

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R Р.452-17
(09/2021)

**Процедура прогнозирования для оценки
помех между станциями, находящимися
на поверхности Земли, на частотах
выше приблизительно 0,1 ГГц**

Серия Р
Распространение радиоволн



Предисловие

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

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

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

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

Серии Рекомендаций МСЭ-R

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

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

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

Электронная публикация
Женева, 2022 г.

© ITU 2022

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

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.452-17*

Процедура прогнозирования для оценки помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 0,1 ГГц

(Вопрос МСЭ-R 208/3)

(1970-1974-1978-1982-1986-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2005-2007-2009-2013-2015-2021)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации представлен метод прогнозирования для оценки помех между находящимися на поверхности Земли станциями на частотах приблизительно от 0,1 до 50 ГГц с учетом механизмов помех как в условиях ясного неба, так и при рассеянии в гидрометеорах.

Ключевые слова

Помехи, волноводное распространение, тропосферное рассеяние, дифракция, рассеяние в гидрометеорах, продукты цифровых данных

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a)* что из-за перегруженности радиоспектра частотные диапазоны должны использоваться совместно различными наземными службами, различными системами в пределах одной службы и системами наземных служб и служб Земля-космос;
- b)* что для удовлетворительного сосуществования систем, использующих одни и те же полосы частот, необходимы процедуры прогнозирования помех, отличающиеся точностью и надежностью в работе и доступные всем заинтересованным сторонам;
- c)* что часто требуется, чтобы применяемые в процедурах прогнозирования помех методы прогнозирования распространения удовлетворяли критериям "наихудшего месяца" и показателям готовности;
- d)* что необходимы методы прогнозирования, которые можно было бы использовать во всех зонах мира для трасс всех типов,

рекомендует,

чтобы для определения потерь распространения, возникающих на трассах мешающих сигналов, между станциями на поверхности Земли на частотах выше приблизительно 0,1 ГГц, использовалась процедура прогнозирования помех, представленная в Приложении 1.

* В 2022 году 3-я Исследовательская комиссия по радиосвязи внесла в настоящую Рекомендацию поправки редакционного характера в соответствии с Резолюцией МСЭ-R 1.

Приложение 1

1 Введение

Из-за перегруженности радиочастотного спектра приходится прибегать к совместному использованию многих полос частот различными радиослужбами и различными операторами схожих радиослужб. Для того чтобы гарантировать удовлетворительное сосуществование наземных систем и систем Земля-космос, важно уметь прогнозировать с приемлемой точностью возможные помехи между этими системами, используя методы и модели прогнозирования распространения, приемлемые для всех заинтересованных сторон и отличающиеся точностью и надежностью.

Между станциями, расположенными на поверхности Земли, а также между этими станциями и космическими системами может существовать множество типов и комбинаций трасс распространения помех, причем для каждого конкретного случая требуется свой метод прогнозирования. В данном Приложении рассматривается одна из целого ряда наиболее важных проблем, связанных с помехами, т. е. такие ситуации, когда существует возможность возникновения помех между радиостанциями, расположенными на поверхности Земли.

Модели, представленные в Рекомендации МСЭ-R P.452, основаны на допущении, что как создающий помехи передатчик, так и испытывающий помехи приемник работают в приземном слое атмосферы. При применении этих моделей использование слишком больших значений высоты антенн для моделирования работы таких систем, как систем воздушной службы, неприемлемо. Процедура прогнозирования была испытана для радиостанций, работающих в диапазоне частот примерно от 0,1 до 50 ГГц.

Модели, представленные в Рекомендации МСЭ-R P.452, предназначены для расчета потерь распространения, не превышаемых для процентов времени в диапазоне $0,001 \leq p \leq 50\%$. Это допущение не предполагает наличия максимальных потерь при $p = 50\%$.

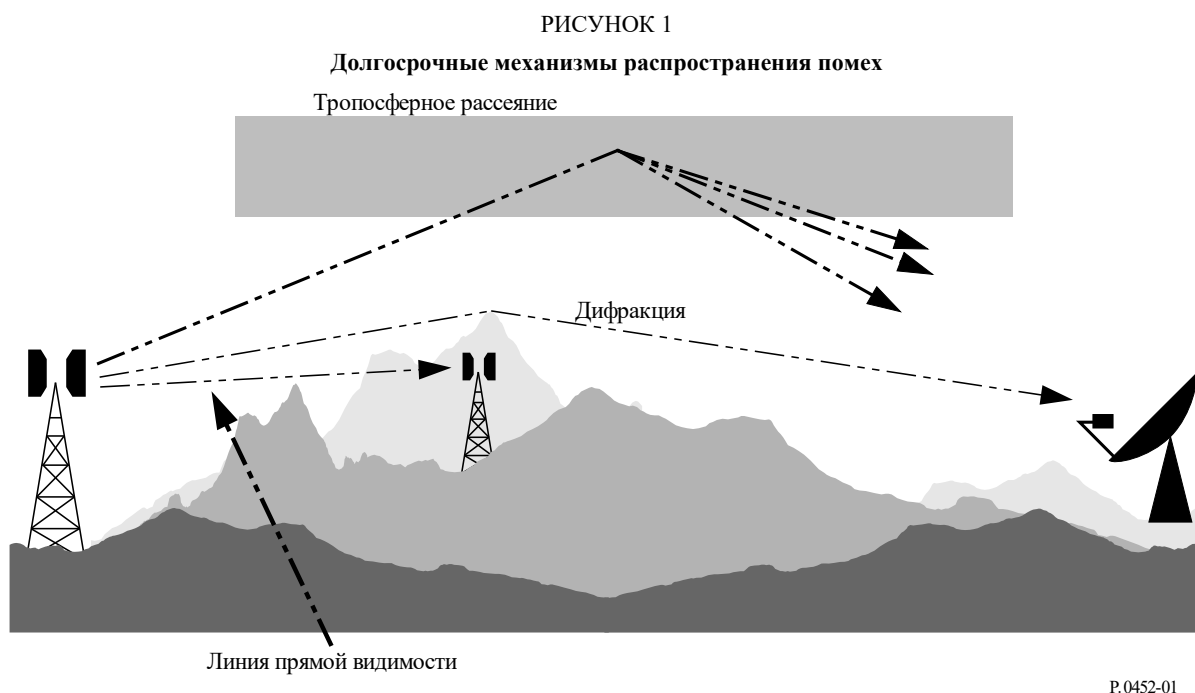
Метод включает дополнительный комплекс моделей распространения, которые обеспечивают охват прогнозами всех могущих возникнуть существенных механизмов распространения помех. Обеспечиваются методы анализа радиометеорологических и топографических характеристик трассы, с тем чтобы можно было составлять прогнозы относительно любой практически возможной трассы помех, входящей в сферу охвата данной процедуры, на расстояние до 10 000 км.

2 Механизмы распространения помех

Существует целый ряд механизмов распространения помех, и преобладающее влияние каждого из них зависит от климатических условий, радиочастоты, рассматриваемого процента времени, расстояния и топографии трассы. Одновременно могут действовать либо один, либо несколько механизмов распространения. Основные механизмы распространения помех следующие.

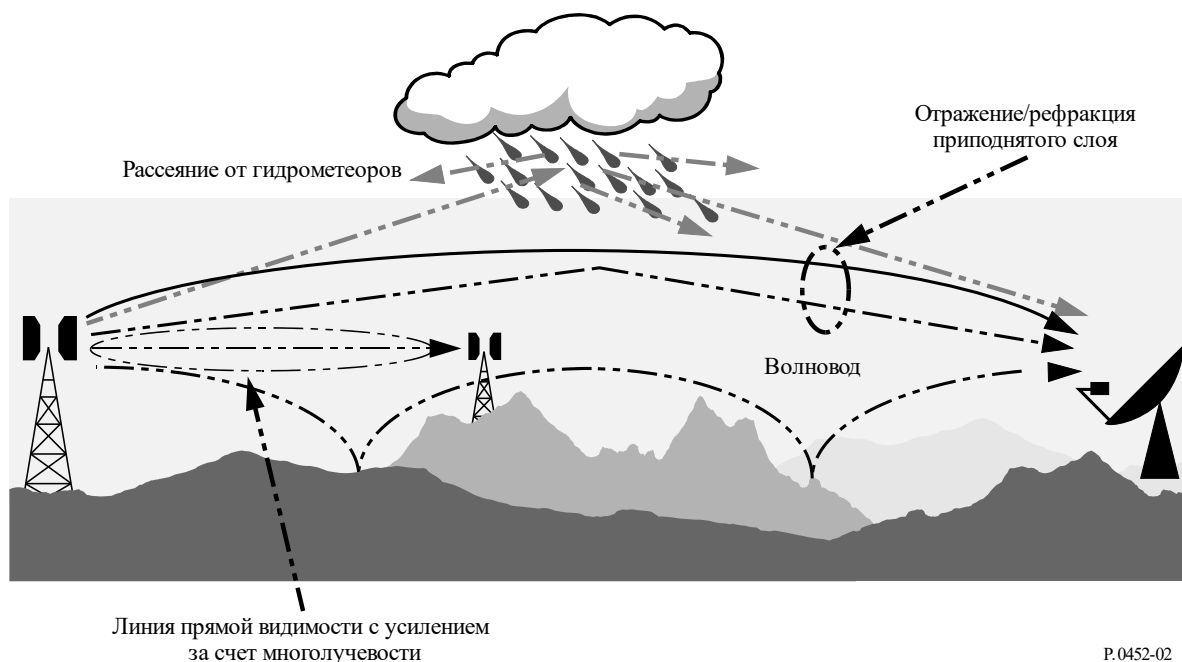
- *Прямая видимость* (рисунок 1). Наиболее простой механизм распространения помех соответствует ситуации, когда распространение сигнала происходит в нормальных (т. е. при хорошем перемешивании) атмосферных условиях вдоль трассы передачи в пределах прямой видимости. Однако и здесь может возникнуть дополнительная трудность, если дифракция на субтрассе вызывает некоторое увеличение уровня сигнала по сравнению с обычным его значением. Кроме того, на всех трассах, кроме самых коротких (т. е. на трассах протяженностью более приблизительно 5 км), уровни сигнала могут часто ощутимо усиливаться на короткое время за счет явлений многолучевости и фокусировки, являющихся следствием стратификации атмосферы (см. рисунок 2).
- *Дифракция* (рисунок 1). За пределами прямой видимости в нормальных условиях влияние дифракции обычно преобладает, когда уровни принимаемых сигналов достаточно велики. Если непродолжительные аномальные явления не влияют на работу служб, то плотность используемых систем в основном определяется точностью, с которой возможно моделировать явление дифракции. Такая модель дифракции должна обладать достаточно широкими прогнозируемыми возможностями, чтобы охватить такие ситуации, как распространение над гладкой поверхностью Земли, над отдельными препятствиями, и нестандартные (неструктурированные) ситуации.

- *Тропосферное рассеяние* (рисунок 1). Этот механизм определяет уровень "фоновых" помех для более длинных трасс (например, более 100–150 км), когда дифракционное поле становится очень слабым. Однако за исключением небольшого числа особых случаев, включающих чувствительные приемники или системы, являющиеся мощными источниками помех (например, системы радаров), уровень помех при тропосферном распространении настолько низок, что может не приниматься во внимание.



- *Поверхностные волноводы* (рисунок 2). Это наиболее важный краткосрочные механизм распространения, который может привести к появлению помех над водой и плоскими прибрежными зонами, а также к повышению уровня сигнала на больших расстояниях (более 500 км над морем). При определенных обстоятельствах уровень такого сигнала может превышать эквивалентный уровень сигнала в "свободном пространстве".

РИСУНОК 2
Аномальные (краткосрочные) механизмы распространения помех



- *Отражение и рефракция от приподнятого слоя* (рисунок 2). Исследование явлений отражения и/или рефракции на высотах вплоть до нескольких сотен метров является очень важной проблемой, поскольку при благоприятной геометрии трассы эти явления позволяют весьма эффективно бороться с потерями за счет дифракции над поверхностью. Опять-таки влияние этих явлений может быть существенным на достаточно больших расстояниях (до 250–300 км).
- *Рассеяние в гидрометеорах* (рисунок 2). Рассеяние в гидрометеорах может быть источником возможных помех между передатчиками наземной линии и земными станциями, поскольку его воздействие фактически всенаправленное и, следовательно, может оказывать влияние на трассы распространения помех за пределами большого круга. Однако уровни мешающих сигналов в этом случае невелики и, как правило, не создают серьезных проблем.

Одна из основных проблем при прогнозировании помех (которая фактически свойственна всем процедурам прогнозирования тропосферного распространения) связана с трудностями разработки единого согласованного набора практических методов, охватывающего широкий диапазон расстояний и значений процентов времени, т. е. для реальной атмосферы, в которой статистические данные относительно какого-то одного преобладающего механизма постепенно сливаются с данными другого механизма по мере изменения метеорологических условий и/или трассы. Именно в эти переходные периоды могут возникать ситуации, когда сигнал данного уровня существует в течение всей доли времени, являющейся суммой долей времени воздействия различных механизмов. Подход, на котором основана описываемая процедура, определяет совершенно отдельные методы прогнозирования помех в условиях ясного неба и за счет рассеяния в гидрометеорах, описанные в пп. 4 и 5, соответственно.

Метод прогнозирования в условиях ясного неба состоит из отдельных моделей для дифракции, волноводного распространения/отражения от атмосферных слоев и тропосферного рассеяния. Все три модели применяются для каждого случая независимо от типа трассы (в пределах прямой видимости либо загоризонтная). Затем результаты объединяются в общий прогноз с использованием метода смешения, который обеспечивает для любого заданного расстояния на трассе и процента времени, чтобы усиление сигнала в эквивалентной воображаемой модели прямой видимости было максимально возможным.

3 Прогнозирование помех в условиях ясного неба

3.1 Общие соображения

Хотя метод прогнозирования в условиях ясного неба реализуется посредством трех отдельных моделей, результаты которых затем смешиваются, в данной процедуре учитываются пять основных типов механизмов распространения:

- *прямая видимость* (включая усиление уровня сигнала за счет многолучевости и фокусировки);
- *дифракция* (над гладкой поверхностью Земли, над неровной поверхностью и дифракция на субтрассах);
- *тропосферное рассеяние*;
- *аномальное распространение* (волноводы и отражение/рефракция от атмосферных слоев);
- *изменение выигрыша за счет высоты при отражении от местных предметов* (если это имеет место).

3.2 Составление прогноза

3.2.1 Краткое описание процедуры

Составление прогноза состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Исходные данные

Основные исходные данные, необходимые для описываемой процедуры, приведены в таблице 1. Вся остальная необходимая информация получается на основе этих данных в процессе выполнения процедуры.

ТАБЛИЦА 1
Основные исходные данные

Параметр	Предпочтительное разрешение	Описание
f	0,01	Частота (ГГц)
p	0,001	Требуемый процент(ы) времени, в течение которого не превышаются рассчитываемые основные потери передачи
φ_t, φ_r	0,001	Широта станции (градусы)
ψ_t, ψ_r	0,001	Долгота станции (градусы)
h_{tg}, h_{rg}	1	Высота центра антенны над уровнем земли (м)
h_{ts}, h_{rs}	1	Высота центра антенны над средним уровнем моря (м)
G_t, G_r	0,1	Усиление антенны в направлении горизонта вдоль трассы распространения помех по дуге большого круга (дБи)
Pol	Не применяется	Сигнал, например с вертикальной или горизонтальной поляризацией

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Для станций, создающих помехи, и станций, которые их испытывают:

t : источник помех;

r : станция, на которую воздействуют помехи.

Параметр "поляризация" (Pol), указанный в таблице 1, не имеет числового значения. Эта информация используется в п. 4.2.2.1 в связи с уравнениями (30а), (30b) и (31).

Шаг 2. Выбор прогноза для усредненного года или наихудшего месяца

Выбор прогноза на год или для "наихудшего месяца" в основном определяется показателями качества (т. е. рабочими характеристиками и коэффициентом готовности) приемного терминала радиосистемы, испытывающей помехи. Поскольку помехи часто имеют двунаправленный характер, может

понадобится оценить два таких набора показателей качества, для того чтобы определить наихудшее направление, на основании которого следует устанавливать требования минимально допустимых основных потерь передачи. В большинстве случаев требования к качеству можно выразить через процент времени для "любого месяца", и, следовательно, потребуются данные для наихудшего месяца.

С помощью моделей прогнозирования распространения предсказывается годовое распределение основных потерь передачи. Для прогнозов на усредненный год в процедуре прогнозирования непосредственно используются проценты времени p , для которых не превышаются отдельные значения основных потерь передачи. Если требуется составить прогноз для среднего наихудшего месяца, то необходимо рассчитать с помощью приводимых ниже выражений годовой эквивалент процента времени p для процента времени p_w наихудшего месяца для широты φ средней точки трассы:

$$p = 10^{\left(\frac{\log(p_w) + \log(G_L) - 0,186 \omega - 0,444}{0,816 + 0,078 \omega} \right)} \% , \quad (1)$$

где:

ω : участок трассы над водой (см. таблицу 3);

$$G_L = \begin{cases} \sqrt{1,1 + |\cos 2 \varphi|^{0,7}} & \text{для } |\varphi| \leq 45^\circ; \\ \sqrt{1,1 - |\cos 2 \varphi|^{0,7}} & \text{для } |\varphi| > 45^\circ. \end{cases} \quad (1a)$$

При необходимости величина p должна быть ограничена так, чтобы $12 p \geq p_w$.

Следует отметить, что широта φ (в градусах) считается положительной в северном полушарии.

Полученный результат будет представлять собой основные потери передачи для заданного процента времени наихудшего месяца, $p_w\%$.

Шаг 3. Радиометеорологические данные

В процедуре прогнозирования используются три радиометеорологических параметра для описания изменчивости фоновых и аномальных условий распространения в различных местах земного шара:

- ΔN (N -единиц/км) – средний вертикальный градиент рефракции радиоволн в пределах нижнего слоя атмосферы толщиной 1 км, служит источником информации, с помощью которой можно рассчитать эквивалентный радиус Земли для целей анализа профиля трассы и дифракции над препятствием. Заметим, что в этой процедуре ΔN – положительная величина.
- β_0 (%) – процент времени, в течение которого вертикальный градиент рефракции в пределах первых 100 м нижних слоев атмосферы может превысить 100 N -единиц/км, используется для определения относительной области действия установившихся аномальных условий распространения на рассматриваемой широте. Следует использовать значение β_0 , соответствующее широте средней точки трассы.
- N_0 (N -единиц) – преломляющая способность поверхности на уровне моря, используется только в модели тропосферного рассеяния в качестве меры изменчивости механизма тропосферного рассеяния в пределах данной местности. Поскольку расчет трассы в условиях рассеяния основан на геометрии трассы, определяемой с помощью годовых значений ΔN или значений ΔN для наихудшего месяца, рассматривать значения N_0 для наихудшего месяца нет необходимости. Правильно определенные значения ΔN и N_0 задаются средними точками трасс, получаемыми с соответствующих карт.

Точечное значение параметра β_0 (%) аномальных условий распространения для места, над которым расположена средняя точка трассы, определяется следующим образом:

$$\beta_0 = \begin{cases} 10^{-0,015|\varphi| + 1,67} \mu_1 \mu_4 & \% \quad \text{для } |\varphi| \leq 70^\circ; \\ 4,17 \mu_1 \mu_4 & \% \quad \text{для } |\varphi| > 70^\circ, \end{cases} \quad (2)$$

где:

φ : широта средней точки трассы (в градусах).

Параметр μ_1 зависит от угла, под которым трасса проходит над сушей (суша вдали от моря и/или побережье) и водой, и определяется как:

$$\mu_1 = \left[10^{\frac{-d_{lm}}{16-6,6\tau}} + \left[10^{-(0,496 + 0,354\tau)} \right]^5 \right]^{0,2}, \quad (3)$$

где значение μ_1 должно иметь ограничение $\mu_1 \leq 1$,

при

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

где:

- d_{lm} : самый длинный непрерывный участок суши (суша вдали от моря + побережье), над которым проходит трасса по дуге большого круга (км);
- d_m : самый длинный участок территории вдали от моря, над которым проходит трасса по дуге большого круга (км).

