы на стороне передатчика L_{t50} , используя выражение:

$$L_{t50} = J(v_{t50}), \quad \text{если } v_{t50} \geq -0,78 \text{ и } i_{m50} > 2, \\ = 0 \quad \text{в ином случае.} \quad (18)$$

Средние потери за счет дифракции для вторичной границы на стороне приемника

Если $i_{m50} = n - 1$, то вторичной границы на стороне приемника не существует, и соответствующие потери из-за дифракции L_{r50} должны быть установлены равными нулю. В противном случае, расчет выполняется следующим образом. Рассчитать корректировку ζ_r для наклона трассы от основной границы до приемника:

$$\zeta_r = \cos \left(\tan^{-1} \left(10^{-3} \cdot \frac{h_{rc} - g_{i_{m50}}}{d - d_{i_{m50}}} \right) \right) \quad (19)$$

Найти параметр дифракции для вторичной границы на стороне приемника v_{r50} , используя выражение:

$$v_{r50} = \max_{i=i_{m50}+1}^{n-1} \left(\zeta_r H_i \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} (d - d_{i_{m50}})}{\lambda (d_i - d_{i_{m50}}) \cdot (d - d_i)}} \right), \quad (20)$$

где:

$$H_i = g_i + 10^3 \frac{(d_i - d_{i_{m50}}) \cdot (d - d_i)}{2a_e} - \frac{g_{i_{m50}} \cdot (d - d_i) + h_{rc} \cdot (d_i - d_{i_{m50}})}{d - d_{i_{m50}}}. \quad (20a)$$

Установить i_{r50} = номеру точки профиля для вторичной границы на стороне приемника (т. е. номеру элемента массива высот поверхности земли, соответствующего величине v_{r50}).

Рассчитать средние потери за счет дифракции на границе для вторичной границы на стороне приемника L_{r50} , используя выражение:

$$L_{r50} = J(v_{r50}), \quad \text{если } v_{r50} \geq -0,78 \text{ и } i_{m50} < n - 1, \\ = 0 \quad \text{в ином случае.} \quad (21)$$

Объединение потерь на границе для средней кривизны земной поверхности

Рассчитать средние потери за счет дифракции L_{d50} , используя выражение:

$$L_{d50} = L_{m50} + \left(1 - e^{-\frac{L_{m50}}{6}}\right) \cdot (L_{l50} + L_{r50} + 10 + 0,04d), \text{ если } v_{m50} > -0,78, \quad (22)$$

$$= 0 \quad \text{в ином случае.}$$

В уравнении (22) L_{l50} будет равно нулю, если вторичной границы на стороне передатчика не существует, и, аналогично, L_{r50} будет равно нулю, если не существует вторичной границы на стороне приемника.

Если $L_{d50} = 0$, то потери за счет дифракции, которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени, будут также равны нулю.

Если требуется выполнить предсказание только для $p = 50\%$, то никаких расчетов дифракции более не требуется (см. § 4.3.3). В противном случае, потери за счет дифракции, которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени, должны быть рассчитаны следующим образом.

4.3.2 Потери за счет дифракции, которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени

Потери за счет дифракции, которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени, вычисляются с применением значения эффективного радиуса Земли a_β , превышаемого в течение $\beta_0\%$ времени, определенного в уравнении (7b). В этом втором расчете дифракции для создания конструкции Дейго, должны использоваться те же границы, которые были определены для среднего случая. Затем расчет таких потерь из-за дифракции выполняется следующим образом.

Потери за счет дифракции на основной границе, которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени

Найти параметр дифракции для главной (т. е. основной) границы $v_{m\beta}$, используя выражение:

$$v_{m\beta} = \zeta_m H_{i_{m\beta}} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d}{\lambda d_{i_{m50}} \cdot (d - d_{i_{m50}})}}, \quad (23)$$

где:

$$H_{i_{m\beta}} = g_{i_{m50}} + 10^3 \frac{d_{i_{m50}} \cdot (d - d_{i_{m50}})}{2a_\beta} - \frac{h_{tc} \cdot (d - d_{i_{m50}}) + h_{rc} \cdot d_{i_{m50}}}{d}. \quad (23a)$$

Рассчитать потери за счет дифракции на границе для основной границы $L_{m\beta}$, используя выражение:

$$L_{m\beta} = J(v_{m\beta}), \text{ если } v_{m\beta} \geq -0,78, \quad (24)$$

$$= 0 \quad \text{в ином случае.}$$

Потери за счет дифракции для вторичной границы на стороне передатчика, которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени

Если $L_{l50} = 0$, то $L_{l\beta} = 0$. В противном случае, рассчитаем параметр дифракции для вторичной границы на стороне передатчика $v_{l\beta}$, используя выражение:

$$v_{l\beta} = \zeta_l H_{i_{l\beta}} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d_{i_{m50}}}{\lambda d_{i_{l50}} \cdot (d_{i_{m50}} - d_{i_{l50}})}}, \quad (25)$$

где:

$$H_{i_{r\beta}} = g_{i_{t50}} + 10^3 \frac{d_{i_{t50}} \cdot (d_{i_{m50}} - d_{i_{t50}})}{2a_{\beta}} - \frac{h_{rc} \cdot (d_{i_{m50}} - d_{i_{t50}}) + g_{i_{m50}} \cdot d_{i_{t50}}}{d_{i_{m50}}}. \quad (25a)$$

Рассчитать потери за счет дифракции на границе для вторичной границы на стороне передатчика $L_{r\beta}$, используя выражение:

$$L_{r\beta} = J(v_{r\beta}), \quad \text{если } v_{r\beta} \geq -0,78, \\ = 0 \quad \text{в ином случае.} \quad (26)$$

Потери за счет дифракции для вторичной границы на стороне приемника, которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени

Если $L_{r50} = 0$, то $L_{r\beta} = 0$. В противном случае, рассчитаем параметр дифракции для вторичной границы на стороне $v_{r\beta}$, используя выражение:

$$v_{r\beta} = \zeta_r H_{i_{r\beta}} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} (d - d_{i_{m50}})}{\lambda (d_{i_{r50}} - d_{i_{m50}}) \cdot (d - d_{i_{r50}})}}, \quad (27)$$

где:

$$H_{i_{r\beta}} = g_{i_{r50}} + 10^3 \frac{(d_{i_{r50}} - d_{i_{m50}}) \cdot (d - d_{i_{r50}})}{2a_{\beta}} - \frac{g_{i_{m50}} \cdot (d - d_{i_{r50}}) + h_{rc} \cdot (d - d_{i_{m50}})}{d - d_{i_{m50}}}. \quad (27a)$$

Рассчитать потери за счет дифракции на границе для вторичной границы на стороне приемника $L_{r\beta}$, используя выражение:

$$L_{r\beta} = J(v_{r\beta}), \quad \text{если } v_{r\beta} \geq -0,78, \\ = 0 \quad \text{в ином случае.} \quad (28)$$

Объединенные потери на границе, которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени

Рассчитать потери за счет дифракции $L_{d\beta}$, которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени, используя выражение:

$$L_{d\beta} = L_{m\beta} + \left(1 - e^{-\frac{L_{m\beta}}{6}}\right) \cdot (L_{r\beta} + L_{r\beta} + 10 + 0,04d), \quad \text{если } v_{m\beta} > -0,78, \\ = 0 \quad \text{в ином случае.} \quad (29)$$

4.3.3 Потери за счет дифракции, которые не превышаются в течение $p\%$ времени

Применение двух возможных значений коэффициента эффективного радиуса Земли регулируется при помощи коэффициента интерполяции F_i на основе логнормального распределения потерь из-за дифракции в диапазоне $\beta_0\% < p \leq 50\%$, используя выражение:

$$F_i = 0 \quad p = 50\%, \quad (30a)$$

$$= \frac{I\left(\frac{p}{100}\right)}{I\left(\frac{\beta_0}{100}\right)} \quad 50\% > p > \beta_0\%, \quad (30b)$$

$$= 1 \quad \beta_0\% \geq p, \quad (30c)$$

где $I(x)$ – это обратное дополнительное кумулятивное нормальное распределение в зависимости от вероятности x . Аппроксимация зависимости $I(x)$, которая может уверенно использоваться для $x \leq 0,5$, приведена в Дополнении 3 настоящего Приложения.

Теперь получим потери за счет дифракции L_{dp} , которые не превышаются в течение $p\%$ времени, используя выражение:

$$L_{dp} = L_{d50} + (L_{d\beta} - L_{d50}) \cdot F_i \quad \text{дБ}, \quad (31)$$

где L_{d50} и $L_{d\beta}$ определяются из уравнений (22) и (29), соответственно, а F_i определяется из уравнений (30a)–(30c), в зависимости от значений p и β_0 .

Средние основные потери передачи, обусловленные дифракцией L_{bd50} , определяется выражением:

$$L_{bd50} = L_{bfs} + L_{d50} \quad \text{дБ}, \quad (32)$$

где L_{bfs} определяется из уравнения (8).

Основные потери передачи, обусловленные дифракцией, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, определяется выражением:

$$L_{bd} = L_{b0p} + L_{dp} \quad \text{дБ}, \quad (33)$$

где L_{b0p} определяется из уравнения (10).

4.4 Распространение за счет тропосферного рассеяния

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Для процентов времени много меньше 50%, трудно отделить влияние настоящего режима тропосферного рассеяния от влияния других вторичных явлений распространения, которые оказывают похожее влияние на процесс распространения сигнала. Следовательно, модель “тропосферного рассеяния”, принятая в настоящей Рекомендации, является эмпирическим обобщением концепции тропосферного рассеяния, и охватывает также и эти эффекты распространения. Она позволяет выполнять непрерывное предсказание основных потерь передачи для p от 0,001% до 50%, таким образом, соединяя для малых процентов времени модель атмосферного волновода и модель отражения от слоев атмосферы с настоящим режимом “тропосферного рассеяния”, что вполне пригодно для слабого остаточного поля, превышаемого в течение больших процентов времени.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Эта модель предсказания для тропосферного рассеяния была получена для целей предсказания помех, и она непригодна для расчета условий распространения для более 50% времени, так как меняет качественные показатели тропосферных радиорелейных систем.

Основные потери передачи из-за тропосферного рассеяния L_{bs} (дБ), которые не превышаются в течение любого процента времени $p < 50\%$, определяются выражением:

$$L_{bs} = 190,1 + L_f + 20 \log d + 0,573 \theta - 0,15 N_0 - 10,125 \left(\log \left(\frac{50}{p} \right) \right)^{0,7} \quad \text{дБ}, \quad (34)$$

где:

L_f : частотно-зависимые потери:

$$L_f = 25 \cdot \log(f) - 2,5 \cdot \left[\log \left(\frac{f}{2} \right) \right]^2 \quad \text{дБ}; \quad (35)$$

N_0 : преломляющая способность поверхности на уровне моря в точке середины трассы, которая может быть найдена из рисунка 2.

4.5 Распространение в атмосферном волноводе и за счет отражения от слоев атмосферы

Основные потери передачи L_{ba} (дБ), обусловленные атмосферным волноводом и отражением от слоев атмосферы, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, определяется выражением:

$$L_{ba} = A_f + A_d(p) \quad \text{дБ}, \quad (36)$$

где:

A_f : суммарные фиксированные объединенные потери (за исключением локальных потерь на отражение) между антеннами и структурой аномального распространения в атмосфере:

$$A_f = 102,45 + 20 \log f + 20 \log (d_{lt} + d_{lr}) + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr} \quad \text{дБ}; \quad (37)$$

A_{st}, A_{sr} : потери за счет дифракции на экранах вокруг передающей и приемной станций соответственно:

$$A_{st, sr} = \begin{cases} 20 \log(1 + 0,361 \theta''_{t,r} (f \cdot d_{lt,lr})^{1/2}) + 0,264 \theta''_{t,r} f^{1/3} \quad \text{дБ} & \text{для } \theta''_{t,r} > 0 \text{ мрад,} \\ 0 & \text{дБ для } \theta''_{t,r} \leq 0 \text{ мрад,} \end{cases} \quad (38)$$

где:

$$\theta''_{t,r} = \theta_{t,r} - 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{мрад}; \quad (38a)$$

A_{ct}, A_{cr} : корректировка атмосферного волновода над морской поверхностью для передающей и приемной станций соответственно:

$$A_{ct, cr} = -3 e^{-0,25 d_{ct, cr}^2} (1 + \tanh(0,07(50 - h_{ts, rs}))) \quad \text{дБ для } \begin{cases} \omega \geq 0,75, \\ d_{ct, cr} \leq d_{lt, lr}, \end{cases} \quad (39)$$

$$d_{ct, cr} \leq 5 \text{ км,}$$

$$A_{ct, cr} = 0 \quad \text{дБ для всех условий.} \quad (39a)$$

Полезно отметить, что уравнение (39) используется при очень ограниченном наборе условий.

$A_d(p)$: потери, зависящие от процента времени и углового расстояния в рамках механизмов аномального распространения:

$$A_d(p) = \gamma_d \quad \theta' + A(p) \quad \text{дБ}, \quad (40)$$

где:

γ_d : конкретное ослабление:

$$\gamma_d = 5 \times 10^{-5} a_e f^{1/3} \quad \text{дБ/мрад}; \quad (41)$$

θ' : угловое расстояние (при необходимости, скорректированное (при помощи уравнения (38a)), для того чтобы иметь возможность применения модели экранирования, описанной уравнением (36)):

$$\theta' = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta'_t + \theta'_r \quad \text{мрад}, \quad (42)$$

$$\theta'_{t,r} = \begin{cases} \theta_{t,r} & \text{мрад для } \theta_{t,r} \leq 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{мрад,} \\ 0,1 d_{lt,lr} & \text{мрад для } \theta_{t,r} > 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{мрад;} \end{cases} \quad (42a)$$

$A(p)$: изменение процента времени (кумулятивное распределение):

$$A(p) = -12 + (1,2 + 3,7 \times 10^{-3} d) \log \left(\frac{p}{\beta} \right) + 12 \left(\frac{p}{\beta} \right)^\Gamma \quad \text{дБ}, \quad (43)$$

$$\Gamma = \frac{1,076}{(2,0058 - \log \beta)^{1,012}} \times e^{-\left(9,51 - 4,8 \log \beta + 0,198 (\log \beta)^2\right) \times 10^{-6} \cdot d^{1,13}}, \quad (43a)$$

$$\beta = \beta_0 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \quad \%; \quad (44)$$