Определения радиоклиматических зон, которые используются при расчете d_m и d_{lm} , приведены в таблице 2.

$$\mu_4 = \begin{cases} 10^{(-0,935 + 0,0176|\varphi|) \log \mu_1} & \text{для } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 10^{0,3 \log \mu_1} & \text{для } |\varphi| > 70^\circ \end{cases} \quad (4)$$

ТАБЛИЦА 2

Радиоклиматические зоны

Тип зоны	Код	Определение
Суша по берегам водоемов	A1	Суша по берегам водоемов и морские побережья, т. е. суша, примыкающая к морю вплоть до высоты 100 м относительно среднего уровня моря или водоема, но ограниченная максимальным расстоянием 50 км от ближайшего моря. При отсутствии точной информации о контуре 100 м можно использовать приближенное значение, т. е. 300 футов
Суша вдали от моря	A2	Вся суша, кроме суши по берегам водоемов и морского побережья, определенной выше как "суша по берегам водоемов"
Море	B	Моря, океаны и другие большие водоемы (т. е. на площади по крайней мере 100 км в диаметре)

Большие водоемы на суше

"Большие" водоемы на суше, которые следует относить к Зоне В, определяются как водоемы площадью по крайней мере 7800 км², за исключением площади рек. При расчете площади острова, расположенные в этих водоемах, следует считать водой, если их возвышение над средним уровнем водоема не превышает 100 м для более чем 90% их площади. Острова, которые не удовлетворяют этому критерию, при расчете площади водоема следует отнести к суше.

Большие озера и водно-болотные угодья

Большие площади суши более 7800 км², на которых расположено множество маленьких озер или сеть рек, должны рассматриваться администрациями как "прибрежные районы" и относиться к Зоне А1, при условии что эти участки суши более чем на 50% заняты водой и более 90% суши расположено ниже 100 м над средним уровнем поверхности воды.

Климатические районы, относящиеся к Зоне А1, большие водоемы на суше, большие озера и заболоченные районы трудно определить абсолютно однозначно. Поэтому от администраций требуется, чтобы они зарегистрировали в Бюро радиосвязи МСЭ (БР) те районы, находящиеся на их

территориях, которые они хотели бы определить как принадлежащие к одной из названных категорий. При отсутствии такой зарегистрированной информации все территории суши будут считаться принадлежащими к климатической Зоне А2.

В целях обеспечения максимальной согласованности результатов между администрациями расчеты по этой процедуре следует выполнять на основе Цифровой карты мира МСЭ (IDWM), которую можно получить в БР. Если все точки трассы находятся как минимум на расстоянии 50 км от моря или иных больших водоемов, то используется только категория "суша вдали от моря".

Если информация о зоне хранится в последовательных точках вдоль трассы распространения радиоволн, следует предположить, что изменения происходят на полпути между точками с разными кодами зон.

Эквивалентный радиус Земли

Медианное значение коэффициента эквивалентного радиуса Земли, k_{50} , для трассы определяется как:

$$k_{50} = \frac{157}{157 - \Delta N} \quad (5)$$

Предположив средний физический радиус Земли $a = 6371$ км, получим следующее выражение для медианного значения эквивалентного радиуса Земли, a_e :

$$a_e = k_{50}a \quad \text{км.} \quad (6a)$$

Эквивалентный радиус Земли, превышенный для $\beta\%$ времени, a_β , определяется как:

$$a_\beta = k_\beta a \quad \text{км,} \quad (6b)$$

где $k_\beta = 3,0$ является расчетом коэффициента эквивалентного радиуса Земли, превышенного для $\beta\%$ времени.

В пп. 4.2.1 и 4.2.2 общий эквивалентный радиус Земли, a_p , устанавливается равным a_e для 50% времени и a_β – для $\beta\%$ времени.

Шаг 4. Анализ профиля трассы

Значения ряда параметров трассы, необходимых для расчетов и указанных в таблице 3, должны быть определены с помощью первоначального анализа профиля трассы на основе величины a_e , полученной из уравнения (6a). Информация, касающаяся вопросов расчета, построения и анализа профиля трассы, приводится в Прилагаемом документе 2 к Приложению 1.

ТАБЛИЦА 3

Параметры, получаемые в результате анализа профиля трассы

Параметр	Описание
d	Расстояние на трассе вдоль дуги большого круга (км)
d_{lt}, d_{lr}	Расстояния от передающей и приемной антенн до их соответствующих горизонтов (км).
θ_t, θ_r	Для загоризонтной трассы – углы места по отношению к горизонту передающей и приемной антенн соответственно (мрад). Для трассы прямой видимости каждый параметр равен углу места другого терминала
θ	Угловое расстояние на трассе (мрад)
h_{ts}, h_{rs}	Высота центра антенны над средним уровнем моря (м)
h_{te}, h_{re}	Эффективная высота антенн над земной поверхностью (м) для модели волноводного распространения/отражения от атмосферных слоев (определения приведены в Прилагаемом документе 2 к Приложению 1). Следует отметить, что для эффективной высоты в модели дифракции используются одинаковые наименования параметров, но h_{te} и h_{re} в модели дифракции имеют разные определения. См. уравнения (39a) и (39b).

ТАБЛИЦА 3 (окончание)

Параметр	Описание
d_b	Общая длина участков трассы, проходящих над водой (км)
ω	Часть общей трассы над водой: $\omega = d_b/d, \quad (7)$ где d – расстояние вдоль дуги большого круга (км), вычисленное с помощью уравнения (148). Для трассы, целиком расположенной над сушей, $\omega = 0$
$d_{ct,cr}$	Расстояние над сушей от передающей и приемной антенн до побережья, вдоль которого проходит трасса помех по дуге большого круга (км). Для терминала на борту судна или на морской платформе равно нулю

4 Модели распространения в условиях ясного неба

В следующих подразделах описывается способ расчета основных потерь передачи, L_b , (дБ), не превышаемых в течение требуемого ежегодного процента времени, p .

4.1 Распространение в пределах прямой видимости (включая краткосрочные эффекты)

Для загоризонтных трасс и трасс в пределах прямой видимости должны быть рассчитаны следующие значения.

Основные потери передачи из-за распространения в свободном пространстве и ослабления в атмосферных газах:

$$L_{bfs_g} = 92,5 + 20 \log f + 20 \log d + A_g \quad \text{дБ}, \quad (8)$$

где:

f : частота (ГГц)

d_{fs} : расстояние между передающей и приемной антеннами (км):

$$d_{fs} = \sqrt{d^2 + \left(\frac{h_{ts} - h_{rs}}{1000}\right)^2} \quad (8a)$$

d : расстояние вдоль дуги большого круга (км);

h_{ts} : высота передающей антенны над уровнем моря (masl);

h_{rs} : высота приемной антенны над уровнем моря (masl);

A_g : общее поглощение в атмосферных газах (дБ):

$$A_g(d_{fs}) = [\gamma_0 + \gamma_w(\rho)] d_{fs} \quad \text{дБ}, \quad (9)$$

где:

$\gamma_0, \gamma_w(\rho)$: значения погонного ослабления в сухом воздухе и в парах воды соответственно, которые определяются с помощью уравнений, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.676;

ρ : плотность паров воды:

$$\rho = 7,5 + 2,5\omega \quad \text{г/м}^3; \quad (9a)$$

ω : часть трассы, проходящая над водой.

Поправки, учитывающие эффекты многолучевости и фокусировки, при процентах времени p и β_0 :

$$E_{sp} = 2,6 [1 - \exp(-0,1 \{d_{lt} + d_{lr}\})] \log (p/50) \quad \text{дБ}; \quad (10a)$$

$$E_{s\beta} = 2,6 [1 - \exp(-0,1 \{d_{lt} + d_{lr}\})] \log (\beta_0/50) \quad \text{дБ}. \quad (10b)$$

Основные потери передачи, не превышаемые в течение процента времени, $p\%$, из-за распространения на трассах прямой видимости:

$$L_{b0p} = L_{bfsq} + E_{sp} \quad \text{дБ.} \quad (11)$$

Основные потери передачи, не превышаемые в течение процента времени, $\beta_0\%$, из-за распространения на трассах прямой видимости (вне зависимости от того, является ли трасса в действительности трассой LoS):

$$L_{b0\beta} = L_{bfsq} + E_{s\beta} \quad \text{дБ.} \quad (12)$$

4.2 Дифракция

Считается, что изменчивость во времени величины дополнительных потерь, вызванных механизмом дифракции, обусловлена изменениями вертикального градиента объемной атмосферной рефракции радиоволн, т. е. предполагается, что по мере уменьшения процента времени p коэффициент эквивалентного радиуса Земли, $k(p)$, увеличивается. Полагают также, что этот процесс сохраняется для $\beta_0 \leq p \leq 50\%$. Для процентов времени, меньших β_0 , на уровень сигнала преобладающее воздействие оказывают скорее аномальные механизмы распространения, чем объемные характеристики атмосферной рефракции. Следовательно, предполагается, что дифракционные потери, не превышаемые для $p < \beta_0\%$, такие же, как и для $p = \beta_0\%$ времени.

Учитывая вышесказанное, в общем случае, когда $p < 50\%$, расчет дифракции необходимо произвести дважды: один для медианного значения коэффициента эквивалентного радиуса Земли k_{50} (уравнение (5)), а другой – для ограничивающего значения коэффициента эквивалентного радиуса Земли k_{β} , равного 3. Этот второй расчет позволяет получить оценку дифракционных потерь, не превышаемых для $\beta_0\%$ времени, где β_0 задается уравнением (2).

Тогда дифракционные потери L_{dp} , не превышаемые в течение $p\%$ времени, для $0,001\% \leq p \leq 50\%$, рассчитываются с использованием процедуры ограничения или интерполяции, описанной в п. 4.2.4.

С помощью модели дифракции рассчитываются следующие параметры, требуемые в п. 4.6:

- L_{dp} : дифракционные потери, не превышаемые для $p\%$ времени;
- L_{bd50} : медианные значения основных потерь передачи, связанных с дифракцией;
- L_{bd} : основные потери передачи, связанные с дифракцией, которые не превышаются для $p\%$ времени.

Дифракционные потери вычисляются путем сочетания метода, основанного на конструкции Буллингтона, и метода расчета дифракции над сферической Землей. Часть этого комбинированного метода, основанная на конструкции Буллингтона, является расширением базовой конструкции Буллингтона для контроля переходов между свободным пространством и условиями при наличии препятствий. Эта часть метода используется дважды – для профиля реальной трассы и для гладкого профиля с нулевой высотой с измененными высотами антенн, называемыми эффективными высотами антенн. Те же эффективные высоты антенн используются и для расчета потерь за счет дифракции над сферической Землей. Конечный результат представляет собой комбинацию трех видов потерь, рассчитанных, как указано выше. Для идеально гладкой трассы окончательные дифракционные потери вычисляются с использованием модели сферической Земли.

Этот метод обеспечивает расчет дифракционных потерь для всех типов трасс, включая трассы над морем, над материковой частью суши и над прибрежной частью суши, независимо от того, является ли трасса гладкой или неровной, трассой прямой видимости или загоризонтной трассой.

В данном методе также широко используется аппроксимация к дифракционным потерям над одиночным клиновидным препятствием в качестве функции одного безразмерного параметра, v , определяемого как:

$$J(v) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v-0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right). \quad (13)$$

Обратите внимание, что $J(-0,78) \approx 0$, и это определяет самый нижний предел, при котором должна использоваться данная аппроксимация. $J(v)$ равен нулю для $v < -0,78$.

Полный расчет дифракции описывается в нижеследующих подразделах.

В п. 4.2.1 описывается часть метода расчета дифракции, основанная на конструкции Буллингтона. При каждом расчете дифракции для данного эквивалентного радиуса Земли она используется дважды. Во втором случае меняются высоты антенн, а все высоты профиля равны нулю.

В п. 4.2.2 описывается часть модели расчета дифракции на основе сферической Земли. Для расчетов применяются те же высоты антенн, что и при втором использовании модели Буллингтона, описанной в п. 4.2.1.

В п. 4.2.3 описывается порядок комбинированного использования методов, изложенных в пп. 4.2.1 и 4.2.2, для выполнения полного расчета дифракции для данного эквивалентного радиуса Земли. Из-за того, каким образом используется модель Буллингтона и модель расчета на основе сферической Земли, полный расчет дифракции получил название "модель дельта-Буллингтон".

В п. 4.2.4 описывается полный расчет дифракционных потерь, не превышаемых для заданного процента времени $p\%$.

4.2.1 Часть метода расчета дифракции, основанная на конструкции Буллингтона

В представленных ниже уравнениях наклоны рассчитываются в м/км относительно основной линии, соединяющей уровень моря на стороне передатчика с уровнем моря на стороне приемника. Расстояние до i -й точки профиля и ее высота составляют соответственно d_i километров и h_i метров над средним уровнем моря, i принимает значения от 0 до n , где $n + 1$ – число точек профиля, а полная длина трассы равна d километрам. Для удобства терминалы в начале и конце профиля называют передатчиком и приемником с высотами h_{ts} и h_{rs} метров над уровнем моря соответственно. Эквивалентная кривизна Земли C_e км⁻¹ задается формулой $1/a_p$, где a_p – эквивалентный радиус Земли в километрах. Длина волны в метрах обозначается как λ . Значения, которые следует использовать для a_p , приведены в п. 4.2.4.

Найдем промежуточную точку профиля с наибольшим наклоном линии от передатчика к точке:

$$S_{im} = \max \left[\frac{h_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - h_{ts}}{d_i} \right] \quad \text{м/км}, \quad (14)$$

где индекс профиля i принимает значения от 1 до $n - 1$.

Рассчитаем наклон линии от передатчика к приемнику, предполагая, что речь идет о трассе прямой видимости:

$$S_{tr} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} \quad \text{м/км}. \quad (15)$$

Теперь необходимо рассмотреть два случая.

Случай 1. Трасса прямой видимости

Если $S_{im} < S_{tr}$, то трасса является трассой прямой видимости.

Найдем промежуточную точку профиля с наибольшим параметром дифракции v :

$$v_{\max} = \max \left\{ \left[h_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts}(d - d_i) + h_{rs} d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\} \quad (16)$$

где индекс профиля i принимает значения от 1 до $n - 1$.

В этом случае потери над одиночным клиновидным препятствием для точки Буллингтона определяются выражением:

$$L_{uc} = J(v_{\max}) \quad \text{дБ}, \quad (17)$$

где функция J задается уравнением (13) для v_b больше $-0,78$, а в других случаях равна нулю.

Случай 2. Загоризонтная трасса

Если $S_{im} \geq S_r$, то трасса является загоризонтной.

Найдем промежуточную точку профиля с наибольшим наклоном линии от приемника к точке:

$$S_{rim} = \max \left[\frac{h_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - h_{rs}}{d - d_i} \right] \quad \text{м/км,} \quad (18)$$

где индекс профиля i принимает значения от 1 до $n - 1$.

Рассчитаем расстояние до точки Буллингтона от передатчика:

$$d_{bp} = \frac{h_{rs} - h_{ts} + S_{rim} d}{S_{im} + S_{rim}} \quad \text{км.} \quad (19)$$

Рассчитаем параметр дифракции, v_b , для точки Буллингтона:

$$v_b = \left[h_{ts} + S_{im} d_{bp} - \frac{h_{ts} (d - d_{bp}) + h_{rs} d_{bp}}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_{bp} (d - d_{bp})}} \quad (20)$$

В этом случае дифракционные потери над одиночным клиновидным препятствием для точки Буллингтона определяются выражением:

$$L_{uc} = J(v_b) \quad \text{дБ.} \quad (21)$$

Для L_{uc} , рассчитанного по формуле (17) или (21), дифракционные потери на трассе по Буллингтону определяются выражением:

$$L_{bull} = L_{uc} + [1 - \exp(-L_{uc}/6)](10 + 0,02d) \quad \text{дБ.} \quad (22)$$

4.2.2 Потери за счет дифракции над сферической Землей

Потери за счет дифракции над сферической Землей для высоты антенн h_{te} и h_{re} (м) вычисляются следующим образом.

Рассчитаем граничное расстояние прямой видимости (LoS) для гладкой трассы:

$$d_{los} = \sqrt{2a_p} \cdot \left(\sqrt{0,001h_{te}} + \sqrt{0,001h_{re}} \right) \quad \text{км.} \quad (23)$$

Значения, которые следует использовать для a_p , приведены в п. 4.2.4. Значения эффективной высоты h_{te} и h_{re} определяются согласно уравнениям (39а) и (39b).

Если $d \geq d_{los}$, рассчитаем дифракционные потери, используя метод, описанный в п. 4.2.2.1, ниже, для $a_{dfi} = a_p$, чтобы получить L_{dfi} , и установим $L_{d sph}$ равным L_{dfi} . Дальнейших расчетов дифракции над сферической Землей не требуется.

В ином случае продолжим вычисления следующим образом.

Рассчитаем наименьшую высоту просвета между трассой над искривленной Землей и лучом между антеннами, h_{se} , используя уравнение:

$$h_{se} = \frac{\left(h_{te} - 500 \frac{d_{se1}^2}{a_p} \right) d_{se2} + \left(h_{re} - 500 \frac{d_{se2}^2}{a_p} \right) d_{se1}}{d} \quad \text{м,} \quad (24)$$

где:

$$d_{se1} = \frac{d}{2} (1 + b) \quad \text{км;} \quad (25a)$$

$$d_{se2} = d - d_{se1} \quad \text{км;} \quad (25b)$$

$$b = 2\sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right\}, \quad (25c)$$

где функция \arccos возвращает угол в радианах:

$$c = \frac{h_{te} - h_{re}}{h_{te} + h_{re}}, \quad (25d)$$

$$m = \frac{250d^2}{a_p(h_{te} + h_{re})}. \quad (25e)$$

Рассчитаем требуемый просвет для нулевых дифракционных потерь, h_{req} , используя уравнение:

$$h_{req} = 17,456 \sqrt{\frac{d_{se1} \cdot d_{se2} \cdot \lambda}{d}} \quad \text{м.} \quad (26)$$

Если $h_{se} > h_{req}$, потери за счет дифракции над сферической Землей, L_{dsph} , равны нулю. Дальнейших расчетов дифракции над сферической Землей не требуется.

В ином случае продолжим вычисления следующим образом.

Рассчитаем измененный эквивалентный радиус Земли, a_{em} , который дает границу прямой видимости на расстоянии d , используя уравнение:

$$a_{em} = 500 \left(\frac{d}{\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}}} \right)^2 \quad \text{км.} \quad (27)$$

Используем метод, описанный в п. 4.2.2.1, для $a_{dfi} = a_{em}$, чтобы получить L_{dfi} .

Если значение L_{dfi} является отрицательным, потери за счет дифракции над сферической Землей, L_{dsph} , равны нулю, и дальнейших расчетов такой дифракции не требуется.

В ином случае продолжим вычисления следующим образом.

Рассчитаем потери за счет дифракции над сферической Землей методом интерполяции:

$$L_{dsph} = \left[1 - h_{se} / h_{req} \right] L_{dfi} \quad \text{дБ.} \quad (28)$$

4.2.2.1 Часть потерь за счет дифракции над сферической Землей, определяемая первым членом остаточного ряда

В данном пункте приводится метод расчета дифракции над сферической Землей с использованием только первого члена остаточного ряда. Этот метод является частью общего метода расчета дифракции, описанного в п. 4.2.2, выше, и предназначен для определения дифракционных потерь с учетом первого члена остаточного ряда, L_{dfi} , для данного значения эквивалентного радиуса Земли a_{dfi} . Значение a_{dfi} , которое необходимо использовать, дано в п. 4.2.2.

Установим типичные электрические свойства земной поверхности для суши с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 22,0$ и проводимостью $\sigma = 0,003$ См/м и вычислим L_{dfi} при помощи уравнений (30)–(37), чтобы получить $L_{dfiland}$.

Установим типичные электрические свойства земной поверхности для моря с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 80,0$ и проводимостью $\sigma = 5,0$ См/м и вычислим L_{dfi} при помощи уравнений (30)–(37), чтобы получить L_{dfisea} .

Потери за счет дифракции над сферической Землей, определяемые только первым членом, рассчитываются по формуле:

$$L_{dfi} = \omega L_{dfisea} + (1 - \omega) L_{dfiland} \quad \text{дБ,} \quad (29)$$

где ω – часть трассы, проходящая над морем.

Начнем вычисления, которые должны быть выполнены дважды, как описано выше.

Нормализованный коэффициент полной проводимости поверхности для горизонтальной и вертикальной поляризации:

$$K_H = 0,036 (a_{dft} f)^{-1/3} \left[(\epsilon_r - 1)^2 + (18 \sigma / f)^2 \right]^{-1/4} \quad (\text{горизонтальная поляризация}) \quad (30a)$$

и

$$K_V = K_H \left[\epsilon_r^2 + (18 \sigma / f)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{вертикальная поляризация}). \quad (30b)$$

Если вектор поляризации содержит как горизонтальный, так и вертикальный компонент, например круговую или наклонную поляризацию, разложим его на горизонтальный и вертикальный компоненты, вычислим каждый по отдельности, начиная с уравнений (30a) и (30b), после чего объединим результаты в виде суммы векторов амплитуды поля. На практике в таком разложении обычно нет необходимости, поскольку на частотах выше 300 МГц для β_{dft} в уравнении (31) можно использовать значение 1.

Вычислим параметр, учитывающий тип земной поверхности/поляризации:

$$\beta_{dft} = \frac{1 + 1,6K^2 + 0,67K^4}{1 + 4,5K^2 + 1,53K^4}, \quad (31)$$

где K – это K_H или K_V в зависимости от типа поляризации.

Нормализованное расстояние:

$$X = 21,88 \beta_{dft} \left(\frac{f}{a_{dft}^2} \right)^{1/3} d. \quad (32)$$

Нормализованные высоты передатчика и приемника:

$$Y_t = 0,9575 \beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{te}; \quad (33a)$$

$$Y_r = 0,9575 \beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{re}. \quad (33b)$$

Рассчитаем член, определяющий расстояние, используя уравнение:

$$F_X = \begin{cases} 11 + 10 \log(X) - 17,6X & \text{для } X \geq 1,6 \\ -20 \log(X) - 5,6488 X^{1,425} & \text{для } X < 1,6 \end{cases} \quad (34)$$

Определим функцию нормализованной высоты, используя уравнение:

$$G(Y_{t/r}) = \begin{cases} 17,6(B_{t/r} - 1,1)^{0,5} - 5 \log(B_{t/r} - 1,1) - 8 & \text{для } B_{t/r} > 2 \\ 20 \log(B_{t/r} + 0,1 B_{t/r}^3) & \text{в ином случае} \end{cases}, \quad (35)$$

где:

$$B_t = \beta_{dft} Y_t; \quad (36a)$$

$$B_r = \beta_{dft} Y_r. \quad (36b)$$

Если значение $G(Y)$ меньше $2 + 20 \log K$, необходимо ограничить $G(Y)$ так, чтобы $G(Y) = 2 + 20 \log K$.

Потери за счет дифракции над сферической Землей, определяемые первым членом остаточного ряда, теперь задаются уравнением:

$$L_{dft} = -F_X - G(Y_t) - G(Y_r) \quad \text{дБ.} \quad (37)$$

4.2.3 Полная модель дифракционных потерь "дельта-Буллингтон"

Используем метод, описанный в п. 4.2.1, для расчета фактического профиля местности и высоты антенн. Установим результирующие дифракционные потери по модели Буллингтона для реальной трассы $L_{bulla} = L_{bull}$, как это задано уравнением (22).

Используем метод, описанный в п. 4.2.1, еще раз для всех значений высоты профиля, h_i , установленных в нуль, и измененных значений высоты антенн, определяемых выражениями:

$$h'_{ts} = h_{ts} - h_{std} \quad \text{м над уровнем моря;} \quad (38a)$$

$$h'_{rs} = h_{rs} - h_{srd} \quad \text{м над уровнем моря,} \quad (38b)$$

где высоты гладкой земной поверхности в месте размещения передатчика и приемника, h_{std} и h_{srd} , указаны в п. 5.1.6.3 Прилагаемого документа 2. Установим результирующие дифракционные потери по модели Буллингтона для этой гладкой трассы, $L_{bulls} = L_{bull}$, как это задано уравнением (22).

Используем метод, описанный в п. 4.2.2, для расчета потерь за счет дифракции над сферической Землей L_{dsph} для реальной трассы длиной d (км) при:

$$h_{te} = h'_{ts} \quad \text{м;} \quad (39a)$$

$$h_{re} = h'_{rs} \quad \text{м.} \quad (39b)$$

Дифракционные потери для общей трассы теперь определяются как:

$$L_d = L_{bulla} + \max\{L_{dsph} - L_{bulls}, 0\} \quad \text{дБ.} \quad (40)$$

4.2.4 Дифракционные потери, не превышаемые для $p\%$ времени

Используем метод, описанный в п. 4.2.3, для расчета дифракционных потерь L_d для эквивалентного радиуса Земли $a_p = a_e$, который определяется уравнением (6a). Установим медианные дифракционные потери $L_{d50} = L_d$.

Если $p = 50\%$, то дифракционные потери, не превышаемые для $p\%$ времени, L_{dp} , определяются как L_{d50} , и расчет дифракции на этом заканчивается.

Если $p < 50\%$, продолжим вычисления следующим образом.

Используем метод, описанный в п. 4.2.3, для расчета дифференциальных потерь L_d для эквивалентного радиуса Земли $a_p = a_\beta$, который определяется уравнением (6b). Установим дифракционные потери, не превышаемые для $\beta_0\%$ времени, $L_{d\beta} = L_d$.

Применение двух возможных значений коэффициента эквивалентного радиуса Земли контролируется коэффициентом интерполяции, F_i , основанном на нормальном распределении дифракционных потерь в диапазоне $\beta_0\% \leq p < 50\%$ и определяемом как:

$$F_i = \frac{I\left(\frac{p}{100}\right)}{I\left(\frac{\beta_0}{100}\right)} \quad \text{для } 50\% > p > \beta_0\%; \quad (41a)$$

$$= 1 \quad \text{для } \beta_0\% \geq p, \quad (41b)$$

где $I(x)$ – обратная дополнительная кумулятивная функция нормального распределения. Аппроксимация для $I(x)$, которую можно использовать с доверительным интервалом для $x < 0,5$, приведена в Прилагаемом документе 3 к Приложению 1.

Дифракционные потери, L_{dp} , не превышаемые для $p\%$ времени, теперь определяются как:

$$L_{dp} = L_{d50} + F_i (L_{d\beta} - L_{d50}) \quad \text{дБ,} \quad (42)$$

где L_{d50} и $L_{d\beta}$ определены выше, а F_i задается уравнениями (41a) и (41b) в зависимости от значений p и β_0 .

Медианные основные потери передачи, связанные с дифракцией, L_{bd50} , определяются как:

$$L_{bd50} = L_{bfs_g} + L_{d50}, \quad \text{дБ}, \quad (43)$$

где L_{bfs_g} задается уравнением (8).

Основные потери передачи, связанные с дифракцией, не превышаемые для $p\%$ времени, определяются как

$$L_{bd} = L_{b0p} + L_{dp} \quad \text{дБ}, \quad (44)$$

где L_{b0p} задается уравнением (11).

4.3 Тропосферное рассеяние (Примечания 1 и 2)

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Для процентов времени значительно ниже 50% бывает трудно отделить истинный режим тропосферного рассеяния от других, второстепенных явлений, которые оказывают аналогичное воздействие на распространение радиоволн. Поэтому модель "тропосферного рассеяния", принятая в настоящей Рекомендации, является эмпирическим обобщением концепции тропосферного рассеяния, охватывающим также эти второстепенные явления распространения. Она позволяет осуществлять непрерывное прогнозирование основных потерь передачи в диапазоне изменения процентов времени p от 0,001% до 50%, связывая таким образом модели волновода и отражения от слоя при малых процентах времени с истинным "режимом рассеяния", соответствующим слабым остаточным полям, превышаемым в течение наибольшего процента времени.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Описываемая модель тропосферного рассеяния была разработана для прогнозирования помех и не предназначена для расчета условий распространения при процентах времени выше 50%, когда требуется информация о рабочих характеристиках радиорелейных систем, работающих за пределами горизонта.

Основные потери передачи за счет тропосферного рассеяния, L_{bs} (дБ), не превышаемые в течение любого процента времени p , меньшего 50%, равны:

$$L_{bs} = 190 + L_f + 20 \log d + 0,573\theta - 0,15 N_0 + L_c + A_g - 10,1[-\log(p/50)]^{0,7} \quad \text{дБ}, \quad (45)$$

где:

L_f : частотно зависимые потери:

$$L_f = 25 \log f - 2,5 [\log (f/2)]^2 \quad \text{дБ}; \quad (45a)$$

L_c : раскрыт по отношению к потерям за счет связи с окружающей средой (дБ):

$$L_c = 0,0051 \cdot e^{0,0055(G_t+G_r)} \quad \text{дБ}; \quad (45b)$$

N_0 : преломляющая способность поверхности на уровне моря в середине трассы, карты в Прилагаемом документе 1 к Приложению 1;

A_g : поглощение в газах, определяемое с помощью уравнения (9) в предположении, что $\rho = 3 \text{ г/м}^3$ по всей длине трассы.

4.4 Волноводное распространение/отражение от атмосферных слоев

Прогноз основных потерь передачи, L_{ba} (дБ), возникающих в периоды аномальных условий распространения радиоволн (волноводное распространение и отражение от слоев атмосферы), основан на использовании следующей функции:

$$L_{ba} = A_f + A_d(p) + A_g \quad \text{дБ}, \quad (46)$$

где:

A_f : сумма потерь (за исключением потерь из-за отражения от местных предметов) за счет фиксированной связи между антеннами и аномальных структур распространения, возникающих в атмосфере:

$$A_f = 102,45 + 20 \log f + 20 \log (d_{lt} + d_{lr}) + A_{lf} + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr} \quad \text{дБ}; \quad (47)$$

A_{lf} : эмпирическая поправка, для того чтобы учесть увеличивающееся ослабление с длиной волны при волноводном распространении:

$$A_{lf}(f) = 45,375 - 137,0 \cdot f + 92,5 \cdot f^2 \quad \text{дБ,} \quad \text{если } f < 0,5 \text{ ГГц;} \quad (47a)$$

$$A_{lf}(f) = 0,0 \text{ дБ} \quad \text{в других случаях;}$$

A_{st}, A_{sr} : дифракционные потери за счет экранирования местностью для станции, создающей и испытывающей помехи соответственно:

$$A_{st,sr} = \begin{cases} 20 \log \left[1 + 0,361 \theta''_{t,r} (f \cdot d_{lt,lr})^{1/2} \right] + 0,264 \theta''_{t,r} f^{1/3} \text{ дБ} & \text{для } \theta''_{t,r} > 0 \text{ мрад;} \\ 0 & \text{дБ для } \theta''_{t,r} \leq 0 \text{ мрад,} \end{cases} \quad (48)$$

где:

$$\theta''_{t,r} = \theta_{t,r} - 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{мрад;} \quad (48a)$$

A_{ct}, A_{cr} : поправки для станции, создающей и испытывающей помехи соответственно, учитывающие связь через волноводы, возникающие над поверхностью моря:

$$A_{ct,cr} = -3 e^{-0,25 d_{ct,cr}^2} \left[1 + \tanh (0,07 (50 - h_{ts,rs})) \right] \quad \text{дБ} \quad \text{для } \omega \geq 0,75;$$

$$d_{ct,cr} \leq d_{lt,lr}; \quad (49)$$

$$d_{ct,cr} \leq 5 \text{ км;}$$

$$A_{ct,cr} = 0 \quad \text{дБ} \quad \text{для всех остальных случаев.} \quad (49a)$$

Целесообразно отметить ограниченный набор условий, при которых требуется уравнение (49):

$A_d(p)$: потери, возникающие в аномальных условиях распространения и зависящие от процента времени и углового расстояния:

$$A_d(p) = \gamma_d \cdot \theta' + A(p) \quad \text{дБ,} \quad (50)$$

где:

γ_d : погонное ослабление:

$$\gamma_d = 5 \times 10^{-5} a_e f^{1/3} \quad \text{дБ/мрад;} \quad (51)$$

θ' : угловое расстояние (в случае необходимости скорректированное (с помощью уравнения (52a)), учитывающее применение модели экранирования местностью в уравнении (48)):

$$\theta' = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta'_t + \theta'_r \quad \text{мрад;} \quad (52)$$

$$\theta'_{t,r} = \begin{cases} \theta_{t,r} & \text{мрад} \quad \text{для } \theta_{t,r} \leq 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{мрад;} \\ 0,1 d_{lt,lr} & \text{мрад} \quad \text{для } \theta_{t,r} > 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{мрад;} \end{cases} \quad (52a)$$

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

$$A(p) = -12 + (1,2 + 3,7 \times 10^{-3} d) \log \left(\frac{p}{\beta} \right) + 12 \left(\frac{p}{\beta} \right)^\Gamma \quad \text{дБ;} \quad (53)$$

$$\Gamma = \frac{1,076}{(2,0058 - \log \beta)^{1,012}} \times e^{-(9,51 - 4,8 \log \beta + 0,198 (\log \beta)^2) \times 10^{-6} \cdot d^{1,13}}; \quad (53a)$$

$$\beta = \beta_0 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \quad \%; \quad (54)$$

μ_2 : поправка на геометрию трассы:

$$\mu_2 = \left[\frac{500}{a_e} \frac{d^2}{(\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}})^2} \right]^\alpha. \quad (55)$$

Значение μ_2 не должно быть больше 1.

Значения эффективной высоты h_{te} и h_{re} определяются согласно уравнению (170).

$$\alpha = -0,6 - \varepsilon \cdot 10^{-9} \cdot d^{3,1} \cdot \tau, \quad (55a)$$

где:

$$\varepsilon = 3,5;$$

τ : определяется с помощью уравнения (3а), а значение α не должно быть ниже, чем $-3,4$;

μ_3 : поправка на неровность земной поверхности:

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{для } h_m \leq 10 \text{ м;} \\ \exp \left[-4,6 \times 10^{-5} (h_m - 10) (43 + 6d_l) \right] & \text{для } h_m > 10 \text{ м;} \end{cases} \quad (56)$$

$$d_l = \min (d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \quad \text{км;} \quad (56a)$$

A_g : общее поглощение в атмосферных газах, определяемое с помощью уравнений (9) и (9а).

Оставшиеся члены описаны в таблицах 1 и 2 и Прилагаемом документе 2.

4.5 Дополнительные потери за счет отражения от местных предметов

4.5.1 Общие положения

Существенный выигрыш, в смысле защиты от помех, можно получить, если учесть дополнительные дифракционные потери, которые возникают вследствие беспорядочного отражения сигнала от местных предметов (зданий, растительности и т. д.), окружающих антенны. Описываемая процедура позволяет учесть такие потери на одном или обоих концах трассы в ситуациях, когда имеется полная информация относительно типа окружающей среды. Она дает возможность спрогнозировать максимальные дополнительные потери на обоих концах трассы, если ее применять с помощью интерполяционной функции S-образной формы, предназначенной для избежания переоценки потерь за счет экранирования. Максимальные дополнительные потери составляют 20 дБ на частотах выше 0,9 ГГц, постепенно уменьшаясь на более низких частотах до 5 дБ на частоте 0,1 ГГц. Если же существуют сомнения относительно точности такой информации, то названные дополнительные потери не следует учитывать. В тех случаях, когда используется поправка, необходимо следить за тем, чтобы не возникало больших потерь за счет отражения от местных предметов в городских районах с высотными постройками, состоящими из отдельных высотных зданий, отделенных друг от друга открытым пространством. Меньшие потери за счет отражения от местных предметов часто наблюдаются в таких районах по сравнению с более традиционными городскими центрами, которые включают более низкие, однако более связанные между собой комплексы зданий.

Потери за счет отражения от местных предметов для станций, создающих помехи и испытывающих эти помехи, обозначены соответственно A_{ht} (дБ) и A_{hr} (дБ). Возможная дополнительная защита зависит от высоты и следовательно моделируется в виде функции выигрыша за счет высоты, нормированной по отношению к номинальной высоте местных отражающих предметов. Имеются соответствующие номинальные значения высоты для ряда типов местных отражающих предметов.

В настоящей Рекомендации поправка применяется для всех прогнозов в условиях ясного неба, т. е. для всех режимов распространения и всех процентов времени.

4.5.2 Категории местных отражающих предметов

В таблице 4 описаны категории местных отражающих предметов (или земного покрова), определенные в Рекомендации МСЭ-R P.1058, для которых применима поправка на выигрыш за счет высоты. Номинальная высота местных отражающих предметов, h_a (м), и их расстояние от антенны, d_k (км), считаются "усредненными" величинами, наиболее представительными для отражателей данного типа. Вместе с тем модель поправок является консервативной ввиду неточности сведений относительно действительной высоты, что типично для конкретных ситуаций. Если параметры отражающего предмета известны точнее, ими можно непосредственно заменять значения, приведенные в таблице 4.

Приведенные в таблице 4 номинальные значения высоты и расстояния приблизительно равны характеристической высоте H_c и ширине промежутка G_c , определенным в Рекомендации МСЭ-R P.1058. Однако предполагается, что модель, используемая здесь для оценки дополнительных потерь за счет экранирования местными отражающими предметами (земным покровом), является консервативной.

4.5.3 Модель выигрыша за счет высоты

Дополнительные потери вследствие защиты от местных отражающих предметов описываются выражением:

$$A_h = 10,25 F_{fc} \cdot e^{-d_k} \left(1 - \tanh \left[6 \left(\frac{h}{h_a} - 0,625 \right) \right] \right) - 0,33 \quad \text{дБ}, \quad (57)$$

где:

$$F_{fc} = 0,25 + 0,375 \{ 1 + \tanh[7,5(f - 0,5)] \} \quad (57a)$$

и

d_k : расстояние (км) от номинального местоположения отражающего предмета до антенны (см. рисунок 3);

h : высота антенны (м) над местным уровнем земли;

h_a : номинальная высота отражающего предмета (м) над местным уровнем земли.

ТАБЛИЦА 4

Номинальные высоты отражающих предметов и их расстояния до антенны

Категория отражающих предметов (земной поверхности)	Номинальная высота, h_a (м)	Номинальное расстояние, d_k (км)
Высокоурожайные поля Зеленая парковая зона Беспорядочно расположенные редкие деревья Фруктовый сад (с правильным расположением деревьев) Отдельные строения	4	0,1
Центральная часть деревни	5	0,07
Лиственные деревья (беспорядочно расположенные) Лиственные деревья (правильно расположенные) Смешанный лес	15	0,05
Хвойные деревья (беспорядочно расположенные) Хвойные деревья (правильно расположенные)	20	0,05
Тропический лес	20	0,03
Пригороды	9	0,025

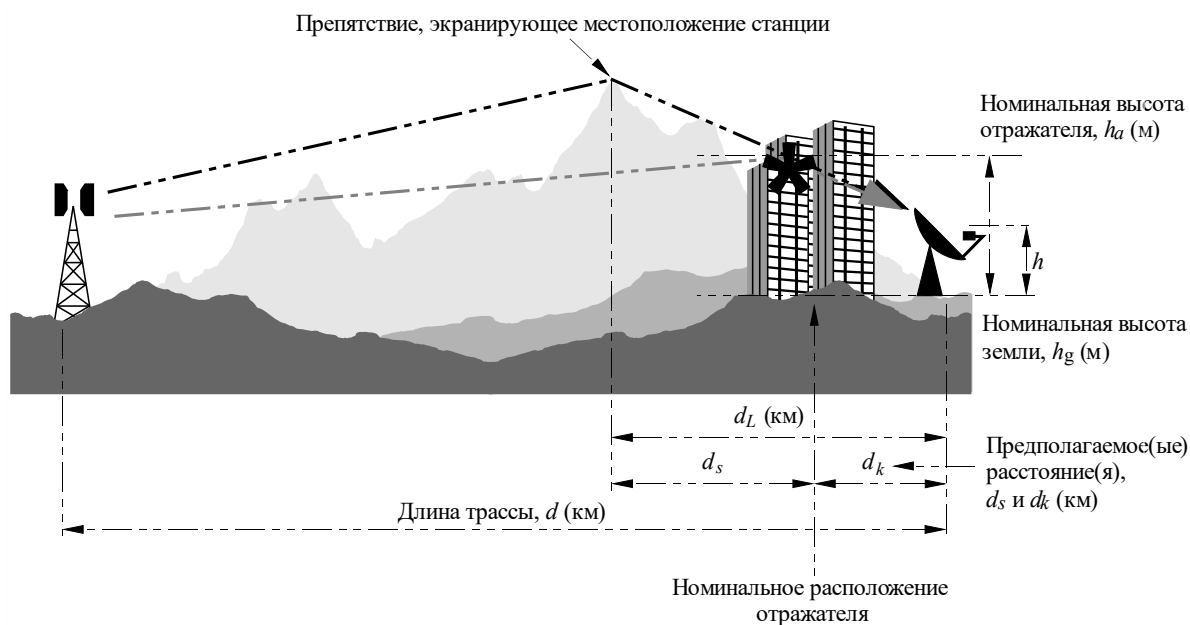
ТАБЛИЦА 4 (окончание)

Категория отражающих предметов (земной поверхности)	Номинальная высота, h_a (м)	Номинальное расстояние, d_k (км)
Густонаселенный пригород	12	0,02
Город	20	0,02
Густонаселенный город	25	0,02
Городской район с высотными постройками	35	
Промышленная зона	20	0,05

Дополнительные потери за счет экранирования местными отражающими предметами (земным покровом) не должны заявляться для категорий, отсутствующих в таблице 4.