μ_2 : корректировка геометрии трассы:

$$\mu_2 = \left(\frac{500}{a_e} \frac{d^2}{\left(\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}}\right)^2} \right)^\alpha. \quad (45)$$

Значение μ_2 не должно превышать 1.

$$\alpha = -0,6 - \varepsilon \cdot 10^{-9} \cdot d^{3,1} \cdot \tau, \quad (45a)$$

где:

$$\varepsilon = 3,5;$$

τ : определяется в уравнении (3), и значение α не должно быть менее $-3,4$;

μ_3 : корректировка неровностей рельефа:

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{для } h_m \leq 10 \text{ м,} \\ e^{-4,6 \times 10^{-5} (h_m - 10) (43 + 6 d_I)} & \text{для } h_m > 10 \text{ м;} \end{cases} \quad (46)$$

и:

$$d_I = \min (d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \quad \text{км.} \quad (46a)$$

Остальные слагаемые определены в таблицах 1 и 2 и в Дополнении 2 настоящего Приложения.

4.6 Основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в 50% местоположений, без учета эффекта отражения от терминала

Описанную далее процедуру следует применять к результатам описанных выше расчетов для всех трасс для того, чтобы рассчитать основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени в 50% местоположений. Для того чтобы избежать физически невозможных неоднородностей в результатах предсказаний теоретических основных потерь передачи, вышеописанные модели распространения должны быть смешаны для получения модифицированных значений основных потерь передачи для того, чтобы достичь общего предсказания для $p\%$ времени и 50% местоположений.

Рассчитать коэффициент интерполяции F_j , который позволит учесть угловое расстояние:

$$F_j = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \tanh \left(3,0 \cdot \xi \cdot \frac{(\theta - \Theta)}{\Theta} \right) \right), \quad (47)$$

где:

Θ : фиксированный параметр, определяющий диапазон углов соответствующего слияния моделей, он выставляется = 0,3;

ξ : фиксированный параметр, определяющий спад характеристики слияния в конце диапазона, он выставлен = 0,8;

θ : угловое расстояние (мрад), определенное в таблице 7.

Рассчитать коэффициент интерполяции F_k , который позволит учесть расстояние по дуге большого круга:

$$F_k = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \tanh \left(3,0 \cdot \kappa \cdot \frac{(d - d_{sw})}{d_{sw}} \right) \right), \quad (48)$$

где:

d : протяженность трассы по дуге большого круга (км), определенная в таблице 3;

d_{sw} : фиксированный параметр, определяющий диапазон расстояний соответствующего слияния; он выставляется = 20;

κ : фиксированный параметр, определяющий спад характеристики слияния на границах диапазона, устанавливается = 0,5.

Рассчитать теоретические минимальные потери передачи L_{minb0p} (дБ), связанные с распространением по линии прямой видимости и дифракцией той части трассы, которая проходит над морем:

$$L_{minb0p} = \begin{cases} L_{b0p} + (1 - \omega)L_{dp} & \text{для } p < \beta_0 \\ L_{bd50} + (L_{b0\beta} + (1 - \omega)L_{dp} - L_{bd50}) \cdot F_i & \text{для } p \geq \beta_0 \end{cases} \quad \text{дБ}, \quad (49)$$

где:

L_{b0p} : теоретические основные потери передачи по линии прямой видимости, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, определяемые уравнением (10);

$L_{b0\beta}$: теоретические основные потери передачи по линии прямой видимости, которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени, определяемые уравнением (11);

L_{dp} : потери из-за дифракции, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, уравнение (31), рассчитанные с использованием метода, описанного в § 4.3;

L_{bd50} : средние основные потери из-за дифракции (уравнение (32)), рассчитанные с использованием метода, описанного в § 4.3;

F_i : для коэффициента интерполяции дифракции эффективного радиуса Земли, определяемые уравнением (30).

Рассчитать теоретические минимальные основные потери передачи L_{minbap} (дБ), обусловленные изменением сигнала при распространении по линии прямой видимости и при трансгоризонтном распространении:

$$L_{minbap} = \eta \cdot \ln \left(e^{\left(\frac{L_{ba}}{\eta} \right)} + e^{\left(\frac{L_{b0p}}{\eta} \right)} \right) \quad \text{дБ}, \quad (50)$$

где:

L_{ba} : основные потери передачи, обусловленные атмосферным волноводом и отражением от слоев атмосферы, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, определяемые уравнением (36);

L_{b0p} : теоретические основные потери передачи по линии прямой видимости, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, определяемые уравнением (10);

$\eta = 2,5$.

Рассчитать теоретические минимальные основные потери передачи L_{bda} (дБ), обусловленные дифракцией и изменениями сигнала при распространении в атмосферном волноводе и при отражении от слоев атмосферы:

$$L_{bda} = \begin{cases} L_{bd} & \text{для } L_{\min bap} > L_{bd} \\ L_{\min bap} + (L_{bd} - L_{\min bap}) \cdot F_k & \text{для } L_{\min bap} \leq L_{bd} \end{cases} \quad \text{дБ}, \quad (51)$$

где:

- L_{bd} : основные потери передачи из-за дифракции, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, из уравнения (33);
- $L_{\min bap}$: теоретические минимальные основные потери передачи, обусловленные распространением по линии прямой видимости и трансгоризонтным распространением, из уравнения (50);
- F_k : коэффициент интерполяции, определяемый уравнением (48), в соответствии со значением расстояния трассы по дуге большого круга d .

Рассчитать модифицированные основные потери передачи L_{bam} (дБ), учитывающие изменение сигнала из-за дифракции, при распространении по линии прямой видимости или в атмосферном волноводе/из-за отражения от слоев атмосферы:

$$L_{bam} = L_{bda} + (L_{\min b0p} - L_{bda}) \cdot F_j \quad \text{дБ}, \quad (52)$$

где:

- L_{bda} : теоретические основные потери передачи, обусловленные дифракцией и распространением по линии прямой видимости или в атмосферном волноводе/из-за отражения от слоев атмосферы, определяемые уравнением (51);
- $L_{\min b0p}$: теоретические минимальные основные потери передачи, обусловленные распространением по линии прямой видимости и из-за дифракции на морских участках трассы, определяемые уравнением (49);
- F_j : коэффициент интерполяции, определяемый уравнением (47), в соответствии с величиной углового расстояния трассы θ .

Рассчитать основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени и для 50% местоположений, без учета влияния отражения от терминала L_{bu} (дБ), используя выражение:

$$L_{bu} = -5 \cdot \log(10^{-0,2 \cdot L_{bs}} + 10^{-0,2 \cdot L_{bam}}) \quad \text{дБ}, \quad (53)$$

где:

- L_{bs} : основные потери передачи из-за тропосферного рассеяния, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, определяемые уравнением (34);
- L_{bam} : измененные основные потери передачи, учитывающие изменение сигнала из-за дифракции, распространения по линии прямой видимости, распространения в атмосферном волноводе и отражения от слоев атмосферы, определяемые уравнением (52).