РИСУНОК 3

Способ применения поправки на выигрыш за счет высоты, A_{ht} или A_{hr}



P.0452-03

4.5.4 Способ применения

Метод использования поправки на выигрыш за счет высоты, A_{ht} или A_{hr} (дБ), прост и показан на рисунке 3.

К основной процедуре прогнозирования необходимо добавить следующие шаги.

Шаг 1. Если тип отражающих предметов известен или о нем можно сделать уверенное предположение, то для расчета основных потерь передачи следует использовать основную процедуру прогнозирования, выбрав из таблицы 4 номинальную высоту h_a , соответствующую типу отражателя. Длина трассы должна быть равна $d - d_k$ (км). Однако если $d \gg d_k$, то незначительную поправку d_k в выражении для длины трассы можно смело опустить.

Шаг 2. Когда имеется препятствие, экранирующее местоположение станции и способное обеспечить защиту терминала от помех, поправка должна быть включена в основные расчеты, но потери за счет экранирования (A_{st} или A_{sr} (дБ)) следует вычислять, используя высоту h_a при расстоянии d_s , а не h при расстоянии d_L , что имело бы место в других случаях.

Шаг 3. После окончания основной процедуры следует добавить поправку на выигрыш за счет высоты, полученную с помощью уравнения (57), как указано в уравнении (64).

Шаг 4. Если информация об отражающем предмете отсутствует, основные расчеты следует производить, используя расстояния d или d_L (в зависимости от ситуации) и высоту h .

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – При необходимости поправку на выигрыш за счет высоты отражающего предмета следует учитывать для обоих концов трассы.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Если необходимо ввести и поправку на выигрыш за счет высоты участка суши и поправку на связь через волновод, расположенный над морем (A_{ct} или A_{cr} (дБ)) (т. е. антенна расположена вблизи моря, но ее затеняют местные предметы), то обе эти поправки можно использовать вместе, так как они совместимы и дополняют друг друга.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Если d ненамного больше d_k , эта модель неприменима.

4.6 Общий прогноз

К результатам вышеизложенных расчетов для всех трасс необходимо применять следующую процедуру.

Рассчитаем коэффициент интерполяции, F_j , для учета параметров наклона:

$$F_j = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \tanh \left(3,0 \xi \frac{(S_{tim} - S_{tr})}{\Theta} \right) \right), \quad (58)$$

где:

- ξ : настраиваемый параметр, который обычно приравнен к 0,8;
- $(S_{tim} - S_{tr})$: параметры наклона, определенные в уравнениях (14) и (15);
- Θ : настраиваемый параметр, который обычно приравнен к 0,3 мрад.

Рассчитаем коэффициент интерполяции, F_k , для учета расстояния вдоль дуги большого круга трассы:

$$F_k = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \tanh \left(3,0 \kappa \frac{(d - d_{sw})}{d_{sw}} \right) \right), \quad (59)$$

где:

- d : длина трассы по дуге большого круга (км), определяемая в таблице 3;
- d_{sw} : фиксированный параметр, определяющий диапазон расстояния соответствующего смещения; устанавливается равным 20;
- κ : фиксированный параметр, определяющий наклон на концах этого диапазона при смещении; устанавливается равным 0,5.

Рассчитаем воображаемые минимальные основные потери передачи, L_{minb0p} (дБ), связанные с распространением в пределах прямой видимости и дифракцией на субтрассах над поверхностью моря:

$$L_{minb0p} = \begin{cases} L_{b0p} + (1 - \omega)L_{dp} & \text{для } p < \beta_0; \\ L_{bd50} + (L_{b0\beta} + (1 - \omega)L_{dp} - L_{bd50}) \cdot F_i & \text{для } p \geq \beta_0 \end{cases} \quad \text{дБ}, \quad (60)$$

где:

- L_{b0p} : воображаемые основные потери передачи в пределах прямой видимости, не превышаемые для $p\%$ времени, определяемые из уравнения (11);
- $L_{b0\beta}$: воображаемые основные потери передачи в пределах прямой видимости, не превышаемые для $\beta\%$ времени, определяемые из уравнения (12);
- L_{dp} : дифракционные потери, не превышенные для $p\%$ времени, рассчитанные с использованием метода, описанного в п. 4.2;
- F_i : коэффициент интерполяции дифракции, определяемый с помощью уравнения (41).

Рассчитаем воображаемые минимальные основные потери передачи, L_{minbap} (дБ), связанные с усилением уровня сигнала в пределах прямой видимости и загоризонтным усилением:

$$L_{minbap} = \eta \ln \left(\exp \left(\frac{L_{ba}}{\eta} \right) + \exp \left(\frac{L_{b0p}}{\eta} \right) \right) \quad \text{дБ}, \quad (61)$$

где:

L_{ba} : основные потери передачи за счет отражения в волноводе/слоях атмосферы, не превышенные для $p\%$ времени, определяемые из уравнения (46);

L_{b0p} : воображаемые основные потери передачи в пределах прямой видимости, не превышенные для $p\%$ времени, определяемые из уравнения (11);

$$\eta = 2,5.$$

Рассчитаем воображаемые основные потери передачи, L_{bda} (дБ), связанные с дифракцией и усилением уровня сигнала в пределах прямой видимости либо за счет отражения в волноводе/слоях атмосферы:

$$L_{bda} = \begin{cases} L_{bd} & \text{для } L_{minbap} > L_{bd}; \\ L_{minbap} + (L_{bd} - L_{minbap})F_k & \text{для } L_{minbap} \leq L_{bd} \end{cases} \quad \text{дБ}, \quad (62)$$

где:

L_{bd} : основные потери передачи для дифракции, не превышаемые для $p\%$ времени, из уравнения (44);

F_k : коэффициент интерполяции, полученный из уравнения (59) в соответствии со значением расстояния вдоль дуги большого круга d .

Рассчитаем изменяющиеся потери основной передачи, L_{bam} (дБ), учитывающие дифракцию и усиление уровня сигнала в пределах прямой видимости либо за счет отражения в волноводе/слоях атмосферы:

$$L_{bam} = L_{bda} + (L_{minb0p} - L_{bda})F_j \quad \text{дБ}. \quad (63)$$

Рассчитаем окончательные основные потери передачи, не превышаемые для $p\%$ времени, L_b (дБ):

$$L_b = -5 \log \left(10^{-0,2L_{bs}} + 10^{-0,2L_{bam}} \right) + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{дБ}, \quad (64)$$

где:

$A_{ht, hr}$: дополнительные потери для учета экранирования передатчика и приемника в результате отражения от местных предметов. Они должны быть установлены на нуль при отсутствии такого экранирования.

4.7 Расчет потерь передачи

Метод, описанный выше в пп. 4.1–4.6, определяет основные потери передачи между двумя станциями. Для расчета уровня сигнала на одной станции в результате действия помех от другой станции необходимо знать потери передачи, учитывающие коэффициенты усиления антенн двух станций в направлении радиотрассы (т. е. трассы прихода помехи) между ними.

Следующая процедура предоставляет метод расчета потерь передачи между двумя наземными станциями. В данном методе в качестве промежуточных этапов представлены также формулы для расчета длины трассы по дуге большого круга и углового расстояния, основанные на географических координатах станций, в отличие от вывода этих параметров из профиля трассы, как предложено в таблице 3.

Рассчитаем угол, образованный трассой в центре Земли, δ , из географических координат станций, используя формулу:

$$\delta = \arccos(\sin(\varphi_t) \sin(\varphi_r) + \cos(\varphi_t) \cos(\varphi_r) \cos(\psi_t - \psi_r)) \quad \text{рад}. \quad (65)$$

Расстояние по дуге большого круга, d , между станциями равно:

$$d = 6371 \cdot \delta \quad \text{км.} \quad (66)$$

Рассчитаем опорное направление (азимутальное направление по часовой стрелке от истинного севера) от станции t к станции r , используя формулу:

$$\alpha_{tr} = \arccos(\{\sin(\varphi_r) - \sin(\varphi_t) \cos(\delta)\} / \sin(\delta) \cos(\varphi_t)) \quad \text{рад.} \quad (67)$$

Выполнив расчет по уравнению (67) для случая $\psi_t - \psi_r > 0$, имеем:

$$\alpha_{tr} = 2\pi - \alpha_{tr} \quad \text{рад.} \quad (68)$$

Рассчитаем опорное направление от станции r к станции t , α_{rt} , за счет симметрии уравнений (67) и (68).

Далее предположим, что направление главного луча (опорное направление) станции t соответствует $(\varepsilon_t, \alpha_t)$ по (углу места, пеленгу), в то время как направление главного луча станции r соответствует $(\varepsilon_r, \alpha_r)$. Для получения углов места радиотрассы (т. е. трассы прихода помехи) на станциях t и r , ε_{pt} и ε_{pr} соответственно, необходимо различать трассы прямой видимости и загоризонтные трассы. Например, для трасс прямой видимости:

$$\varepsilon_{pt} = \frac{h_r - h_t}{d} - \frac{d}{2a_e} \quad \text{рад} \quad (69a)$$

и

$$\varepsilon_{pr} = \frac{h_t - h_r}{d} - \frac{d}{2a_e} \quad \text{рад,} \quad (69b)$$

где h_t и h_r – высоты станций над средним уровнем моря (км), в то время как для загоризонтных трасс углы места задаются их соответствующими углами горизонта:

$$\varepsilon_{pt} = \frac{\theta_t}{1000} \quad \text{рад} \quad (70a)$$

и

$$\varepsilon_{pr} = \frac{\theta_r}{1000} \quad \text{рад.} \quad (70b)$$

Заметим, что углы радиогоризонта, θ_t и θ_r (мрад), впервые встречаются в таблице 3 и определены соответственно в пп. 5.1.1 и 5.1.3 Прилагаемого документа 2 к Приложению 1.

Для расчета внеосевых углов для станций t и r , χ_t и χ_r соответственно, в направлении трассы прихода помех на станциях t и r рекомендуется использовать:

$$\chi_t = \arccos(\cos(\varepsilon_t) \cos(\varepsilon_{pt}) \cos(\alpha_{tr} - \alpha_t) + \sin(\varepsilon_t) \sin(\varepsilon_{pt})) \quad (71a)$$

и

$$\chi_r = \arccos(\cos(\varepsilon_r) \cos(\varepsilon_{pr}) \cos(\alpha_{rt} - \alpha_r) + \sin(\varepsilon_r) \sin(\varepsilon_{pr})). \quad (71b)$$

Коэффициенты усиления (дБ) антенн для станций t и r , G_t и G_r соответственно, получаем, используя их соответствующие внеосевые углы. Если фактические диаграммы направленности излучения антенн неизвестны, то изменение усиления в зависимости от углов внеосевого излучения можно определить из информации в Рекомендации МСЭ-R S.465.

Для получения потерь передачи, L , используем формулу:

$$L = L_b(p) - G_t - G_r \quad \text{дБ.} \quad (72)$$

Для сценариев помех в условиях ясного неба, когда распространение радиоволн определяется преимущественно тропосферным рассеянием, углы места будут ненамного больше углов радиогоризонта θ_t и θ_r . Использование этих углов приведет к незначительной ошибке, если только они не будут также совпадать с опорными направлениями соответствующих станций.

5 Прогнозирование помех за счет рассеяния в гидрометеорах

В отличие от предыдущих рассмотренных выше методов прогнозирования в условиях ясного неба описываемая далее методика прогнозирования помех за счет рассеяния в гидрометеорах формулирует выражения для потерь передачи непосредственно между двумя станциями, поскольку при этом требуется знание диаграмм направленности излучения мешающей и испытываемой помехи антенн для каждой станции.

Этот метод является довольно общим в том смысле, что он может использоваться с любой диаграммой направленности антенны и обеспечивает метод определения усиления антенны для любого угла вне оси основного излучения. Могут использоваться все диаграммы направленности, такие как приведены, например, в Рекомендациях МСЭ-R P.620, МСЭ-R F.699, МСЭ-R F.1245, МСЭ-R S.465 и МСЭ-R S.580, как и более сложные диаграммы, основанные на функциях Бесселя, и реальные измеренные диаграммы, если они доступны. Данный метод может также использоваться со всенаправленными антеннами или секторальными антеннами, такими как описаны в Рекомендации МСЭ-R F.1336, усиление которых обычно определяется исходя из вертикального угла вне оси основного излучения (т. е. возвышения относительно угла максимального усиления).

Этот метод является также общим в том смысле, что он не ограничивается какой-либо конкретной геометрией, при условии что имеются диаграммы направленности антенны с охватом $\pm 180^\circ$. Таким образом, он включает как связь между главными лучами, так и связь между боковыми и главным лепестками, а также геометрию рассеяния по дуге большого круга и геометрию бокового рассеяния. При помощи этого метода можно рассчитать уровни помех для геометрий как длинных трасс (> 100 км), так и коротких трасс (до нескольких километров) с произвольными углами места и азимута на каждой станции. Поэтому такая методика подходит для широкого диапазона сценариев и служб, включая определение помех за счет рассеяния в дожде между двумя наземными станциями, между наземной станцией и земной станцией и между двумя земными станциями, работающими в полосах частот, распределенных в двух направлениях.

5.1 Введение

Рассматриваемая методика основана на применении уравнения бистатического радара, которое можно записать в виде мощности P_r , полученной на приемной станции в результате рассеяния в дожде мощности P_t , переданной передающей станцией:

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \iiint_{all\ space} \frac{G_t G_r \eta A}{r_t^2 r_r^2} dV \quad \text{Вт}, \quad (73)$$

где:

- λ : длина волны;
- G_t : усиление передающей антенны (линейное);
- G_r : усиление приемной антенны (линейное);
- η : эффективная площадь рассеяния на единицу объема δV ($\text{м}^2/\text{м}^3$);
- A : ослабление вдоль трассы от передатчика к приемнику (в линейных единицах);
- r_t : расстояние от передатчика до рассеивающего элемента объема;
- r_r : расстояние от рассеивающего элемента объема до приемника.

Выраженное на основе потерь передачи (дБ) для случая рассеяния между двумя станциями, Станцией 1 и Станцией 2, уравнение бистатического радара превращается в:

$$L = 178 - 10 \log N - 20 \log f - 10 \log Z_R - 10 \log C - 10 \log S + A_g - M \quad \text{дБ}, \quad (74)$$

где:

- N : член, определяющий рэлеевское рассеяния, которое зависит от индекса рефракции;

$$N = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad (74a)$$

m : комплексный индекс рефракции, зависящий от частоты и атмосферных условий;

f : частота (ГГц);

Z_R : отражательная способность радара на уровне земли, которую можно выразить через интенсивность дождевых осадков, R (мм/ч):

$$Z_R = 400R^{1.4}; \quad (75)$$

$10 \log S$: поправка, (дБ), для учета отклонения от рэлеевского рассеяния на частотах выше 10 ГГц:

$$10 \log S = \begin{cases} R^{0.4} \cdot 10^{-3} \left[4(f-10)^{1.6} \left(\frac{1+\cos\phi_S}{2} \right) + 5(f-10)^{1.7} \left(\frac{1-\cos\phi_S}{2} \right) \right] & \text{для } f > 10 \text{ ГГц} \\ 0 & \text{для } f \leq 10 \text{ ГГц} \end{cases} \quad (76)$$

где:

ϕ_S : угол рассеяния;

A_g : ослабление в атмосферных газах вдоль трассы от передатчика к приемнику (дБ), рассчитанное по данным Приложения 2 к Рекомендации МСЭ-R P.676;

M : любое рассогласование по поляризации между передающей и приемной системами (дБ).

В приведенной здесь модели рассеяние ограничивается уровнем рассеяния в очаге дождя, определяемом в виде кругового поперечного сечения, диаметр которого зависит от интенсивности дождевых осадков:

$$d_c = 3,3R^{-0.08} \quad \text{км.} \quad (77)$$

Предполагается, что в пределах очага дождя интенсивность дождевых осадков и, следовательно, отражательная способность радара являются постоянными вплоть до высоты слоя дождя, h_R . Также предполагается, что на высотах, превышающих высоту слоя дождя, отражательная способность уменьшается линейно с высотой со скоростью $-6,5$ дБ/км.

В этом случае передаточная функция рассеяния, C , представляет собой интеграл по объему в очаге дождя и может быть записана в цилиндрических координатах как:

$$C = \int_0^{h_{max}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_1^2 r_2^2} A \zeta \cdot r \, dr d\phi dh, \quad (78)$$

где:

G_1, G_2 : значения линейного усиления Станции 1 и Станции 2 соответственно;

r_1, r_2 : расстояния (км) от элемента интегрирования, δV , до Станции 1 и Станции 2 соответственно;

A : ослабление в дожде как внутри, так снаружи очага дождя, выраженное в линейных единицах;

ζ : зависимость отражательной способности радара от высоты:

$$\zeta = \begin{cases} 1 & \text{для } h \leq h_R; \\ 10^{-0.65(h-h_R)} & \text{для } h > h_R; \end{cases} \quad (79)$$

h_R : высота дождя (км);

r, ϕ, h : переменные интегрирования в пределах очага дождя.

Интегрирование выполняется в числах, в цилиндрических координатах. Однако вначале удобно рассмотреть геометрию рассеяния от передающей станции через очаг дождя к приемной станции на основе декартовой системы координат, причем за начало координат берется Станция 1, поскольку фактическое расположение очага дождя не определяется сразу, особенно в случае бокового рассеяния.

В рамках декартовой системы координат целесообразно сначала в целях упрощения преобразовать различные геометрические параметры из их фактических значений для искривленной Земли в соответствующее отображение для плоской Земли.

Наличие связи между главными лучами антенн устанавливается из геометрии, а очаг дождя затем помещается в точке пересечения осей главных лучей. Если связь между главными лучами отсутствует, то очаг дождя помещается вдоль оси главного луча Станции 1 с центром в точке наибольшего приближения к оси главного луча Станции 2. В этом случае потери передачи должны определяться для второго случая с взаимозаменяемыми параметрами каждой станции, а распределение потерь для наихудшего случая считается представительным для вероятных уровней помех.

5.2 Входные параметры

В таблице 5 перечислены все входные параметры, необходимые для реализации метода расчета кумулятивного распределения потерь передачи между двумя станциями вследствие рассеяния в дожде.

ТАБЛИЦА 5

Перечень входных параметров

(нижний индекс 1 относится к параметрам для Станции 1, нижний индекс 2 относится к параметрам для Станции 2)

Параметр	Единицы	Описание
d	км	Расстояние между станциями
f	ГГц	Частота
h_{1_loc}, h_{2_loc}	км	Местные высоты Станции 1 и Станции 2 над средним уровнем моря
G_{max-1}, G_{max-2}	дБ	Максимальные значения усиления для каждой антенны
$h_R(p_h)$	км	Кумулятивное распределение высоты слоя дождя, превышаемой в функции процента времени, p_h (см. примечание 1)
M	дБ	Рассогласование по поляризации между системами
P	гПа	Поверхностное давление (по умолчанию 1013,25 гПа)
$R(p_R)$	мм/ч	Кумулятивное распределение интенсивности дождевых осадков, превышаемой в функции процента времени, p_R
T	°С	Поверхностная температура (по умолчанию 15 °С)
$\alpha_{1_loc}, \alpha_{2_loc}$	рад	Местные пеленги Станции 1 от Станции 2 и Станции 2 от Станции 1 в направлении по часовой стрелке
$\varepsilon_{H1_loc}, \varepsilon_{H2_loc}$	рад	Местные углы горизонта для Станции 1, Станции 2
ρ	г/м ³	Плотность водяных паров на поверхности (по умолчанию 8 г/м ³)
τ	град	Угол поляризации линии (0° для горизонтальной поляризации, 90° для вертикальной поляризации)

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Если распределение неизвестно, используйте медианную высоту дождя, h_R , наряду с таблицей 6, ниже.