4.7 Потери из-за отражения от терминала

Когда антенна передатчика или приемника расположена ниже высоты R_t или R_r – высоты земной поверхности, окружающей передатчик или приемник, потери из-за отражений от передатчика и приемника A_{ht} и A_{hr} рассчитываются следующим образом. Метод идентичен для приемника и для передатчика, поэтому в следующих формулах считается, что $A_h = A_{ht}$ или A_{hr} , $h = h_{tg}$ или h_{rg} и $R = R_t$ или R_r .

Если $h \geq R$ то $A_h = 0$.

Если $h < R$, то A_h может иметь одну из двух форм, в зависимости от типа отражения (см. таблицу 2):

$$A_h = J(v) - 6,03 \quad \text{дБ} \quad (54a)$$

или

$$A_h = -K_{h2} \log(h/R) \quad \text{дБ.} \quad (54b)$$

$J(v)$ вычисляются с применением уравнение (12).

Значения v и K_{h2} описываются выражениями:

$$v = K_{nu} \sqrt{h_{dif} \theta_{clut}}; \quad (54c)$$

$$h_{dif} = R - h \text{ (м);} \quad (54d)$$

$$\theta_{clut} = \tan^{-1} (h_{dif} / 27) \text{ (градусы);} \quad (54e)$$

$$K_{h2} = 21,8 + 6,2 \log(f); \quad (54f)$$

$$K_{nu} = 0,342 \sqrt{f}; \quad (54g)$$

f : частота (ГГц).

Форма уравнения (54a) представляет собой потери Френеля из-за огибания препятствия, и будет применяться для таких категорий отражения как здания, В частности в городских условиях все препятствия будут именно такого типа.

Уравнение (54b) представляет собой функцию зависимости коэффициента усиления от высоты ниже первого интерференционного максимума, обусловленного интерференцией двух сигналов, отраженных от земли. Это не представляет собой отражения как такового, но этот упрощенный подход должен рассматриваться так же, как и отражение. Если необходимо, он будет использоваться как "не многолучевый" тип отражения R , который представляет собой высоту первого лепестка помехи.

Основные потери передачи L_{bc} (дБ), которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в 50% местоположений, с учетом влияния потерь из-за отражения от терминала, определяется выражением:

$$L_{bc} = L_{bu} + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{дБ,} \quad (55)$$

где:

L_{bu} : основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в 50% местоположений на (или выше, если требуется) высоте типичного отражающего местного препятствия, определяемые уравнением (53);

$A_{ht,hr}$: дополнительные потери, учитывающие экранирование отражений от передатчика и приемника, уравнения (54a)–(54b) при необходимости. Если экранирования нет, то эти величины должны быть установлены равными нулю.

4.8 Изменение местоположения потерь

В настоящей Рекомендации, и в общем случае, изменение местоположения относится к изменениям пространственных статистических данных о свойствах подстилающей поверхности. Этот результат полезен в масштабах гораздо более широких, чем изменения свойств подстилающей поверхности, и по сравнению с ними изменение трассы является несущественным. Поскольку изменение местоположения определяется без учета изменений, вносимых многолучевыми отражениями, оно не зависит от полосы частот системы.

При планировании радиосистем необходимо учитывать эффекты многолучевости. Влияние многолучевости для различных систем будет различным, и будет зависеть от ширины полосы частот, методов модуляции или схем кодирования. Рекомендации по учету этих эффектов даны в Рекомендации МСЭ-Р Р.1406.

Результаты анализа исчерпывающих данных показывают, что распределение средней напряженности поля из-за изменений подстилающей поверхности в городских условиях и в пригородах имеет приблизительно логнормальную зависимость с нулевым средним значением.

Значения стандартной девиации зависят от частоты и внешних условий, и эмпирические исследования показали, что значения имеют существенный разброс. Типичные значения для областей площадью 500 м × 500 м описываются следующим выражением:

$$\sigma_L = K + 1,3 \log(f) \quad \text{дБ}, \quad (56)$$

где:

$K = 5,1$ для приемников, антенны которых расположены ниже высоты препятствия в городских условиях, а в пригородах для систем подвижной связи с ненаправленными антеннами на высоте крыши автомобиля;

$K = 4,9$ для приемников с антеннами, расположенными на крышах домов, на высоте приблизительно равной высоте препятствия;

$K = 4,4$ для приемников в сельской местности;

f : требуемая частота (ГГц).

Если площадь области, для которой требуется определить изменение, более 500 м × 500 м, или, если изменение должно относиться ко всем областям на данном расстоянии, а не к отдельным областям, то значение σ_L будет существенно больше. Результаты эмпирических исследований позволяют предположить, что изменение местоположения увеличивается (по отношению к значениям для малых областей) на величину до 4 дБ для зоны радиусом 2 км, и на величину до 8 дБ для зоны радиусом 50 км.

Процент местоположений p_L может меняться от 1% до 99%. Настоящая модель недействительна для процента местоположений менее 1% или более 99%.

Следует отметить, что, для некоторых целей планирования (например, для многосторонних планов частотных назначений), как правило, потребуется использовать определение "изменения местоположения", которое учитывает определенную степень замираний из-за многолучевости. Оно будет учитывать случай подвижного приемника со стационарным положением в нуле многолучевости, или случай антенны на крыше здания, где должно приниматься множество частот, и антенну совершенно невозможно расположить оптимально. Кроме того, при таком планировании может потребоваться учесть изменчивость для области, размеры которой больше тех, которые предполагаются в настоящей Рекомендации.

С учетом вышесказанного, для планирования многих систем радиосвязи считаются приемлемыми значения, приведенные в таблице 5.

ТАБЛИЦА 5

Значения стандартной девиации изменения местоположения, используемые в определенных сценариях планирования

	Стандартная девиация (дБ)		
	100 МГц	600 МГц	2 000 МГц
Аналоговое радиовещание	8,3	9,5	–
Цифровое радиовещание	5,5	5,5	5,5

Если приемник расположен вблизи моря, то корректировка изменения местоположения применяться не должна.

Когда приемник/мобильная станция расположен на суше и вне здания, а его высота над уровнем земли равна или выше высоты типичного отражающего препятствия, разумно предположить, что изменение местоположения будет монотонно уменьшаться с увеличением высоты до тех пор, пока в какой-то

точке, оно совершенно исчезнет. В настоящей Рекомендации изменение местоположения из-за изменения высоты $u(h)$ определяется выражением:

$$\begin{aligned} u(h) &= 1 && \text{для } 0 \leq h < R, \\ u(h) &= 1 - \frac{(h-R)}{10} && \text{для } R \leq h < R+10, \\ u(h) &= 0 && \text{для } R+10 \leq h, \end{aligned} \quad (57)$$

где R (м) – высота типичного отражающего препятствия в месте размещения приемника/мобильной станции. Следовательно, для приемника/мобильной станции, находящихся вне зданий, стандартная девиация изменения местоположения, σ_L , определяемая либо из уравнения (56), либо по таблице 5, должна быть умножена на функцию изменения высоты $u(h)$, определяемую из уравнения (57), при расчете величины основных потерь передачи для значений $p_L\%$, не равных 50%.

4.9 Потери на проникновение сигнала внутрь здания

Потери на проникновение сигнала внутрь здания определяются как разница (дБ) между средней напряженностью поля (с учетом местоположения) вне стен здания на данной высоте над уровнем земли и средней напряженностью поля внутри этого же здания (с учетом местоположения) на той же высоте над уровнем земли.

Для приема внутри зданий должны быть учтены два существенных параметра. Первый – потери на проникновение сигнала внутрь здания, и второй – изменение потерь на проникновение сигнала внутрь здания из-за различных строительных материалов. Приведенные далее значения стандартной девиации учитывают большой разброс потерь на проникновение в здания, но не учитывают изменение местоположения внутри различных зданий. Следует отметить, что имеется очень ограниченный объем достоверной информации о результатах измерения потерь на проникновение сигнала внутрь здания. Можно использовать ориентировочные значения потерь на проникновение сигнала внутрь здания, приведенные в таблице 6 ниже.

ТАБЛИЦА 6

Потери на проникновение сигнала внутрь здания⁽¹⁾ L_{be} , σ_{be}

F	Среднее значение, L_{be} (дБ)	Стандартная девиация, σ_{be} (дБ)
0,2 ГГц	9	3
0,6 ГГц	11	6
1,5 ГГц	11	6

⁽¹⁾ Эти величины могут быть изменены после получения новых данных экспериментов.

Для частот ниже 0,2 ГГц, $L_{be} = 9$ дБ, $\sigma_{be} = 3$ дБ; для частот выше 1,5 ГГц, $L_{be} = 11$ дБ, $\sigma_{be} = 6$ дБ. Для частот от 0,2 ГГц до 0,6 ГГц (и от 0,6 ГГц до 1,5 ГГц) приемлемые значения L_{be} и σ_{be} можно определить при помощи линейной интерполяции между значениями L_{be} и σ_{be} , приведенными в таблице 6 для частот 0,2 ГГц и 0,6 ГГц (0,6 ГГц и 1,5 ГГц).

Изменение напряженности поля для приема внутри зданий – это комбинированный результат изменений напряженности поля вне зданий (σ_L) и изменения из-за ослабления в здании (σ_{be}). Эти значения, по всей вероятности, не коррелированы. Следовательно, стандартную девиацию для приема внутри зданий (σ_i) можно рассчитать как квадратный корень из суммы квадратов отдельных значений стандартной девиации.

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_{be}^2} \quad (58)$$

где σ_L : стандартная девиация изменения местоположения, определяемая из уравнения (56) или по таблице 5.

Например, для цифровых сигналов с шириной полосы более 1 МГц, в диапазоне ОВЧ, где значения стандартной девиации составляют 5,5 дБ и 3 дБ соответственно, комбинированное значение будет равно 6,3 дБ. В диапазоне IV/V, где значения стандартной девиации составляют 5,5 дБ и 6 дБ, комбинированное значение будет равно 8,1 дБ.

4.10 Основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в $p_L\%$ местоположений

Для вычисления желаемого процента местоположений, средние потери L_{loc} и стандартная девиация σ_{loc} описываются выражениями:

$$L_{loc} = 0 \quad (\text{вне зданий}), \quad (59a)$$

$$L_{loc} = L_{be} \quad (\text{внутри зданий}), \quad (59b)$$

и:

$$\sigma_{loc} = u(h) \cdot \sigma_L \quad (\text{вне зданий}), \quad (60a)$$

$$\sigma_{loc} = \sigma_i \quad (\text{внутри зданий}), \quad (60b)$$

где средние потери на проникновение сигнала внутрь здания L_b приведены таблице 6, функция высоты $u(h)$ определяется из уравнения (57), а значения стандартной девиации σ_L и σ_i берутся из уравнения (56) (или таблицы 5) и уравнения (58), соответственно.

Основные потери передачи L_b (дБ), которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в $p_L\%$ местоположений, определяются выражением:

$$L_b = \max \left\{ L_{b0p}, L_{bc} + L_{loc} - I \left(\frac{p_L}{100} \right) \cdot \sigma_{loc} \right\} \quad \text{дБ}, \quad (61)$$

где:

- L_{b0p} : основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в 50% местоположений, обусловленные распространением по линии прямой видимости с кратковременными выбросами, определяемые уравнением (10);
- L_{bc} : основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в 50% местоположений, с учетом влияния потерь из-за отражений от терминала, определяемые уравнением (55);
- L_{loc} : среднее значение потерь в конкретном местоположении, определяемое уравнениями (59a)–(59b);
- $I(x)$: обратное дополнительное кумулятивное нормальное распределение в зависимости от вероятности x . Аппроксимация зависимости $I(x)$, которая может использоваться для $0,000001 \leq x \leq 0,999999$, приведена в Дополнении 3 настоящего Приложения;
- σ_{loc} : комбинированная стандартная девиация (т. е. учитывающая потери на проникновение сигнала внутрь здания и потери на изменение местоположения), определяемые уравнениями (60a)–(60b).

Процент местоположений p_L может меняться от 1% до 99%. Настоящая модель недействительна для процента местоположений менее 1% или более 99%.

4.11 Напряженность поля, превышаемая в течение $p\%$ времени и в $p_L\%$ местоположений

Напряженность поля E_p дБ(мкВ/м), приведенная к эффективной изучаемой мощности 1 кВт, превышаемая в течение $p\%$ времени и в 50% местоположений, может быть рассчитана с использованием формулы:

$$E_p = 199,36 + 20 \log(f) - L_b \quad \text{дБ(мкВ/м)}, \quad (62)$$

где:

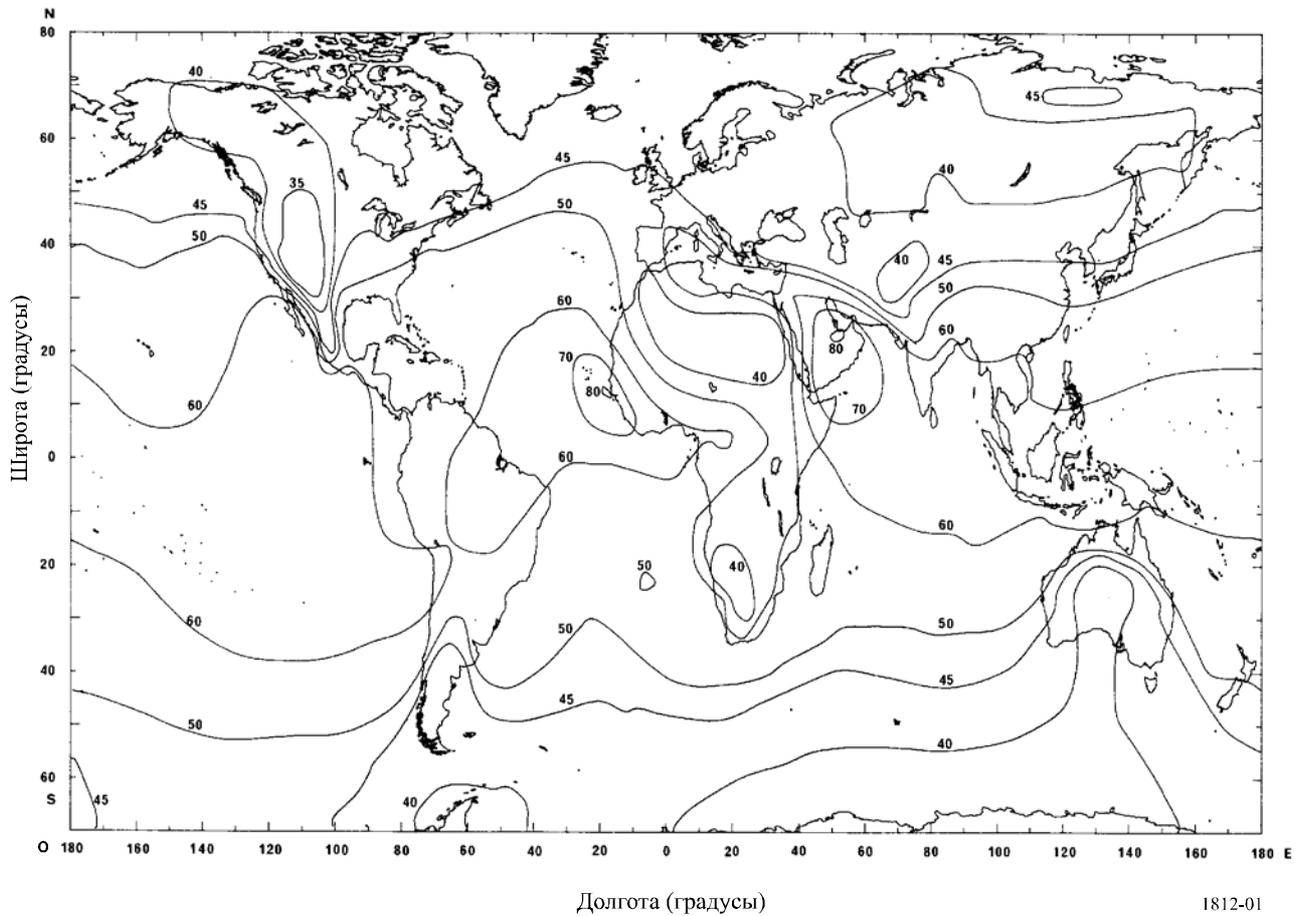
- L_{bc} : основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в $p_L\%$ местоположений, рассчитанные по уравнению (61);
- f : требуемая частота (ГГц).

Дополнение 1
к Приложению 1

Радиометеорологические данные, необходимые
для выполнения процедуры предсказания

На рисунке 1 показаны среднегодовые показатели ΔN в виде положительных величин, выраженных в значениях N -единиц/км.

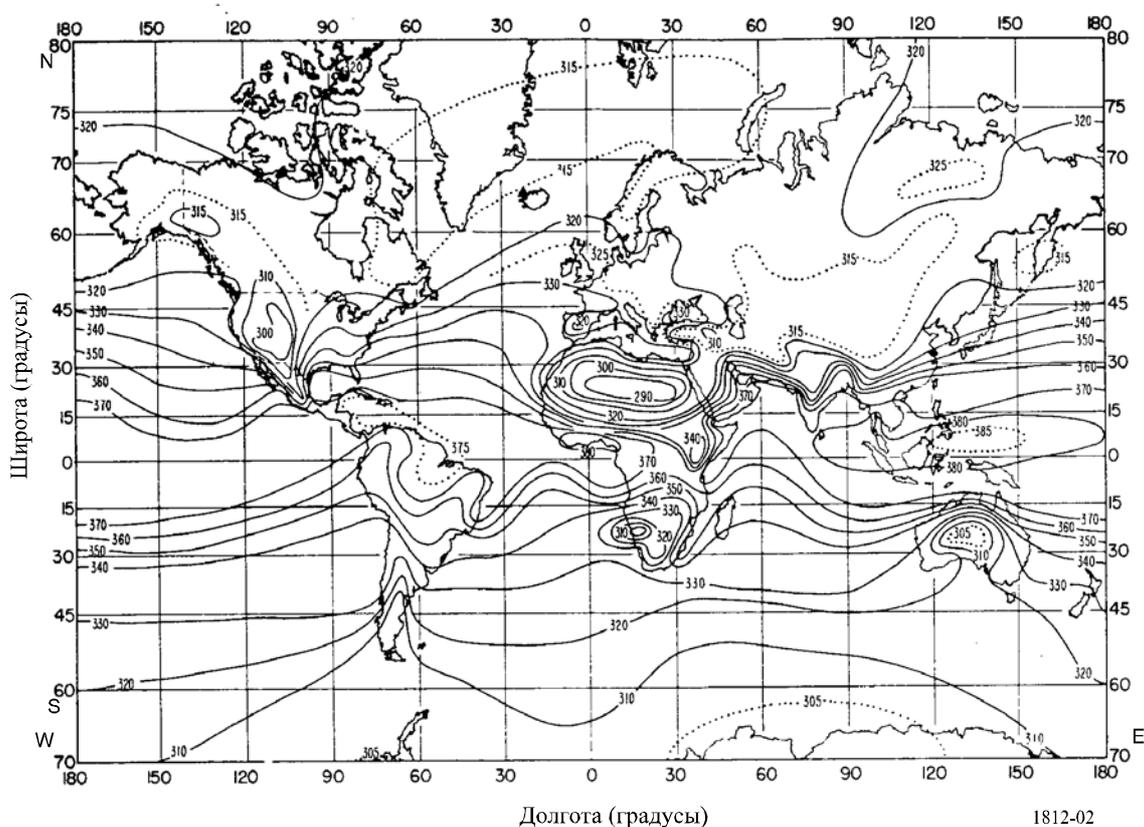
РИСУНОК 1
Среднегодовые показатели ΔN , N -единиц/км



На рисунке 2 показаны среднегодовые показатели рефракции на уровне морской поверхности N_0 в значениях N -единиц. Параметр N_0 используется только в той части общего метода, которая относится к тропосферному рассеянию.

РИСУНОК 2

Среднегодовые показатели рефракции на уровне морской поверхности, N -единиц



Дополнение 2 к Приложению 1

Анализ профиля трассы

1 Введение

Для выполнения анализа профиля трассы требуется иметь профиль высот поверхности земли над средним уровнем моря для каждой трассы. Параметры, которые необходимо получить в результате анализа профиля трассы для составления модели распространения, показаны в таблице 7.

В таблице 7 определяются параметры, используемые или полученные в ходе анализа профиля трассы.