5.3 Этапы процедуры

Шаг 1. Определение метеорологических параметров

Для получения кумулятивного распределения потерь передачи вследствие рассеяния в дожде в виде процентов времени превышения таких потерь требуемыми входными параметрами служат распределения вероятностей интенсивности дождевых осадков и высота слоя дождя. Если имеются местные значения этих параметров, они должны применяться. При отсутствии местных значений для получения кумулятивных распределений интенсивности дождевых осадков для любого местоположения может использоваться Рекомендация МСЭ-R P.837, в то время как медианное значение высоты слоя дождя можно получить из Рекомендации МСЭ-R P.839. По умолчанию для получения кумулятивного распределения значений высоты слоя дождя может использоваться распределение значений высоты слоя дождя относительно медианного значения в таблице 6.

ТАБЛИЦА 6

Кумулятивное распределение значений высоты слоя дождя относительно его медианного значения

Разность значений высоты дождя (км)	Вероятность превышения (%)
-1,625	100,0
-1,375	99,1
-1,125	96,9
-0,875	91,0
-0,625	80,0
-0,375	68,5
-0,125	56,5
0,125	44,2
0,375	33,5
0,625	24,0
0,875	16,3
1,125	10,2
1,375	6,1
1,625	3,4
1,875	1,8
2,125	0,9
2,375	0,0

Кумулятивные распределения как интенсивности дождевых осадков, так и высоты слоя дождя преобразуются в функции плотности вероятностей следующим образом. Для каждого интервала между двумя соседними значениями интенсивности дождевых осадков или высоты слоя дождя в качестве представительной величины для этого интервала берется среднее значение, а вероятность его появления равна разности между двумя соответствующими вероятностями превышения. Любые значения, для которых h_R меньше 0 км при использовании таблицы 5, устанавливаются на 0 км, причем их вероятности суммируются.

Предполагается, что значения интенсивности дождевых осадков и высоты слоя дождя статистически независимы друг от друга, так что вероятность появления для любой заданной пары сочетаний интенсивности дождевых осадков/высоты слоя дождя представляет собой всего лишь произведение отдельных вероятностей.

Для каждой пары значений интенсивности дождевых осадков/высоты слоя дождя потери передачи вычисляются согласно приведенным ниже шагам.

Шаг 2. Преобразование геометрических параметров в изображение на плоской Земле

Геометрия рассеяния в дожде между двумя станциями определяется из основных входных параметров: расстояния d по дуге большого круга между двумя станциями, локальных значений углов места антенны каждой станции, ε_{1-loc} и ε_{2-loc} , и азимутальных смещений осей главных лепестков антенн для каждой станции от направления другой станции, определяемых как положительные в направлении часовой стрелки, α_{1-loc} и α_{2-loc} . Станция 1 принимается за исходное положение, т. е. начало отсчета, в декартовой системе координат, а опорные параметры вычисляются следующим образом:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1-loc}, \alpha_1 = \alpha_{1-loc} \text{ и } \varepsilon_{H1} = \varepsilon_{H1-loc} \quad \text{рад.} \quad (80)$$

Сначала преобразуем все геометрические параметры в обычную декартову систему координат, взяв Станцию 1 как начало отсчета, с горизонтальной плоскостью в виде плоскости x - y , осью x , ориентированной в направлении Станции 2, и осью z , ориентированной вертикально вверх. На рисунке 4 показана геометрия на искривленной поверхности Земли (для упрощенного случая рассеяния в прямом направлении, т. е. вдоль дуги большого круга), где r_{eff} – эквивалентный радиус Земли:

$$r_{eff} = k_{50} R_E \quad \text{км,} \quad (81)$$

где:

k_{50} : медианный коэффициент эквивалентного радиуса Земли = 1,33;

R_E : истинный радиус Земли = 6371 км.

Две станции разделяются расстоянием по дуге большого круга, d (км), стягивающей угол δ в центре Земли:

$$\delta = \frac{d}{r_{eff}} \quad \text{рад.} \quad (82)$$

Местная вертикаль на Станции 2 отклоняется на угол δ от местной вертикали на Станции 1, т. е. оси z . Углы места и азимута на Станции 2 соответственно преобразуются в изображение на плоской Земле, как показано ниже, где нижний индекс *loc* относится к местным значениям.

Вычисляем угол места Станции 2:

$$\varepsilon_2 = \arcsin(\cos \varepsilon_{2-loc} \cos \alpha_{2-loc} \sin \delta + \sin \varepsilon_{2-loc} \cos \delta) \quad (83)$$

и угол горизонта на Станции 2:

$$\varepsilon_{H2} = \arcsin(\cos \varepsilon_{H2-loc} \cos \alpha_{2-loc} \sin \delta + \sin \varepsilon_{H2-loc} \cos \delta). \quad (84)$$

Смещение азимута Станции 2 относительно Станции 1 составляет:

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{\cos \varepsilon_{2-loc} \sin \alpha_{2-loc}}{\cos \varepsilon_{2-loc} \cos \alpha_{2-loc} \cos \delta - \sin \varepsilon_{2-loc} \sin \delta}\right), \quad (85)$$

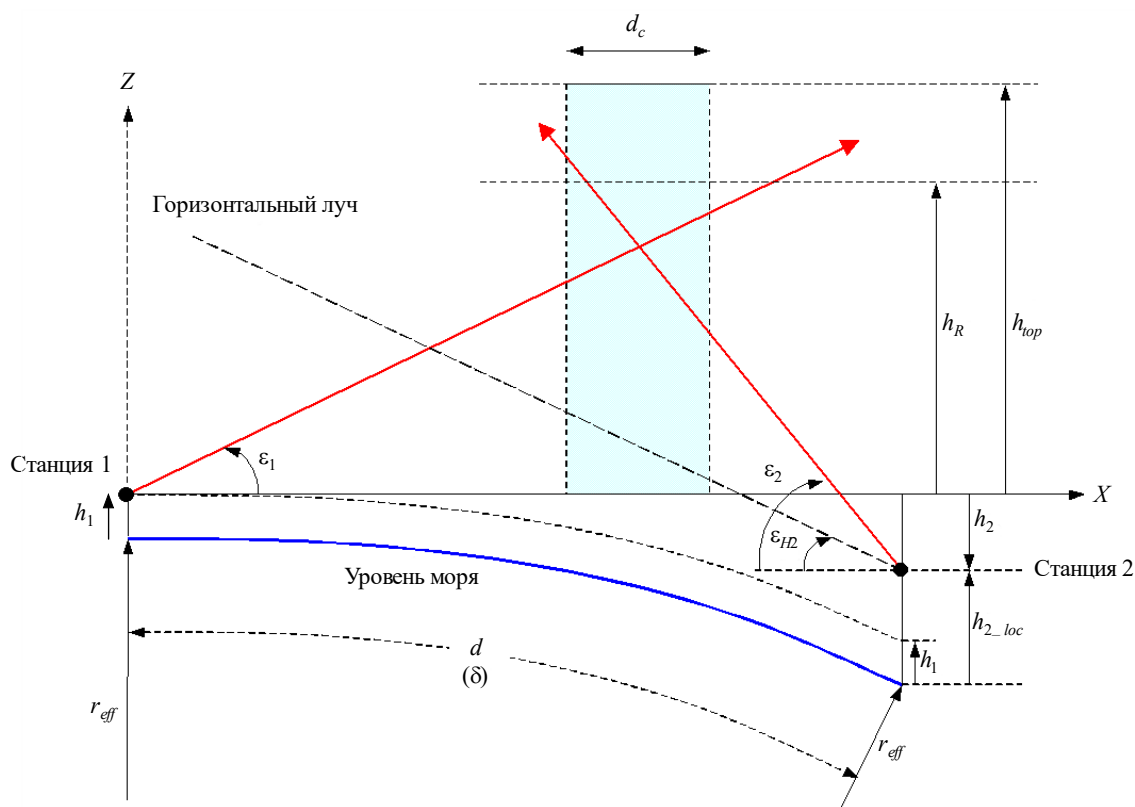
а высота Станции 2 над базовой плоскостью определяется как:

$$h_2 = h_{2-loc} - h_1 - d \frac{\delta}{2} \quad \text{км.} \quad (86)$$

Азимутальный разнос между двумя станциями в точке пересечения проекций на плоскость Земли осей главных лепестков составляет:

$$\alpha_S = \pi - (\alpha_1 - \alpha_2) \quad \text{рад.} \quad (87)$$

РИСУНОК 4
Геометрия станций на искривленной поверхности Земли



P.0452-04

Шаг 3. Определение геометрии линии

В методе определения геометрии линий рассеяния используется векторная запись, в которой вектор в трехмерном пространстве представляется в виде трехэлементной матрицы с одним столбцом, содержащей длины проекций рассматриваемой линии на осях x , y и z декартовой системы координат. Вектор представляется в виде символа, изображенного жирным шрифтом. Таким образом, векторное присвоение может, как правило, записываться в виде:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}.$$

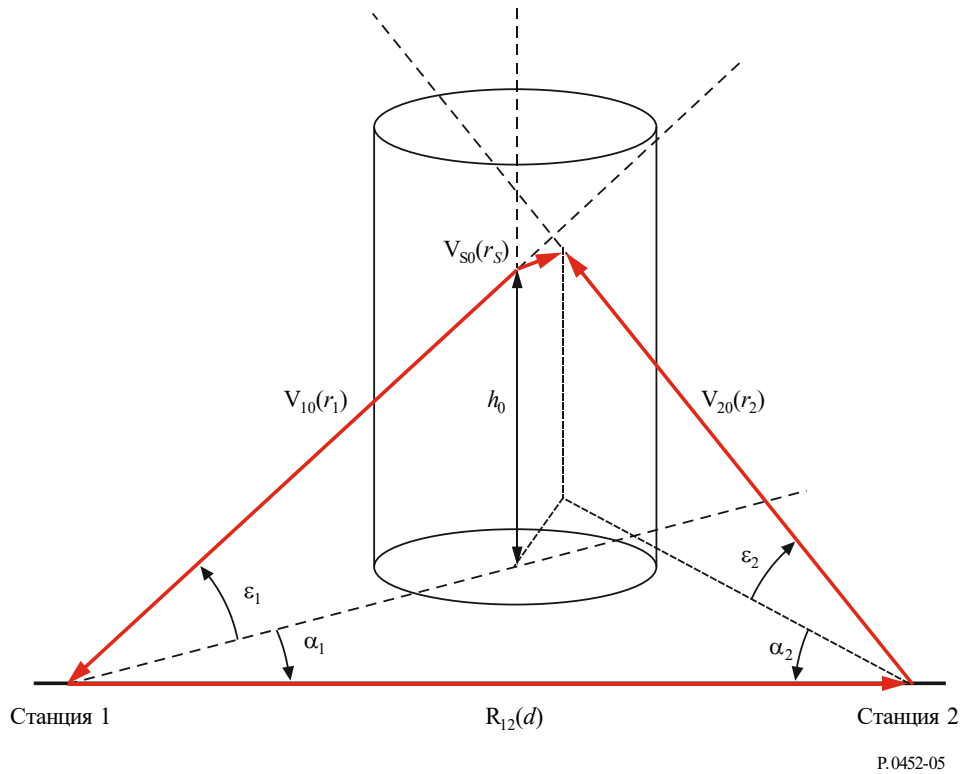
Вектор единичной длины представляется в общем случае символом \mathbf{V} , в то время как общий вектор (т.е. включающий абсолютную величину вектора) представляется другим соответствующим символом, например \mathbf{R} .

Базовая геометрия для рассеяния в дожде схематически показана на рисунке 5 для общего случая бокового рассеяния, когда оси двух главных лепестков в действительности не пересекаются. Другими словами, в данном примере показана связь бокового лепестка с главным лепестком. Трасса действия помех может проходить в направлении от боковых лепестков Станции 2 в главный лепесток Станции 1 или наоборот.

РИСУНОК 5

Схематическая геометрия рассеяния в дожде для общего случая бокового рассеяния

(Отметим, что в этом примере лучи антенн не совпадают и "угол между максимумами диаграмм направленности" не равен нулю – см. уравнения (89) и (90))



P.0452-05

Центр очага дождя расположен вдоль оси главного лепестка антенны Станции 1 в точке максимального сближения между лепестками двух антенн. Геометрия в векторной записи строится следующим образом.

Вектор от Станции 1 к Станции 2 определяется как:

$$\mathbf{R}_{12} = \begin{bmatrix} d \\ 0 \\ h_2 \end{bmatrix} \quad \text{км.} \quad (88)$$

Векторы \mathbf{R}_{12} , $r_2\mathbf{V}_{20}$, $r_s\mathbf{V}_{s0}$ и $r_1\mathbf{V}_{10}$ образуют замкнутый трехмерный многоугольник, с вектором \mathbf{V}_{s0} , перпендикулярным как \mathbf{V}_{10} , так и \mathbf{V}_{20} . В показанном на рисунке 5 примере вектор \mathbf{V}_{s0} направлен внутрь страницы.

Принимая во внимание кривизну Земли, рассчитаем вектор единичной длины \mathbf{V}_{10} в направлении главного луча антенны Станции 1:

$$\mathbf{V}_{10} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_1 \cos \alpha_1 \\ -\cos \varepsilon_1 \sin \alpha_1 \\ \sin \varepsilon_1 \end{bmatrix} \quad (89)$$

и вектор единичной длины \mathbf{V}_{20} в направлении главного луча антенны Станции 2:

$$\mathbf{V}_{20} = \begin{bmatrix} \sin \varepsilon_{2_loc} \sin \delta - \cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \cos \delta \\ \cos \varepsilon_{2_loc} \sin \alpha_{2_loc} \\ \sin \varepsilon_{2_loc} \cos \delta + \cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \sin \delta \end{bmatrix}. \quad (90)$$

В этом методе используется скалярное произведение двух векторов, которое записывается и вычисляется как:

$$\mathbf{V}_1 \cdot \mathbf{V}_2 = x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2,$$

где:

$$\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}.$$

Угол рассеяния φ_S , т. е. угол между лепестками двух антенн, определяется из скалярного произведения двух векторов \mathbf{V}_{10} и \mathbf{V}_{20} :

$$\varphi_S = \arccos(-\mathbf{V}_{20} \cdot \mathbf{V}_{10}). \quad (91)$$

Если $\varphi_S < 0,001$ рад, то в этом случае лучи двух антенн приблизительно параллельны и можно предположить, что любое взаимодействие при рассеянии в дожде будет пренебрежимо малым.

Как указано на рисунке 5, четыре вектора \mathbf{R}_{12} , $r_2 \mathbf{V}_{20}$, $r_S \mathbf{V}_{S0}$ и $r_1 \mathbf{V}_{10}$ образуют замкнутый трехмерный многоугольник, т. е.:

$$\mathbf{R}_{12} + r_2 \mathbf{V}_{20} - r_S \mathbf{V}_{S0} - r_1 \mathbf{V}_{10} = 0 \quad (92)$$

и это уравнение может быть решено в отношении расстояний r_i . В этом методе используется векторное произведение двух векторов, которое записывается и вычисляется, как указано ниже. Векторное (или перекрестное) произведение равно:

$$\mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} y_1 z_2 - z_1 y_2 \\ z_1 x_2 - x_1 z_2 \\ x_1 y_2 - y_1 x_2 \end{bmatrix}.$$

Вектор единичной длины \mathbf{V}_{S0} , перпендикулярный лучам обеих антенн, вычисляется из векторного произведения $\mathbf{V}_{20} \times \mathbf{V}_{10}$:

$$\mathbf{V}_{S0} = \frac{\mathbf{V}_{20} \times \mathbf{V}_{10}}{\sin \varphi_S}. \quad (93)$$

Уравнение (92) можно теперь решить с использованием определителя трех векторов, который записывается и вычисляется следующим образом:

$$\det[\mathbf{V}_1 \quad \mathbf{V}_2 \quad \mathbf{V}_3] = \det \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} = x_1(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_2(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_2 - y_2 z_1).$$

Рассчитаем расстояние между двумя лучами при их максимальном сближении:

$$r_S = \frac{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{R}_{12}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{S0}]}. \quad (94)$$

Расстояние по наклонной трассе, r_1 , от Станции 1 вдоль ее главного луча до точки максимального сближения с главным лучом Станции 2 равно:

$$r_1 = \frac{\det[\mathbf{R}_{12} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{S0}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{S0}]}, \quad (95)$$

в то время как соответствующее расстояние по наклонной трассе, r_2 , от Станции 2 вдоль ее главного луча до точки максимального сближения с главным лучом Станции 1 (отмечая одинарный минус) равно:

$$r_2 = \frac{-\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{R}_{12} \quad \mathbf{V}_{s0}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{s0}]} \quad (96)$$

Рассчитаем внеосевой угол "между максимумами диаграмм направленности", ψ_1 , на Станции 1 в точке максимального сближения с осью главного луча Станции 2:

$$\Psi_1 = \arctan\left(\frac{|r_s|}{r_1}\right) \quad (97)$$

и соответствующий внеосевой угол "между максимумами диаграмм направленности", ψ_2 , на Станции 2 в точке максимального сближения с осью главного луча Станции 1:

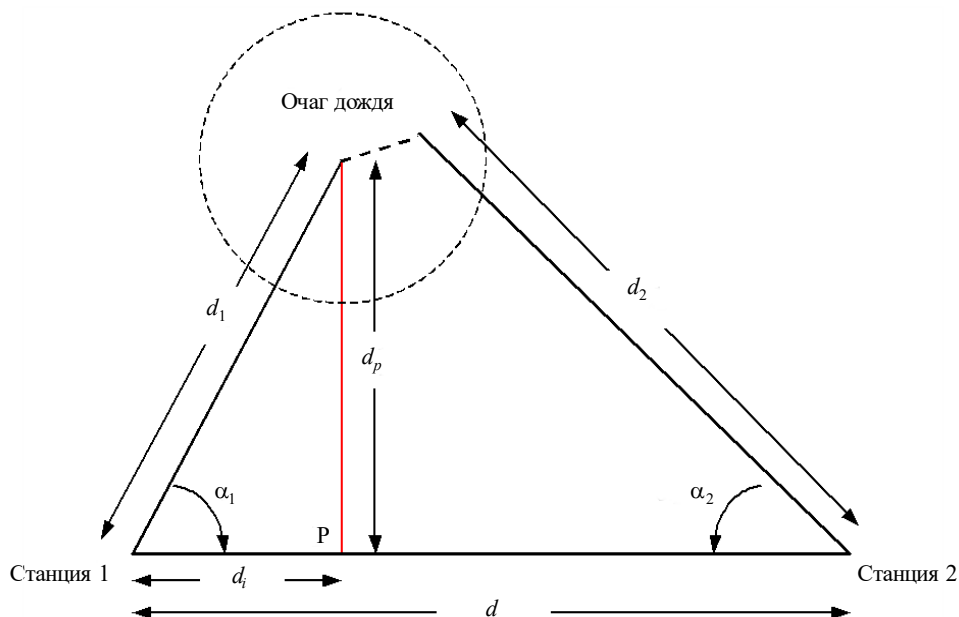
$$\Psi_2 = \arctan\left(\frac{|r_s|}{r_2}\right) \quad (98)$$

На основании этих параметров определяем, имеется ли связь между главными лепестками антенн двух станций. Для того чтобы в этом случае была связь между главными лепестками антенн, угол "между максимумами диаграмм направленности" должен быть меньше ширины диаграммы направленности по уровню 3 дБ соответствующей антенны. Для углов "между максимумами диаграмм направленности", превышающих эту величину, связь между главными лепестками антенн будет весьма небольшой или будет вообще отсутствовать, и на трассу передачи влияние в основном будет оказываться за счет связи между боковым и главным лепестками. Если это так, то следует изучить две возможности – с центром очага дождя, расположенным вдоль оси главного лепестка каждой антенны по очереди, и с наименьшими потерями передачи, взятыми для представления ситуации наихудшего случая. Поскольку задаваемое по умолчанию расположение очага дождя соответствует точке наибольшего сближения вдоль оси главного лепестка Станции 1, эту задачу можно легко решить путем замены параметров Станции 2 на параметры Станции 1 и наоборот.

В заключение необходимо также определить горизонтальные проекции различных вычисленных выше расстояний, на основании которых можно определить расположение очага дождя. На рисунке 6 показана горизонтальная проекция для общего случая бокового рассеяния.