ТАБЛИЦА 7
Определения параметров профиля трассы

Параметр	Описание
a_e	Эффективный радиус Земли (км)
d	Расстояние по дуге большого круга (км)
d_{ii}	Длина приращения для регулярных (т. е. с равномерно распределенными точками) данных профиля трассы (км)
f	Частота (ГГц)
λ	Длина волны (м)
h_{ts}	Высота антенны передатчика (м) над средним уровнем моря (amsl)
h_{rs}	Высота антенны приемника (м) (amsl)
θ_t	Для трансгоризонтной трассы, угол места горизонта выше местного горизонта (мрад), измеренный от передающей антенны. Для трассы прямой видимости эта величина должна быть равна углу места приемной антенны.
θ_r	Для трансгоризонтной трассы, угол места горизонта выше местного горизонта (мрад), измеренный от приемной антенны. Для трассы прямой видимости эта величина должна быть равна углу места передающей антенны.
θ	Угловое расстояние трассы (мрад)
h_{st}	Высота гладкой земной поверхности (amsl) в месте размещения передающей станции (м)
h_{sr}	Высота гладкой земной поверхности (amsl) в месте размещения приемной станции (м)
h_i	Высота i -той точки земной поверхности amsl (м) h_t : высота земной поверхности в точке размещения передатчика h_r : высота земной поверхности в точке размещения приемника
h_m	Неровность земной поверхности (м)
h_{te}	Эффективная высота передающей антенны (м)
h_{re}	Эффективная высота приемной антенны (м)

3 Протяженность трассы

Протяженность трассы можно рассчитать с использованием геометрии большого круга, зная географические координаты передающей (φ_t, ψ_t) и приемной (φ_r, ψ_r) станций. Кроме того, протяженность трассы может быть рассчитана из профиля трассы. Протяженность трассы d (км), можно рассчитать, используя данные профиля трассы:

$$d = d_n \quad \text{км.} \quad (63)$$

Для равномерно распределенных данных профиля трассы, верным является также и выражение:

$$d_i = (i-1) \cdot d_{ii} \quad \text{км} \quad (64)$$

для $i = 1, \dots, n$, где d_{ii} – длина приращения (км).

4 Классификация трасс

Профиль трассы должен быть либо линией прямой видимости, либо трансгоризонтной линией, что определяется на основании среднего эффективного радиуса Земли a_e , найденного из уравнения (7а).

Трасса является трансгоризонтной, если угол места физического горизонта, наблюдаемый с точки размещения передающей антенны (относительно местного горизонта) больше чем угол (опять-таки относительно местного горизонта передатчика) образуемый приемной антенной.

Следовательно, условием трансгоризонтной трассы является:

$$\theta_{max} > \theta_{id} \quad \text{мрад,} \quad (65)$$

где:

$$\theta_{max} = \max_{i=2}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{мрад;} \quad (66)$$

θ_i : угол места по направлению к i -той точки земной поверхности

$$\theta_i = \frac{h_i - h_{ts}}{d_i} - \frac{10^3 d_i}{2 a_e} \quad \text{мрад,} \quad (67)$$

где:

h_i : высота i -той точки земной поверхности (м) amsl;

h_{ts} : высота антенны передатчика (м) amsl;

d_i : расстояние от передатчика до i -той точки земной поверхности (км);

$$\theta_{id} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} - \frac{10^3 d}{2 a_e} \quad \text{мрад,} \quad (68)$$

где:

h_{rs} : высота приемной антенны (м) amsl;

d : общее расстояние по дуге большого круга (км);

a_e : средний эффективный радиус Земли, приемлемый для данной трассы (уравнение (7a)).

5 Получение необходимых параметров из профиля трассы

5.1 Все трассы

Параметры, которые должны быть получены из профиля трассы, перечислены в таблице 7.

5.1.1 Угол места горизонта для передающей антенны θ_i

Угол места горизонта для передающей антенны – это максимальный угол места горизонта для антенны, когда уравнение (66) применяется для $n - 2$ высот профиля земной поверхности.

$$\theta_i = \max(\theta_{max}, \theta_{id}) \quad \text{мрад,} \quad (69)$$

где θ_{max} определяется из уравнения (66).

5.1.2 Расстояние прямой видимости для передающей антенны d_{it}

Расстояние прямой видимости – это минимальное расстояние от передатчика, при котором из уравнения (66) вычисляется максимальный угол места горизонта антенны.

$$d_{it} = d_i \quad \text{км} \quad \text{для максимального } (\theta_i). \quad (70)$$

Если горизонт не найден, то необходимо установить $d_{it} = d_{i_{m50}}$ (см. § 4.3.1).

5.1.3 Угол места горизонта для приемной антенны θ_r

Если горизонт не найден ($\theta_i = \theta_{id}$), то необходимо установить:

$$\theta_r = \frac{h_{ts} - h_{rs}}{d} - 10^3 \frac{d}{2a_e} \quad \text{мрад.} \quad (71)$$

Однако если горизонт передатчика найден, то угол места горизонта для приемной антенны – это максимальный угол места горизонта для антенны, когда уравнение (66) применяется для $n - 2$ высот профиля земной поверхности.

$$\theta_r = \max_{j=2}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{мрад,} \quad (72)$$

$$\theta_j = \frac{h_j - h_{rs}}{d - d_j} - \frac{10^3 (d - d_j)}{2 a_e} \quad \text{мрад.} \quad (72a)$$

5.1.4 Расстояние прямой видимости для приемной антенны d_{lr}

Расстояние прямой видимости – это минимальное расстояние от приемника, при котором из уравнения (64) вычисляется максимальный угол места горизонта антенны.

$$d_{lr} = d - d_j \quad \text{км} \quad \text{для максимального } (\theta_j). \quad (73)$$

Если горизонт не найден, то необходимо установить $d_{lr} = d - d_{i_{m50}}$ (см. § 4.3.1).

5.1.5 Угловое расстояние θ (мрад)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_i + \theta_r \quad \text{мрад.} \quad (74)$$

5.1.6 Модель "гладкой земной поверхности" и эффективные высоты антенн

5.1.6.1 Общее описание

Для определения эффективных высот антенн и для выполнения соответствующей оценки неровности трассы, необходимо получить эффективную "гладкую" земную поверхность и использовать ее в качестве базовой плоскости, поверх которой, как предполагается, существует неровная земная поверхность трассы. После того, как это выполнено, можно получить параметр неровности земной поверхности (§ 5.1.6.4) и эффективные высоты антенн передающей и приемной станций.

5.1.6.2 Исключения

Для чисто "морских" трасс, т. е. $\omega \geq 0,9$, и когда горизонты обеих антенн совпадают с поверхностью моря, вычисления для определения гладкой земной поверхности могут быть исключены, при необходимости. В таком случае базовой плоскостью для всей трассы может считаться средний уровень моря (или водной поверхности), неровность земной поверхности может быть принята = 0 м, и эффективные высоты антенн = высотам антенн над уровнем моря.

Для всех остальных трасс необходимо применять процедуру аппроксимации гладкой земной поверхности, подробно рассмотренную в § 5.1, и определять эффективные высоты антенн и неровность земной поверхности, как показано в § 5.1.6.4.

5.1.6.3 Определение гладкой земной поверхности

Получим простую линейную аппроксимацию высот земной поверхности над средним уровнем моря (amsl) в виде:

$$h_{si} = h_{st} + m \cdot d_i \quad \text{м,} \quad (75)$$

где:

- h_{st} : высота (м) amsl поверхности, подобранной по методу наименьших квадратов, на расстоянии d_i (км) от источника помехи;
- h_a : высота (м) amsl гладкой земной поверхности в точке начала трассы, т. е. в месте расположения передающей станции;
- m : наклон (м/км) поверхности, подобранной по методу наименьших квадратов, относительно уровня моря.

Для следующих двух этапов расчетов существуют альтернативные методы. Если точки профиля распределены равномерно, могут использоваться уравнения (76a) и (77a). Если точки профиля распределены не равномерно, могут использоваться уравнения (76b) и (77b). Причем уравнения (76b) и (77b) могут использоваться в обоих случаях.

Для профилей с равномерно распределенными точками:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_a) \left(d_i - \frac{d}{2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(d_i - \frac{d}{2} \right)^2} \quad \text{м/км.} \quad (76a)$$

Для любых профилей:

$$m = \left(\frac{1}{d^3} \right) \sum_{i=2}^n 3 (d_i - d_{i-1}) (d_i + d_{i-1} - d) (h_i + h_{i-1} - 2h_a) + (d_i - d_{i-1})^2 (h_i - h_{i-1}) \quad \text{м/км,} \quad (76b)$$

где:

- h_i : реальная высота i -той точки земной поверхности (м) amsl;
- h_a : среднее значение реальных высот трассы amsl от h_0 до h_n включительно (м) используя выражение:

для профилей с равномерно распределенными точками:

$$h_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad \text{м;} \quad (77a)$$

для любых профилей взвешенное среднее значение вычисляется:

$$h_a = \left(\frac{1}{2d} \right) \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1}) (h_i + h_{i-1}) \quad \text{м.} \quad (77b)$$

Теперь рассчитаем высоту гладкой земной поверхности в точке размещения передающей станции h_{st} , используя выражение:

$$h_{st} = h_a - m \frac{d}{2} \quad \text{м.} \quad (78)$$

Отсюда высота гладкой земной поверхности в точке размещения приемной станции h_{sr} определяется выражением:

$$h_{sr} = h_{st} + m \cdot d \quad \text{м.} \quad (79)$$

Затем, если высоты гладкой земной поверхности оказываются выше реальной поверхности земли, может быть выполнена корректировка, т. е.:

$$h_{st} = \min (h_{st}, h_1) \quad \text{м,} \quad (80a)$$

$$h_{sr} = \min (h_{sr}, h_n) \quad \text{м,} \quad (80b)$$

Если какое-либо значение h_{st} или h_{sr} или оба они были изменены в соответствии с уравнениями (80a) или (80b), то должен быть также скорректирован и наклон m гладкой земной поверхности:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{м/км.} \quad (81)$$

Эффективные высоты терминалов h_{te} и h_{re} описываются выражениями:

$$\begin{aligned} h_{te} &= h_{tg} + h_1 - h_{st} \\ h_{re} &= h_{rg} + h_n - h_{sr} \end{aligned} \quad \text{м.} \quad (82)$$

5.1.6.4 Неровности земной поверхности h_m

Параметр неровности земной поверхности h_m (м) – это максимальная высота земли над гладкой земной поверхностью на участке трассы между точками горизонта (включая эти точки):

$$h_m = \max_{i=i_t}^{i=i_r} [h_i - (h_{st} + m \cdot d_i)] \quad \text{м,} \quad (83)$$

где:

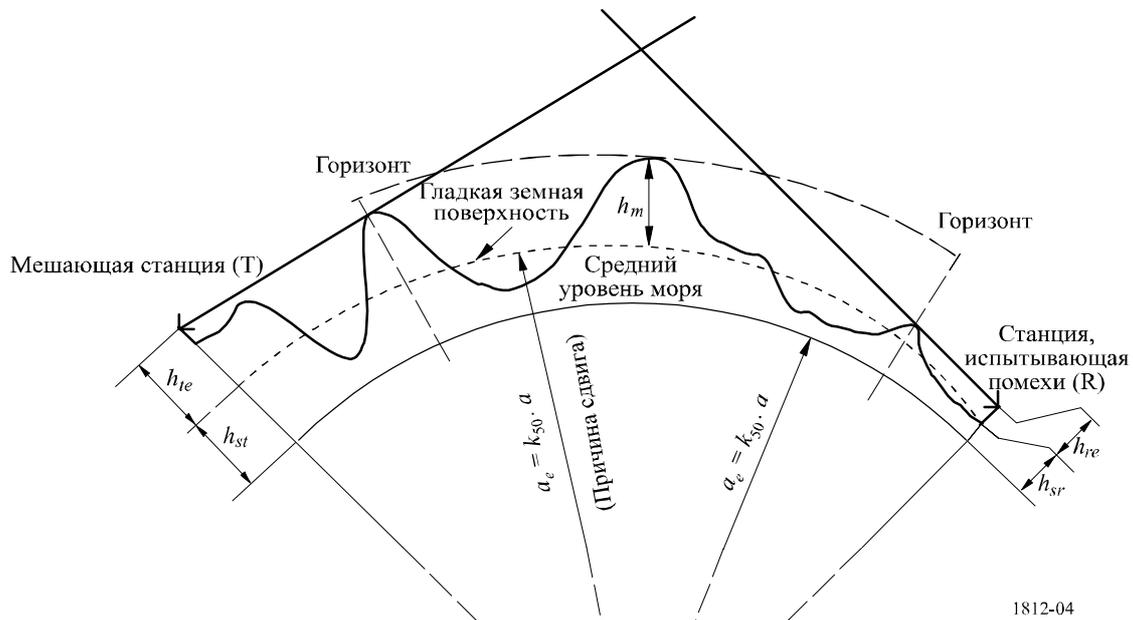
i_t : номер точки профиля на расстоянии d_{it} от передатчика;

i_r : номер точки профиля на расстоянии d_{ir} от приемника.

Гладкая земная поверхность и параметр неровности земной поверхности h_m показаны на рисунке 4.

РИСУНОК 4

Пример гладкой земной поверхности и параметр неровности земной поверхности



**Дополнение 3
к Приложению 1**

**Аппроксимация функции обратного дополнительного кумулятивного
нормального распределения**

Приведенная далее аппроксимация функции обратного дополнительного кумулятивного нормального распределения действительна для $0,000001 \leq x \leq 0,999999$ и дает ошибку не более 0,00054. Если $x < 0,000001$, что предполагает $\beta_0 < 0,0001\%$, то x должен быть установлен в значение 0,000001. Аналогичные действия должны быть выполнены и для $x > 0,999999$. Эта аппроксимация может уверенно использоваться для интерполяционной функции в уравнениях (30b) и (59), а также в уравнении (61). Однако в последнем уравнении значение x должно быть ограничено: $0,01 \leq x \leq 0,99$.

Функция $I(x)$ определяется выражением:

$$I(x) = T(x) - \xi(x) \text{ для } 0,000001 \leq x \leq 0,5 \quad (84a)$$

и, симметрично:

$$I(x) = \xi(1-x) - T(1-x) \text{ для } 0,5 < x \leq 0,999999, \quad (84b)$$

где:

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]}; \quad (85a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 \cdot T(x) + C_1) \cdot T(x)] + C_0}{[(D_3 \cdot T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1}; \quad (85b)$$

$$C_0 = 2,515516698; \quad (85c)$$

$$C_1 = 0,802853; \quad (85d)$$

$$C_2 = 0,010328; \quad (85e)$$

$$D_1 = 1,432788; \quad (85f)$$

$$D_2 = 0,189269; \quad (85g)$$

$$D_3 = 0,001308. \quad (85h)$$