РИСУНОК 6

Вид в плане на геометрию для бокового рассеяния



Рассчитаем горизонтальное расстояние от Станции 1 до центра очага дождя, определяемого как точка на земной поверхности, расположенная непосредственно под точкой максимального сближения на оси главного лепестка Станции 1:

$$d_1 = r_1 \cos \varepsilon_1 \quad \text{км} \quad (99)$$

и соответствующее горизонтальное расстояние от Станции 2 до проекции на земную плоскость ее точки максимального сближения:

$$d_2 = r_2 \cos \varepsilon_2 \quad \text{км.} \quad (100)$$

Высота над землей точки максимального сближения на оси главного лепестка антенны Станции 1 равна:

$$h_0 = |r_1| \sin \varepsilon_1 \quad \text{км,} \quad (101)$$

тогда как для случаев отсутствия связи между главными лепестками высота точки максимального сближения на оси главного лепестка антенны Станции 2 равна:

$$h_{1,2_0} = |r_{1,2}| \sin \varepsilon_{1,2} - h_{c1,2} \quad \text{км.} \quad (102)$$

Параметры высоты, связанные с очагом дождя, должны корректироваться для любого смещения относительно трассы по дуге большого круга в случае бокового рассеяния. Расстояние от трассы по дуге большого круга между двумя станциями равно:

$$d_p = d_1 \sin \alpha_1, \quad (103)$$

и в этом случае угловое разнесение составляет:

$$\delta_p = \frac{d_p}{r_{eff}} \quad \text{км.} \quad (104)$$

Теперь определим поправку на боковое рассеяние:

$$h_{c1,2} = (r_{eff} + h_{1,2}) \left(\frac{1}{\cos(\delta_p)} - 1 \right) \quad \text{км.} \quad (105)$$

Отметим, что эта поправка должна также применяться к другим параметрам, связанным с очагом дождя, т. е. к высоте слоя дождя, h_R , и верхнему пределу интегрирования, h_{top} , и, кроме того, при определении ослабления в газах (см. шаг 8), для чего требуется использование местных параметров.

Тем самым установлены основные статические геометрические параметры для определения местоположения очага дождя по отношению к станциям и для вычисления потерь передачи из-за рассеяния в дожде. Теперь необходимо рассмотреть геометрию для элемента интегрирования, который может находиться в любом месте очага дождя, вплоть до заранее определенного верхнего предела интегрирования, h , в целях определения значений усиления антенн в каждой точке в пределах очага дождя и уровней ослабления на трассе в пределах очага дождя в направлении на каждую станцию. Для осуществления этой задачи система координат меняется на цилиндрические координаты (r, φ, h) , центр которых расположен в очаге дождя.

Шаг 4. Определение геометрии для значений усиления антенн

Для вычисления усиления каждой антенны в элементе интегрирования с координатами (r, φ, h) , используя соответствующую диаграмму направленности антенны, а также уровней ослабления на трассе в пределах очага дождя, необходимо рассчитать угол отклонения от опорной оси в направлении на элемент интегрирования и длины трасс от элемента интегрирования до края очага дождя в направлении на каждую станцию. На рисунке 7 показана геометрия, в которой точка А представляет произвольный элемент интегрирования с координатами (r, φ, h) , а точка В является проекцией этой точки на плоскость земли. Вид в плане на это геометрическое построение показан на рисунке 8.

РИСУНОК 7

Геометрия для определения значений усиления антенн и уровня ослабления на трассе в пределах очага дождя

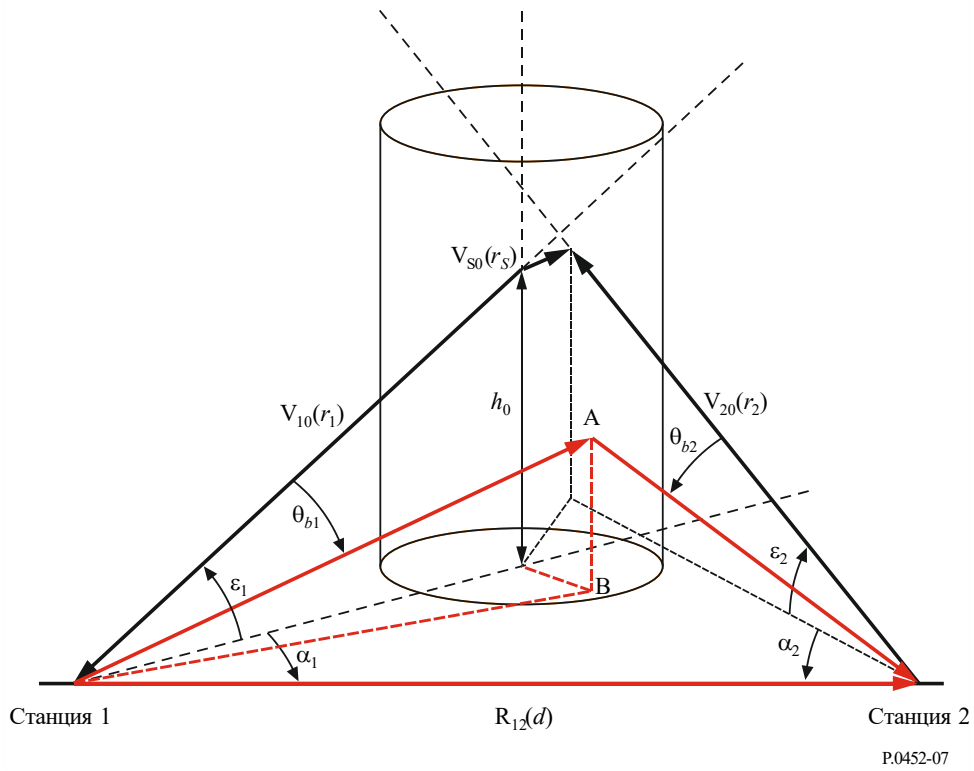
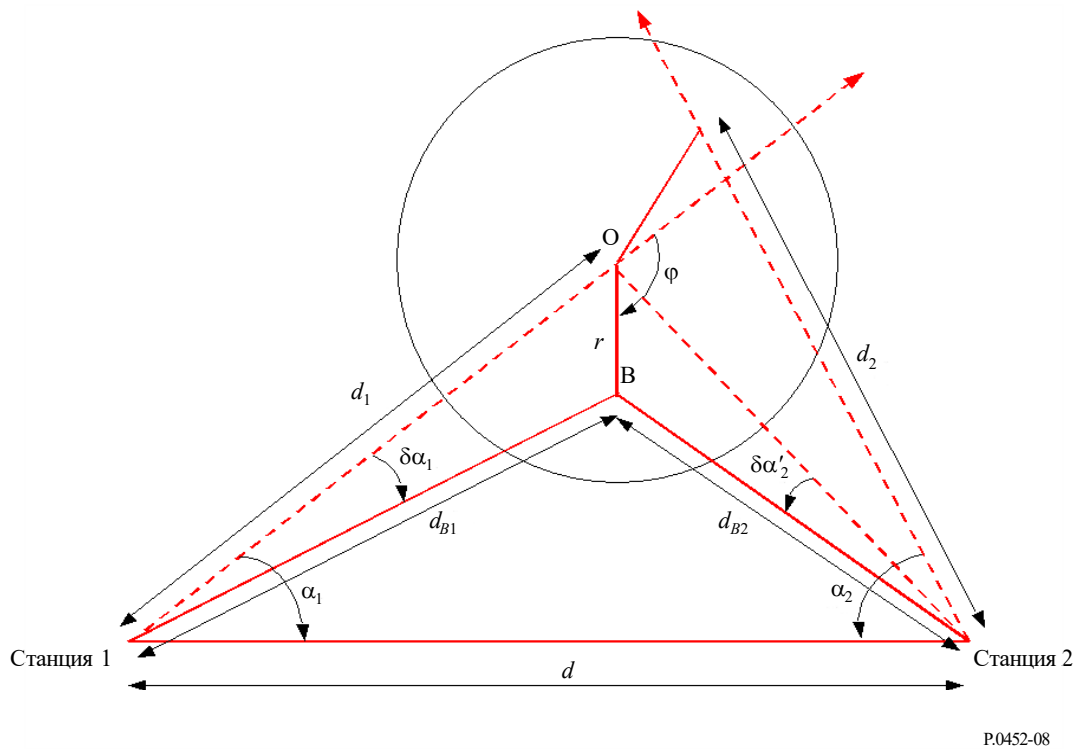


РИСУНОК 8

Вид в плане на геометрию для определения значений усиления антенн



Рассчитаем горизонтальное расстояние от Станции 1 до точки В:

$$d_{B1} = \sqrt{r^2 + d_1^2 + 2rd_1 \cos\varphi} \quad \text{км} \quad (106)$$

и угол между этой трассой и горизонтальной проекцией оси главного лепестка антенны Станции 1:

$$\delta\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{r \sin\varphi}{d_{B1}}\right). \quad (107)$$

Угол места точки А от Станции 1 указывается как:

$$\varepsilon_{A1} = \arctan\left(\frac{h}{d_{B1}}\right). \quad (108)$$

Вектор единичной длины от Станции 1 до точки А определяется как:

$$\mathbf{V}_{A1} = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_{A1} \cos(\alpha_1 - \delta\alpha_1) \\ -\cos\varepsilon_{A1} \sin(\alpha_1 - \delta\alpha_1) \\ \sin\varepsilon_{A1} \end{bmatrix}. \quad (109)$$

Определяем угол отклонения от опорной оси антенны в направлении точки (r, φ, h) для антенны Станции 1:

$$\theta_{b1} = \arccos(\mathbf{V}_{A1} \cdot \mathbf{V}_{10}). \quad (110)$$

Расстояние от Станции 1 до точки А составляет:

$$r_{A1} = \frac{d_{B1}}{\cos\varepsilon_{A1}} \quad \text{км}, \quad (111)$$

и отмечая, что векторы \mathbf{R}_{12} , \mathbf{R}_{A2} и $\mathbf{R}_{A1} = r_{A1}\mathbf{V}_{A1}$ образуют замкнутый треугольник, вектор от Станции 2 в направлении точки А с координатами (r, φ, h) можно определить из:

$$\mathbf{R}_{A2} = \mathbf{R}_{12} - r_{A1}\mathbf{V}_{A1} \quad \text{км}. \quad (112)$$

Расстояние от Станции 2 до точки А затем вычисляется из:

$$r_{A2} = |\mathbf{R}_{A2}| \quad \text{км}, \quad (113)$$

в то время как единичный вектор от Станции 1 в направлении элемента интегрирования составляет:

$$\mathbf{V}_{A2} = \frac{\mathbf{R}_{A2}}{r_{A2}}. \quad (114)$$

Далее определяем угол отклонения от опорной оси антенны Станции 2 в направлении элемента интегрирования в точке А с координатами (r, φ, h) :

$$\theta_{b2} = \arccos(-\mathbf{V}_{A2} \cdot \mathbf{V}_{20}). \quad (115)$$

Указанный выше метод определения значений усиления антенн относится только к круговым антеннам. В случае если антенна Станции 1 будет секторной или всенаправленной, как имеет место, например, в радиовещательных системах пункт-многие пункты, для определения усиления антенны используется несколько отличающийся метод, в котором усиление меняется только в вертикальном направлении (в пределах зоны, охватываемой очагом дождя). В этом случае угол отклонения от опорной оси в вертикальном направлении определяется просто из:

$$\theta_{b1} = |\varepsilon_{A1} - \varepsilon_1|. \quad (116)$$

Аналогичным образом, если антенна Станции 2 является секторной или всенаправленной, угол отклонения от опорной оси в вертикальном направлении определяется из:

$$\theta_{b2} = |\varepsilon_{A2} - \varepsilon_2|, \quad (117)$$

где:

$$\varepsilon_{A2} = \arctan\left(\frac{h}{d_{B2}}\right) \quad (118)$$

и

$$d_{B2} = \sqrt{d^2 + d_{B1}^2 - 2d \cdot d_{B1} \cos(\alpha_1 - \delta\alpha_1)} \quad \text{км.} \quad (119)$$

Необходимо помнить, что углы отклонения от опорной оси обычно указываются в градусах, когда используются для типовых диаграмм направленности антенн, тогда как тригонометрические функции в большинстве программных пакетов обычно вычисляются в радианах. Поэтому прежде чем эти углы использовать в процедурах интегрирования, необходимо, как правило, выполнить простое преобразование из радиан в градусы.

После этого значения усиления антенны можно получить из диаграммы направленности антенны, из максимального усиления антенны и из угла отклонения от опорной оси антенны, который является функцией местоположения в пределах очага дождя. По умолчанию могут использоваться диаграммы направленности согласно Рекомендации МСЭ-R P.620 (также МСЭ-R F.699) или МСЭ-R F.1245, при этом отмечается, что в последней боковые лепестки имеют более низкие уровни. Заметим, что для целей интегрирования требуются значения усиления в линейных единицах.

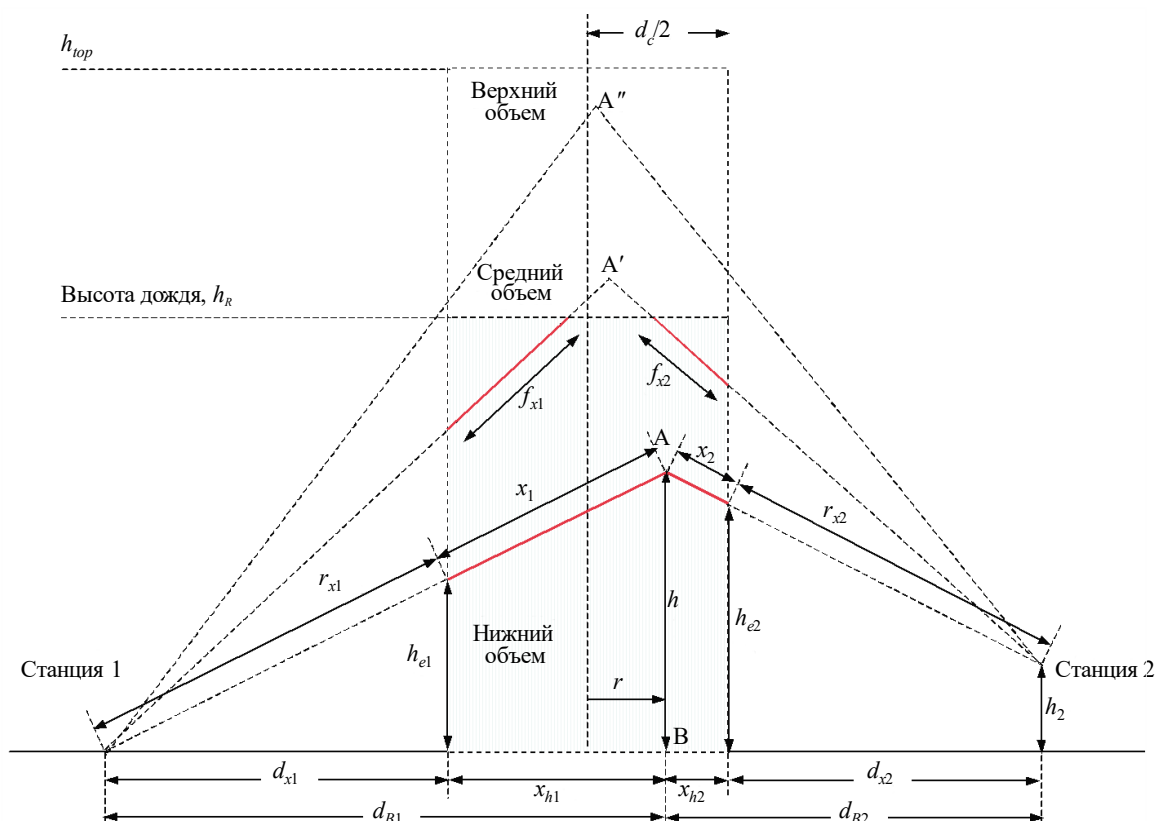
Шаг 5. Определение длин трасс в пределах очага дождя

Теперь определим потери на трассе в элементе интегрирования в направлении на каждую станцию, A_1 и A_2 , которые зависят от длины трассы и от положения в пределах очага дождя.

Очаг дождя разбивается на три объема, как показано на рисунке 9. В нижнем объеме эффективная площадь рассеяния постоянна по всему очагу дождя и определяется коэффициентом отражения радара, Z_R , на уровне земли при $\zeta(h) = 1$. Трассы в пределах очага дождя в направлении на каждую станцию, x_1 и x_2 , подвержены влиянию ослабления в дожде. В среднем объеме элемент интегрирования расположен выше высоты слоя дождя, а эффективная площадь рассеяния уменьшается как функция высоты над слоем дождя со скоростью $-6,5$ дБ/км. Однако какая-то часть f каждой трассы все же пересекает очаг дождя ниже высоты слоя дождя, в зависимости от геометрии, и поэтому такие трассы подвергаются воздействию дополнительного ослабления в дожде вдоль тех участков длины трассы, $f_{x_{1,2}}$, которые пересекают очаг дождя. В верхнем объеме элемент интегрирования расположен выше слоя дождя и ни одна из частей трасс не пересекает очаг дождя ниже высоты слоя дождя. Поэтому на такие трассы ослабление в дожде не оказывает влияния.

Длины трасс в этих объемах определяются теперь следующим образом.

РИСУНОК 9
Объемы интегрирования в пределах очага дождя



P.0452-09

Нижний объем

В нижнем объеме элемент интегрирования всегда находится ниже высоты слоя дождя, h_R , и все трассы в пределах очага дождя подвержены влиянию ослабления в дожде, т. е.:

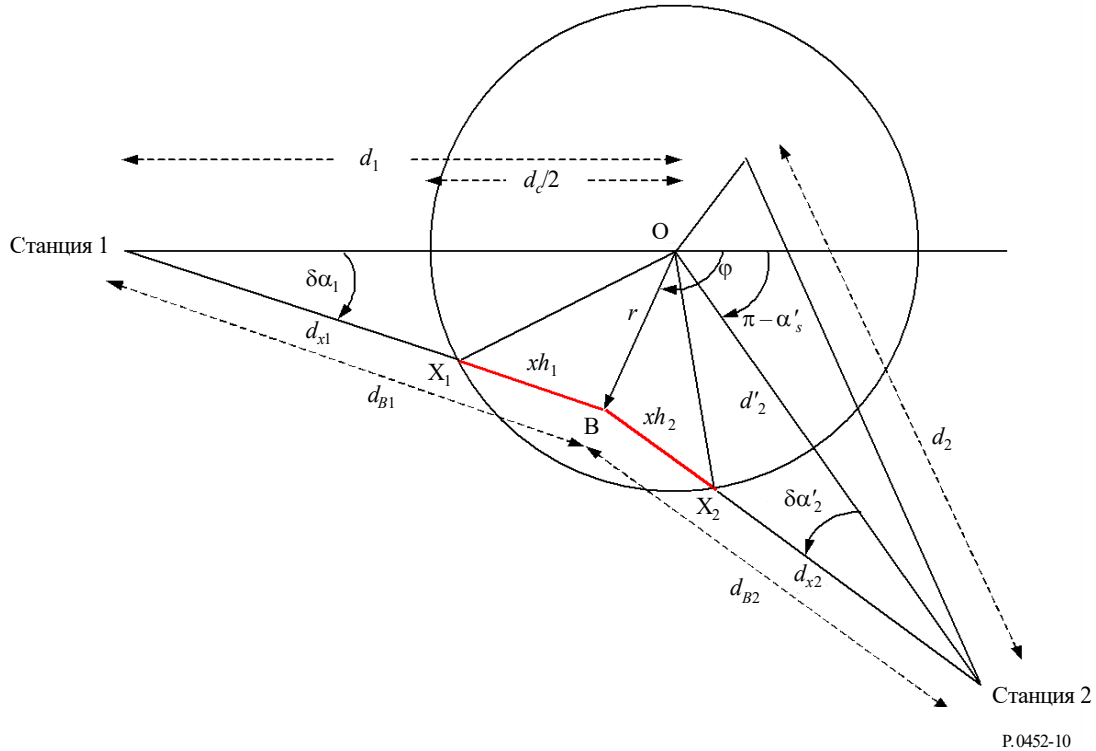
$$A_{1,2} = \gamma_{R1,2} x_{1,2} \quad \text{дБ}, \quad (120)$$

где $\gamma_{R1,2} = k_{1,2} R^{\alpha_{1,2}}$ – это погонное ослабление в дожде (дБ/км), а коэффициенты $k_{1,2}$ и $\alpha_{1,2}$ определяются как функции частоты f , поляризации τ и угла места $\varepsilon_{1,2}$ трассы в Рекомендации МСЭ-R P.838. Отметим, что погонное ослабление в дожде зависит от угла места трассы и в принципе должно рассчитываться для каждого элемента интегрирования для каждого значения координат (r, φ, h) . Однако изменение в зависимости от угла места невелико и достаточно определить значения для γ_R только один раз для трасс в направлении каждой станции, основываясь на соответствующих углах места антенн.

Длины трасс r_{x1} , r_{x2} , x_1 и x_2 определяются из геометрических построений следующим образом. На рисунке 10 показан вид в горизонтальной плоскости через проекцию элемента интегрирования А в точке В на плоскости земли. Для данного расчета предполагается, что скорректированная высота h_2 Станции 2 первоначально равна нулю. Это обстоятельство учитывается далее.

РИСУНОК 10

Вид в плане на геометрические построения при рассеянии в элементе интегрирования



Рассчитаем горизонтальное расстояние d_{x1} от Станции 1 до края очага дождя (точка X_1) с использованием теоремы косинусов (вводя отрицательный знак, поскольку это ближайший край):

$$d_{x1} = d_1 \cos \delta \alpha_1 - \sqrt{d_1^2 \cos^2 \delta \alpha_1 - d_1^2 + \left(\frac{d_c}{2}\right)^2} \quad \text{км.} \quad (121)$$

Расстояние по наклонной трассе до края очага дождя в этом случае составляет:

$$r_{x1} = \frac{d_{x1}}{\cos \varepsilon_{A1}} \quad \text{км.} \quad (122)$$

Определяем угол смещения элемента интегрирования в точке А для Станции 2:

$$\delta \alpha_2 = \arctan \left(\frac{-r \sin(\varphi + \alpha'_s)}{d'_2 + r \cos(\varphi + \alpha'_s)} \right), \quad (123)$$

где α'_s указывается по формуле:

$$\alpha'_s = \arcsin \left(\frac{d}{d'_2} \sin \alpha_1 \right) \quad (124)$$

и

$$d'_2 = \sqrt{d^2 + d_1^2 - 2d \cdot d_1 \cos \alpha_1} \quad \text{км.} \quad (125)$$

Затем горизонтальное расстояние d_{x2} определяется из теоремы косинусов:

$$d_{x2} = d'_2 \cos \delta \alpha'_2 - \sqrt{\left(\frac{d_c}{2}\right)^2 - d_2'^2 \sin^2 \delta \alpha'_2} \quad \text{км.} \quad (126)$$

Рассчитаем расстояние от Станции 2 до края очага дождя:

$$r_{x2} = \frac{d_{x2}}{\cos \varepsilon_{A2}} \quad \text{км.} \quad (127)$$

Теперь необходимо рассмотреть два случая.

Случай 1. Когда Станция 1 расположена вне очага дождя, т. е. когда $d_1 > d_c/2$. В этом случае только часть трассы от элемента интегрирования А до Станции 1 будет находиться в пределах очага дождя и, следовательно, подвергаться ослаблению.

Случай 2. Когда угол места очень большой и Станция 1 расположена в пределах очага дождя, т. е. когда $d_1 \leq d_c/2$. В этом случае вся трасса вплоть до высоты слоя дождя будет всегда находиться в пределах очага дождя и таким образом испытывать ослабление.

Длина трассы x_1 для расчета ослабления вдоль трассы по направлению к Станции 1 определяется из следующего выражения:

$$x_1 = \begin{cases} r_{A1} - r_{x1}, & \text{если } d_1 > \frac{d_c}{2}; \\ r_{A1}, & \text{если } d_1 \leq \frac{d_c}{2} \end{cases} \quad \text{км} \quad (128)$$

и длина трассы x_2 для расчета ослабления вдоль трассы по направлению к Станции 2 определяется из:

$$x_2 = \begin{cases} r_{A2} - r_{x2}, & \text{если } d_2 > \frac{d_c}{2}; \\ r_{A2}, & \text{если } d_2 \leq \frac{d_c}{2} \end{cases} \quad \text{км.} \quad (129)$$

Таким образом, для случаев, когда элемент интегрирования находится ниже высоты слоя дождя, ослабление при прохождении через очаг дождя можно определить в линейных единицах из выражения:

$$A_b = \exp[-k(\gamma_{R1}x_1 + \gamma_{R2}x_2)], \quad \text{если } h \leq h_R, \quad (130)$$

где:

$$k = 0,23026 - \text{константа для перевода ослабления из дБ в неперы.}$$

Средний и верхний объемы

В этих объемах элемент интегрирования находится выше высоты слоя дождя, h_R , но некоторые участки трасс в направлении на каждую из станций могут проходить через очаг дождя на высоте ниже h_R . Это явление будет наблюдаться только в случаях, когда углы места элемента интегрирования А, $\varepsilon_{A1,2}$, меньше углов $\varepsilon_{C1,2}$, образуемых на каждой станции ближайшим верхним углом очага дождя, т. е. если:

$$\varepsilon_{A1} < \varepsilon_{C1} = \arctan\left(\frac{h_R}{d_{x1}}\right)$$

и

$$\varepsilon_{A2} < \varepsilon_{C2} = \arctan\left(\frac{h_R - h_2}{d_{x2}}\right).$$

В таких случаях должно учитываться результирующее ослабление. Это особенно важно для случая 2, выше, когда одна из антенн имеет очень большой угол места и станция расположена в пределах очага дождя.

На основании рисунка 9 высоты, на которых лучи от элемента интегрирования в точке А проходят через края очага дождя, можно определить из отношений горизонтальных расстояний от каждой станции до края очага дождя и до точки В:

$$\begin{aligned} h_{e1} &= h \cdot \frac{d_{x1}}{d_{B1}}; \\ h_{e2} &= (h - h_2) \cdot \frac{d_{x2}}{d_{B2}} + h_2 \end{aligned} \quad \text{км.} \quad (131)$$

Участки длины трасс $f_{x1,2}$, которые приходятся на очаг дождя, можно определить из отношений:

$$f_{x1,2} = \begin{cases} x_{1,2} \left(\frac{h_R - h_{e1,2}}{h - h_{e1,2}} \right), & \text{если } h > h_R > h_{e1,2} \text{ и } \varepsilon_{A1,2} < \varepsilon_{C1,2}; \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad \text{км.} \quad (132)$$

В заключение рассчитаем ослабление в линейных единицах для случаев, когда элемент интегрирования находится выше высоты слоя дождя, h_R :

$$A = \exp \left[-k \left\{ 6,5(h - h_R) + \gamma_{R1} f_{x1} + \gamma_{R2} f_{x2} \right\} \right] \quad \text{для } h \geq h_R. \quad (133)$$

Этот шаг далее определяет подынтегральное выражение для передаточной функции рассеяния.

Шаг 6. Ослабление вне очага дождя

В используемой здесь структуре дождь ограничивается только границами очага дождя с диаметром d_c , определяемым из геометрии согласно шагу 2, а интенсивность дождевых осадков считается одинаковой в пределах очага дождя. В общем случае дождь будет распространяться и за пределы этой области, причем интенсивность его уменьшается по мере увеличения расстояния от центра очага, и это следует учитывать. Однако если станция расположена внутри очага дождя, то для такой станции внешнее ослабление за счет дождя приниматься во внимание не будет. Кроме того, если элемент интегрирования находится достаточно высоко над слоем дождя, так что никакая часть трассы до любой из станций не проходит через очаг дождя, в этом случае внешнее ослабление вдоль такой трассы не учитывается.

В качестве приближения предполагается, что интенсивность дождя вне очага осадков снижается при увеличении масштабируемого расстояния, определяемого как:

$$r_m = 600R^{-0,5} 10^{-(R+1)^{0,19}} \quad \text{км.} \quad (134)$$

Для случая рассеяния ниже высоты слоя дождя рассчитаем ослабление вне очага дождя, используя следующее выражение:

$$A_{ext1,2} = \begin{cases} \frac{\gamma_{R1,2} r_m}{\cos \varepsilon_{A1,2}} \left[1 - \exp \left(-\frac{d_{x1,2}}{r_m} \right) \right], & \text{если } d_{1,2} > \frac{d_c}{2} \text{ и } f_{x1,2} \neq 0; \\ 0, & \text{если } d_{1,2} \leq \frac{d_c}{2} \text{ или } f_{x1,2} = 0 \end{cases} \quad \text{дБ,} \quad (135)$$

т. е. ослабление вдоль любой трассы принимается равным нулю, если соответствующая станция расположена в пределах очага дождя ($d_1 \leq d_c/2$) или если элемент интегрирования находится над очагом дождя и никакая часть трассы не проходит через очаг дождя, и это определяется тем, равны ли нулю участки трасс $f_{x1,2}$.

Шаг 7. Численное интегрирование передаточной функции рассеяния

Интегрирование делится на две части, а именно для рассеяния ниже высоты слоя дождя и для рассеяния выше высоты слоя дождя:

$$C_b = \int_{h_{\min}}^{h_R} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \exp[-k(\gamma_{R1} x_1 + \gamma_{R2} x_2 + A_{ext1} + A_{ext2})] \cdot r dr d\varphi dh; \quad (136)$$

$$C_a = \int_{h_R}^{h_{\text{top}}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \exp[-k(6,5(h - h_R) + \gamma_{R1} f_{x1} + \gamma_{R2} f_{x2} + A_{ext1} + A_{ext2})] \cdot r dr d\varphi dh, \quad (137)$$

где значения усиления антенн указываются в линейных единицах как функции углов отклонения от опорной оси, $\theta_{b1,2}(r, \varphi, h)$ и где:

$$r_{A1,2}(r, h, \varphi) = \sqrt{(r \cos \varphi - d_{1,2})^2 + r^2 \sin^2 \varphi + (h - h_{1,2})^2} \quad \text{км} \quad (137a)$$

Интегрирование в цилиндрических координатах осуществляется по диапазонам значений: для r от 0 до радиуса очага дождя, $d_c/2$, и для φ от 0 до 2π . Некоторые ограничения могут налагаться на третью переменную интегрирования, h , – высоту в пределах очага дождя. Минимальная высота, h_{\min} , определяется видимостью очага дождя от каждой из станций.

Если вблизи любой из станций будет иметь место экранирование местностью, то рассеяние от высот в пределах очага дождя, которые не видны со стороны любой из станций, следует исключить из интегрирования. Таким образом, минимальная высота для интегрирования может быть определена исходя из углов горизонта для каждой станции как:

$$h_{\min} = \max(d_{x1} \tan \varepsilon_{H1}, d_{x2} \tan \varepsilon_{H2}) \quad \text{км.} \quad (138)$$

Отметим, что здесь используются локальные значения, поскольку любое соответствующее экранирование из-за кривизны Земли для нулевых значений угла места уже учтено при определении углов отклонения от опорной оси антенны.

Для сведения к минимуму требований к вычислениям можно определить максимальную высоту для процесса интегрирования, h_{top} , поскольку в общем случае нет необходимости интегрировать эффективную зону рассеяния на высотах, выше которых уровни боковых лепестков антенн существенно снижаются. По умолчанию предполагается, что высота, выше которой интегрирование можно закончить без потери точности, составляет 15 км.

Значения интенсивности поля антенн в ближней зоне сильно зависят от особенностей конкретного аппаратного обеспечения, а при проведении базового анализа помех данная информация может и не быть доступна. Поэтому целесообразно сделать допущение о том, что напряженность поля приблизительно соответствует порядку величины напряженности поля в начале дальней зоны. С учетом результатов фактических измерений значений напряженности в ближней зоне данное приближение представляется в принципе верным.

Процедура применения приближенного значения рассеянной мощности в ближней зоне является следующей:

- 1) определяем, находится ли радиус ближней зоны $d_{nf} = \frac{2cG}{\pi^2 f}$ приемника или передатчика в пределах радиуса очага дождя. Для этого должно выполняться условие $d_{1,2} + d_{nf} < d_c/2$. Если имеет место только частичное включение, при котором $d_{1,2} - d_{nf} < d_c/2$, то приближенно принимаем его за полное включение.
- 2) к процедуре интегрирования в уравнениях (136) и (137) применяем следующее условие:

$$\text{если } r_{A1,2} < r_{nf}, \quad \text{то } r_{A1,2} = r_{nf}.$$

Численное интегрирование. Существует множество методов численного интегрирования, а в многочисленных математических прикладных программах содержатся встроенные функции интегрирования, которыми можно эффективно пользоваться. В случаях когда пользователь желает разработать специализированный пакет программ на других языках программирования, оказались эффективными методы, основанные на приемах итеративного деления пополам (бисекции). Одним из таких приемов является метод Ромберга, который является вариацией высшего порядка основной формулы трапеций (т. е. формулы Симпсона) для интегрирования посредством последовательного деления пополам интервалов интегрирования.

В интегрировании Ромберга используется комбинация двух численных методов для расчета приближенного представления собственного интеграла, т. е.

$$I = \int_a^b y(x) dx.$$

Для расчета последовательности приближений к интегралу с интервалами между оценками функции, разделяемыми на два в промежутках между членами, применяется расширенная формула трапеций. В этом случае для экстраполяции этой последовательности до интервала нулевой длительности используется полиномиальная экстраполяция. Данный метод можно кратко описать с помощью цикла псевдокода:

Индекс = 1

WHILE (когда) *estimated_error* (ожидаемая погрешность) > *desired_error* (желаемая погрешность) DO (произведите действие)

S(Индекс) = Приближение по формуле трапеций с использованием интервалов $2^{\text{Индекс}}$

I = Полиномиальная экстраполяция значений *S*

Индекс = *Индекс* + 1

ENDWHILE (оператор END)

Расширенная формула трапеций

Приближение к интегралу можно получить путем линейной интерполяции между $N + 1$ равноотстоящих абсцисс (x_i, y_i) :

$$I \approx T^N = h(N) \left(\frac{1}{2} y_0 + y_1 + \dots + y_{N-1} + \frac{1}{2} y_N \right),$$

где:

$$h(N) = \frac{b-a}{N} : \text{интервал между абсциссами.}$$

Число интервалов можно удвоить посредством использования рекурсии:

$$T^{2N} = \frac{1}{2} T^N + h(2N) (y_1 + y_3 + \dots + y_{N-3} + y_{N-1}).$$

Метод Ромберга рекурсивно создает последовательность $S(i) = T^{2^i}$.

Полиномиальная экстраполяция. В пределе погрешность расширенного трапецеидального приближения к значению I представляет собой многочлен относительно h^2 , т. е.

$$I = T^N + \varepsilon^N,$$

где:

$$\varepsilon^N \cong P(h^2(N)),$$

и

P : неизвестный многочлен.

Последовательность трапецидальных приближений, $T^N = \varepsilon^N$, также является многочленом относительно h^2 , и поэтому полиномиальная экстраполяция может использоваться для оценки предела при $h \rightarrow 0$. Если имеются m трапецидальных приближений, то единственный многочлен степени $M-1$ может соответствовать точкам $(h^2(n), T^n)$ при $n = 1, 2, 4, 8, \dots, 2^{M-1}$. Оценка этого единственного многочлена при $h = 0$ дает приближение к пределу трапецидального метода.

Обычно для расчета значения многочлена при $h = 0$ используется метод Невилля. Метод Невилля является эффективным методом; он дает оценку погрешности, которая может использоваться для завершения интегрирования Ромберга. Этот метод является последовательным приближением линейной интерполяции к полиномиальной интерполяции Лагранжа высших степеней. Метод Лагранжа можно описать следующим образом. Для $M+1$ точек (x_i, y_i) многочлен степени m можно определить как линейную комбинацию базисных функций:

$$P(x) \equiv \sum_{i=0}^n y_i L_i(x_i) \equiv \sum_{i=0}^n y_i \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^n \frac{(x - x_k)}{(x_i - x_k)},$$

т. е.

$$L_i(x) = \frac{(x - x_0) \dots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \dots (x - x_n)}{(x_i - x_0) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n)}.$$

Чтобы найти решение при $x = 0$, данный метод интерполяции требует знания всех ординат y_i , и для решения масштабных задач он неэффективен, поскольку при итерации до высших порядков не использует прежние интерполяции. Метод Невилля представляет собой рекурсивный процесс, основанный на соотношении между одним приближением к многочлену и его двумя предыдущими приближениями. Таким образом, для любых двух точек (x_k, y_k) имеется единственный многочлен степени 0, т. е. прямая линия, проходящая через эти две точки, $P_k = y_k$. Затем выполняется вторая итерация, в которой многочлен соответствует парам точек, а именно P_{12}, P_{23}, \dots и эта процедура повторяется до построения пирамиды приближений:

$$\begin{array}{cccc} P_1 & & & \\ & P_{12} & & \\ P_2 & & P_{123} & \\ & P_{23} & & P_{1234} \\ P_3 & & P_{234} & \\ & P_{34} & & \\ P_4 & & & \end{array}$$

После этого окончательный результат можно представить как:

$$P_{i(i+1)\dots(i+m)} = \frac{(x - x_{i+m})P_{i(i+1)\dots(i+m-1)} + (x_i - x)P_{(i+1)(i+2)\dots(i+m)}}{x_i - x_{i+m}}.$$

Таким образом, метод Невилля – это рекурсивный процесс для построения пирамиды по столбцам при использовании эффективного метода расчетов.

На практике полиномиальная экстраполяция становится нестабильной, когда подгоняется большое число точек, и поэтому, как правило, при интегрировании Ромберга используется четвертая степень полиномиальной экстраполяции, подходящая для последних пяти трапецидальных приближений.

С помощью методов численного интегрирования, таких как методы, использующие приемы бисекции, итерация производится до тех пор, пока не будет достигнут критерий точности; в соответствии с этим методом итерация прекращается, когда разность между последовательными итерациями меньше, чем предварительно заданная доля предыдущего результата. Обычно эта доля лежит в пределах между 10^{-3} и 10^{-6} , причем последнее значение близко к возможностям 32-битовых процессоров. Следует проявлять осторожность при использовании больших значений за пределами этого диапазона, поскольку могут возрасти ошибки в величинах вычисленных потерь. В качестве общего руководства установлено, что хорошим компромиссом между точностью и скоростью вычислений является значение 10^{-4} .

Для проведения трехмерного интегрирования по объему в очаге дождя требуются три вложенных численных интегрирования, в цилиндрических координатах, например с внешним интегрированием по параметру высоты h . Для этого интегрирования требуется интеграл по азимутальному параметру φ при определенном значении h , который, в свою очередь, требует интеграла по параметру радиуса r для конкретных значений (h, φ) .

Следует отметить, что для достижения требуемой точности, как правило, необходимо выполнить множество итераций передаточной функции рассеяния, особенно в случаях, когда коэффициенты усиления антенн велики и произведения коэффициентов усиления могут колебаться по диаметру очага дождя на 60 дБ или более. Поэтому время вычисления может составлять множество десятков минут и даже часов для более крайних случаев, несмотря на применение быстродействующих процессоров.

Шаг 8. Определение других коэффициентов потерь

Рассчитаем отклонение от рэлеевского рассеяния, используя уравнение (76) для угла рассеяния φ_s , определяемого уравнением (91).

Рассчитаем ослабление вдоль трасс, обусловленное поглощением в атмосферных газах, с использованием данных Приложения 2 к Рекомендации МСЭ-R P.676 при выборе значений погонного ослабления γ_o и γ_w , а также эквивалентной высоты h_o и h_w для сухого воздуха и водяных паров соответственно. Уровни ослабления определяются с использованием следующих выражений для ослабления на трассе между двумя высотами над уровнем моря, причем верхний уровень высоты определяется высотой точки квазипересечения осей главных лепестков двух антенн. Этот метод является приближением, так как фактическое ослабление в газах колеблется для каждого элемента рассеяния в пределах объема рассеяния. Однако поскольку ослабление в газах – это, как правило, несущественная составляющая в общих потерях передачи, и ее изменчивость невелика по сравнению со значениями неопределенности других параметров, таких как уровни интенсивности дождевых осадков, высоты слоя дождя и геометрия самого очага дождя, такое упрощение считается допустимым. Рассматриваемый ниже метод позволяет получить оценки относительно ослабления в газах с достаточной для общей процедуры точностью.

Нижние уровни высоты для каждой станции определяются локальными значениями $h_{1_loc} = h_{2_loc}$. Верхний уровень высоты h_p – это высота точки квазипересечения с учетом кривизны Земли, т. е. локальное значение, вычисляемое из:

$$h_p = h_0 + \sqrt{d_1^2 + r_{eff}^2} - r_{eff} + h_c \quad \text{км.} \quad (139)$$

Для углов места от 5° до 90° ослабление между двумя высотами определяется из разности общих уровней ослабления на наклонной трассе от каждой высоты:

$$A_{o_i} = \frac{\gamma_o h_o - \gamma_o h_o \left[\exp\left(-\frac{h_{i_loc}}{h_o}\right) - \exp\left(-\frac{h_p}{h_o}\right) \right]}{\sin \varepsilon_{i_loc}} \quad \text{дБ;} \quad (140)$$

$$A_{w_i} = \frac{\gamma_w h_o - \gamma_w h_o \left[\exp\left(-\frac{h_{i_loc}}{h_w}\right) - \exp\left(-\frac{h_p}{h_w}\right) \right]}{\sin \varepsilon_{i_loc}} \quad \text{дБ,} \quad (141)$$

где индекс i относится к каждой из двух станций, а ε_{i_loc} – локальные углы места каждой антенны.

Плотность водяных паров, ρ , используемая для определения погонного ослабления γ_w , является гипотетическим значением для уровня моря, вычисляемым из значения для уровня земли на станциях (можно предположить, что эти значения одинаковы):

$$\rho = \rho_g \exp\left(\frac{h_{i_loc}}{2}\right) \quad \text{г/м}^3. \quad (142)$$

Для углов места от 0° до 5° необходимо учитывать явления рефракции. Углы места для верхней трассы определяются из:

$$\varepsilon'_{1,2} = \arccos\left(\frac{h_{1,2} + r_{eff}}{h_p + r_{eff}} \cos \varepsilon_{1,2_loc}\right). \quad (143)$$

Затем ослабление на трассе рассчитывается из следующих выражений.

Ослабление для сухого воздуха:

$$A_{o_i} = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[\frac{\sqrt{h_{i_loc} + r_{eff}} \cdot F\left(\tan \varepsilon_i \sqrt{\frac{h_{i_loc} + r_{eff}}{h_o}}\right) \exp\left(-\frac{h_{i_loc}}{h_o}\right)}{\cos \varepsilon_{i_loc}} - \frac{\sqrt{h_p + r_{eff}} \cdot F\left(\tan \varepsilon'_i \sqrt{\frac{h_p + r_{eff}}{h_o}}\right) \exp\left(-\frac{h_p}{h_o}\right)}{\cos \varepsilon'_i} \right] \quad \text{дБ} \quad (144)$$

и ослабление для водяных паров:

$$A_{w_i} = \gamma_w \sqrt{h_w} \left[\frac{\sqrt{h_{i_loc} + r_{eff}} \cdot F\left(\tan \varepsilon_i \sqrt{\frac{h_{i_loc} + r_{eff}}{h_w}}\right) \exp\left(-\frac{h_{i_loc}}{h_w}\right)}{\cos \varepsilon_{i_loc}} - \frac{\sqrt{h_p + r_{eff}} \cdot F\left(\tan \varepsilon'_i \sqrt{\frac{h_p + r_{eff}}{h_w}}\right) \exp\left(-\frac{h_p}{h_w}\right)}{\cos \varepsilon'_i} \right] \quad \text{дБ}, \quad (145)$$

где функция F определяется как

$$F(x) = \frac{1}{0,661x + 0,339 \sqrt{x^2 + 5,51}}. \quad (146)$$

Учитывается также любое соответствующее рассогласование по поляризации, M .

Шаг 9. Определение кумулятивного распределения потерь передачи

Для каждой пары значений интенсивности дождевых осадков и высоты слоя дождя рассчитываем потери передачи в соответствии с шагами 5–8, используя следующее выражение:

$$L = 178 - 10 \log N - 20 \log f - 10 \log Z_R - 10 \log (C_b + C_a) - 10 \log S + A_g - M \quad \text{дБ}. \quad (147)$$

После того как были рассчитаны все возможные комбинации значений интенсивности дождевых осадков и высоты слоя дождя, результирующие значения потерь передачи (дБ) округляются до ближайшего большего целого числа дБ (с использованием, например, функции *округления сверху*), а вероятности (в процентном выражении) всех тех комбинаций, которые приводят к одним и тем же потерям, суммируются для получения общей вероятности для каждого уровня потерь передачи.

Результирующая функция плотности вероятности далее преобразуется в соответствующее кумулятивное распределение потерь передачи путем суммирования процентов для возрастающих уровней потерь.

Прилагаемый документ 1 к Приложению 1

Радиометеорологические данные, необходимые для процедуры прогнозирования в условиях ясного неба

1 Введение

Процедуры прогнозирования в условиях ясного неба основываются на радиометеорологических данных, позволяющих учесть в прогнозах изменчивость основных местных метеорологических параметров. Эти данные представлены в виде карт, которые приводятся в настоящем Прилагаемом документе.

2 Карты изменения данных о рефракции радиоволн по вертикали и показатель рефракции вблизи поверхности

Для прогнозирования в глобальных масштабах радиометеорология трассы в условиях ясного неба описывается с точки зрения непрерывных (долгосрочных) механизмов помех с помощью среднегодового значения параметра ΔN (вертикальный градиент индекса рефракции на первом 1 км атмосферы), а с точки зрения аномальных (краткосрочных) механизмов – процентом времени, $\beta_0\%$, в течение которого градиент индекса рефракции в нижних слоях атмосферы остается ниже -100 N-единиц/км. Эти параметры составляют приемлемую основу, на которой построена модель механизмов распространения в условиях ясного неба, описанная в п. 2 Приложения 1. Значение среднего показателя рефракции на уровне моря, N_0 , используется для расчета модели тропосферного рассеяния.

В случае отсутствия местных измерений эти значения можно получить при помощи карт, которые входят в состав неотъемлемых цифровых продуктов, поставляемых вместе с данной Рекомендацией в Zip-файле [R-REC-P.452-17-202109-1!!ZIP-E.zip](#). Эти цифровые карты составлены на основе анализа глобального массива данных, полученных в результате наблюдений во время подъема радиозондов за 10 лет (1983–1992 гг.). Карты находятся соответственно в файлах DN50.txt и N050.txt. Данные представлены для значений долготы от 0° до 360° и широты от $+90^\circ$ до -90° с разрешением $1,5^\circ$ как по широте, так и по долготе. Данные используются совместно с сопутствующими файлами данных LAT.txt и LON.txt, в которых содержатся значения широты и долготы соответствующих записей (точек координат) в файлах DN50.txt и N050.txt. Для местоположений, не являющихся точками координат, данный параметр в желаемом местоположении можно получить, выполнив двухлинейную интерполяцию значений в четырех ближайших точках координат, как описано в Рекомендациях МСЭ-R P.1144.

Прилагаемый документ 2 к Приложению 1

Анализ профиля трассы

1 Введение

Для анализа профиля трассы необходимо знать высотный профиль местности над средним уровнем моря. В таблице 7 приведены необходимые для моделей распространения параметры, которые дает анализ профиля трассы.

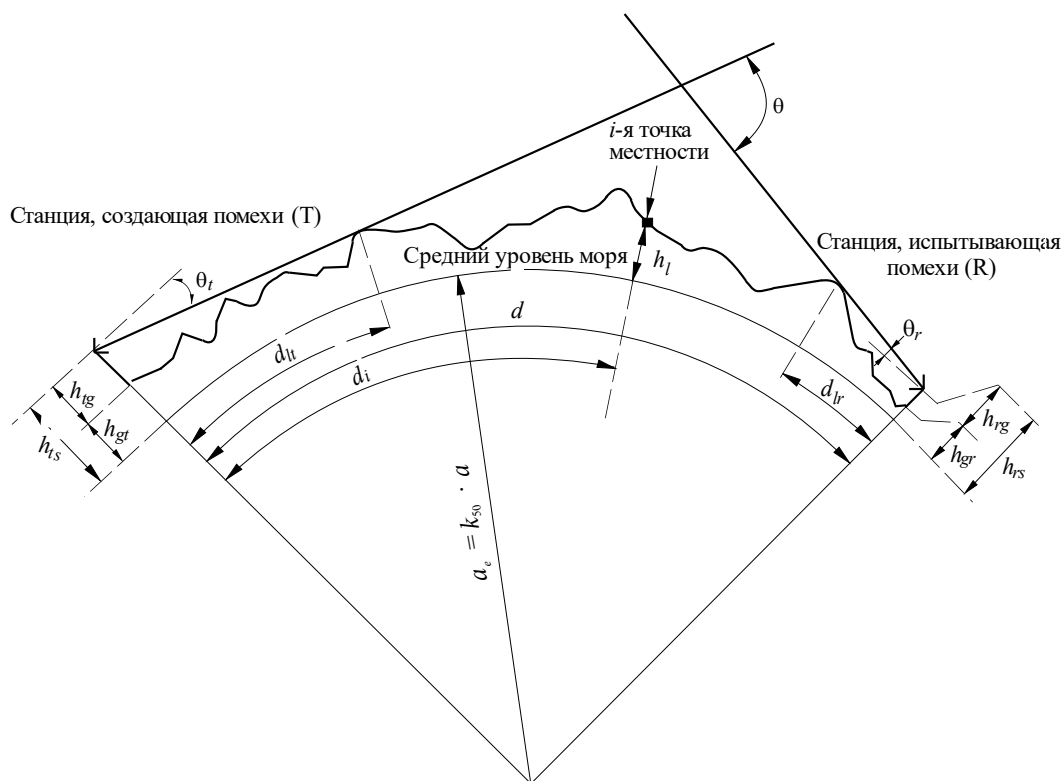
2 Построение профиля трассы

Основываясь на географических координатах станции, создающей помехи (φ_t, ψ_t), и станции, испытывающей эти помехи (φ_r, ψ_r), следует определить высоты местности (над средним уровнем моря) вдоль трассы по дуге большого круга, используя для этого топографическую базу данных или соответствующие крупномасштабные контурные карты. Расстояние между точками профиля должно, по мере возможности, захватывать основные черты местности. Как правило, подходят приращения расстояния между 30 м и 1 км. В целом целесообразно использовать приращение расстояний большей длины для более длинных трасс. Профиль должен включать в качестве начальной и конечной точки высоты над поверхностью земли станции, создающей помехи, и станции, испытывающей эти помехи. В представленных далее уравнениях при необходимости учитывается кривизна земной поверхности с помощью значения a_e , определяемого из уравнения (6а).

Хотя вариант с равноотстоящими точками профиля является предпочтительным, можно использовать и метод с неравноотстоящими точками профиля. Это может оказаться полезным, когда профиль берется из цифровой карты горизонталей высот. Вместе с тем следует отметить, что настоящая Рекомендация была разработана на основании испытаний с использованием равноотстоящих точек профиля; информация о влиянии неравноотстоящих точек на точность отсутствует.

В настоящей Рекомендации точка профиля, соответствующая высоте станции, создающей помехи, принята за нулевую точку, а точка, соответствующая станции, испытывающей помехи, – за n -ю. Таким образом, профиль состоит из $n + 1$ точки. На рисунке 11 дается пример высотного профиля местности над средним уровнем моря, показывающий различные связанные с реальной местностью параметры.

РИСУНОК 11
Пример профиля (загоризонтной) трассы



P.0452-11

Примечание к Рисунку 11. – Показанное значение угла θ , является отрицательным.

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

ТАБЛИЦА 7
Определение параметров профиля трассы

Параметр	Описание
a	Средний физический радиус Земли (6371 км)
a_e	Эквивалентный радиус Земли (км)
d	Расстояние на трассе по дуге большого круга (км)
d_i	Расстояние вдоль дуги большого круга от станции, создающей помехи, до i -й точки поверхности (км)
d_{ii}	Интервал приращения для регулярных данных профиля трассы (км)
f	Частота (ГГц)
λ	Длина волны (м)
h_{is}	Высота (м) антенны станции, создающей помехи, над средним уровнем моря (нсум)
h_{rs}	Высота (м) антенны станции, испытывающей помехи (нсум)
θ_i	Для загоризонтной трассы угол места по отношению к горизонту над местной горизонталью (мрад), измеренный со стороны антенны, создающей помехи. Для трассы прямой видимости это должен быть угол места, измеренный со стороны антенны, испытывающей помехи
θ_r	Для загоризонтной трассы угол места по отношению к горизонту над местной горизонталью (мрад), измеренный со стороны антенны, испытывающей помехи. Для трассы прямой видимости это должен быть угол места, измеренный со стороны антенны, создающей помехи

ТАБЛИЦА 7 (окончание)

Параметр	Описание
θ	Угловое расстояние на трассе (мрад)
h_{st}	Высота гладкой поверхности Земли (нсум) в месте размещения станции, создающей помехи (м)
h_{sr}	Высота гладкой поверхности Земли (нсум) в месте размещения станции, испытывающей помехи (м)
h_i	Высота i -й точки земной поверхности над средним уровнем моря (м): h_0 : высота станции, создающей помехи; h_n : высота станции, испытывающей помехи
h_m	Неровность земной поверхности (м)
h_{te}	Эффективная высота антенны, создающей помехи (м)
h_{re}	Эффективная высота антенны, испытывающей помехи (м)

3 Длина трассы

Длина трассы может быть получена при использовании геометрии дуги большого круга (на основе среднего физического радиуса Земли a) от географических координат станции, создающей помехи, (φ_s, ψ_s) , и станции, испытывающей помехи (φ_r, ψ_r) . В качестве альтернативы длину трассы можно определить исходя из профиля трассы.

В общем случае длину трассы, d (км), можно вычислить по данным о профиле трассы:

$$d = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) \quad \text{км,} \quad (148)$$

однако если профиль трассы представлен в дискретном виде с постоянным интервалом приращения, то это выражение упрощается до:

$$d = n \cdot d_{ii} \quad \text{км,} \quad (149)$$

где d_{ii} – интервал приращения для трассы (км).

4 Классификация трасс

Трасса может быть классифицирована в качестве трассы в пределах прямой видимости либо загоризонтной трассы только для определения расстояний d_{it} и d_{ir} и углов места θ_t и θ_r , см. далее.

По профилю трассы необходимо определить, является ли трасса трассой в пределах прямой видимости либо загоризонтной трассой, основываясь на значении медианного эквивалентного радиуса Земли, a_e , представленного в уравнении (6а).

Трасса считается загоризонтной, если ее угол места по отношению к физическому горизонту со стороны антенны, создающей помехи (относительно местной горизонтали), больше угла (опять-таки относительно горизонтали в месте расположения мешающей антенны), под которым видна антенна, испытывающая помехи.

Критерий принадлежности трассы к категории загоризонтных следующий:

$$\theta_{max} > \theta_{td} \quad \text{мрад,} \quad (150)$$

где:

$$\theta_{max} = \max_{i=1}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{мрад,} \quad (151)$$

θ_i : угол места по отношению к i -й точке поверхности:

$$\theta_i = 1000 \arctan \left(\frac{h_i - h_{ts}}{10^3 d_i} - \frac{d_i}{2 a_e} \right) \quad \text{мрад,} \quad (152)$$

где:

h_i : высота i -й точки земной поверхности (м) над средним уровнем моря;

h_{ts} : высота антенны, создающей помехи (м), над средним уровнем моря;

d_i : расстояние от антенны, создающей помехи, до i -го элемента поверхности (км)

$$\theta_{td} = 1000 \arctan \left(\frac{h_{rs} - h_{ts}}{10^3 d} - \frac{d}{2 a_e} \right) \quad \text{мрад,} \quad (153)$$

где:

h_{rs} : высота антенны, испытывающей помехи (м), над средним уровнем моря;

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

a_e : медианное значение эквивалентного радиуса Земли, соответствующего рассматриваемой трассе (уравнение (6а)).

5 Вывод параметров исходя из профиля трассы

5.1 Загоризонтные трассы и наклонные трассы LoS

В таблице 7 даны параметры, которые необходимо получить исходя из профиля трассы.

5.1.1 Угол места горизонта, θ_t , со стороны антенны, создающей помехи

Угол места горизонта со стороны антенны, создающей помехи, – это максимальный угол места горизонта для антенны, получаемый с помощью уравнения (151), применяемого к $n - 1$ значениям высоты профиля местности:

$$\theta_t = \max(\theta_{max}, \theta_{td}) \quad \text{мрад,} \quad (154)$$

где θ_{max} определяется с помощью уравнения (151). Таким образом, для трассы LoS угол места горизонта мешающей антенны рассматривается как угол места линии до антенны, принимающей помехи.

5.1.2 Расстояние до горизонта, d_{lt} , от антенны, создающей помехи

Расстояние до горизонта – это минимальное расстояние от передатчика, в месте расположения которого с помощью уравнения (151) рассчитывается максимальный угол места горизонта со стороны антенны:

$$d_{lt} = d_i \quad \text{км} \quad \text{при } \max(\theta_i). \quad (155)$$

Для трассы LoS номер i должен соответствовать значению, при котором параметр дифракции v принимает максимальное значение.

$$v_{\max} = \max \left\{ \left[h_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts} (d - d_i) + h_{rs} d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\}, \quad (155a)$$

где номер профиля i принимает значения от 1 до $n - 1$, а C_e – эффективная кривизна Земли определяется в п. 4.2.1 Приложения 1.

5.1.3 Угол места горизонта, θ_r , со стороны антенны, испытывающей помехи

Угол места горизонта со стороны приемной антенны – это максимальный угол места горизонта со стороны антенны, получаемый с помощью уравнения (151), применяемого к $n - 1$ значениям высоты профиля местности:

Для трассы LoS θ_r определяется выражением:

$$\theta_r = 1000 \arctan \left(\frac{h_{ts} - h_{rs}}{10^3 d} - \frac{d}{2a_e} \right) \quad \text{мрад.} \quad (156a)$$

В ином случае θ_r определяется выражением:

$$\theta_r = \max_{j=1}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{мрад,} \quad (156b)$$

$$\theta_j = 1000 \arctan \left(\frac{h_j - h_{rs}}{10^3 (d - d_j)} - \frac{(d - d_j)}{2a_e} \right) \quad \text{мрад.} \quad (157)$$

5.1.4 Расстояние до горизонта, d_{lr} , от антенны, испытывающей помехи

Расстояние до горизонта – это минимальное расстояние от приемника, в месте расположения которого с помощью уравнения (156b) рассчитывается максимальный угол места горизонта со стороны антенны:

$$d_{lr} = d - d_j \quad \text{км} \quad \text{при max} (\theta_j) \quad (158)$$

Для трассы LoS d_{lr} определяется выражением:

$$d_{lr} = d - d_{lt} \quad \text{км.} \quad (158a)$$

5.1.5 Угловое расстояние θ (мрад)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{мрад.} \quad (159)$$

5.1.6 Модель "гладкой поверхности Земли" и эффективные высоты антенн

5.1.6.1 Общие положения

"Гладкую поверхность Земли" получают на основе профиля для расчета значений эффективной высоты антенн как для дифракционной модели, так и для оценки неровностей трассы, требуемой для модели распространения в атмосферном волноводе/за счет отражения от слоев атмосферы. Определения значений эффективной высоты антенн отличаются для этих двух целей. В п. 5.1.6.2 описывается определение значений высоты гладкой поверхности Земли без корректировки в месте размещения передатчика и приемника, h_{st} и h_{sr} соответственно. Далее в п. 5.1.6.3 описывается вывод измененных значений высоты гладкой поверхности в месте размещения передатчика и приемника для модели дифракции, соответственно h_{std} и h_{srd} , который в п. 4.2.3 Приложений 1 используется для расчета значений эффективной высоты антенны для дифракционной модели. В п. 5.1.6.4 описывается расчет значений эффективной высоты, h_{te} и h_{re} , и параметра неровности земной поверхности, h_m , для модели распространения в атмосферном волноводе.

5.1.6.2 Процедура получения гладкой земной поверхности

Получим простую линейную аппроксимацию значений высоты земной поверхности (м) над средним уровнем моря в виде:

$$h_{si} = [(d - d_i)h_{st} + d_i h_{sr}] / d \quad \text{м,} \quad (160)$$

где:

h_{si} : высота (м) над средним уровнем моря поверхности, полученной методом наименьших квадратов, на расстоянии d_i (км) от источника помех;

h_{st} : высота (м) над средним уровнем моря гладкой поверхности Земли в начале трассы, т. е. в месте расположения станции, создающей помехи;

h_{sr} : высота (м) над средним уровнем моря гладкой поверхности Земли в конце трассы, т. е. в месте расположения приемной станции.

Рассчитаем h_{st} и h_{sr} , используя уравнения (161)–(164):

$$v_1 = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1}), \quad (161)$$

где:

h_i : фактическая высота i -й точки земной поверхности над средним уровнем моря (м);

d_i : расстояние от источника помех до i -й точки земной поверхности (км):

$$v_2 = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) [h_i(2d_i + d_{i-1}) + h_{i-1}(d_i + 2d_{i-1})] \quad \text{м.} \quad (162)$$

Высота гладкой поверхности Земли на станции, создающей помехи, h_{st} , далее определяется как:

$$h_{st} = \left(\frac{2v_1 d - v_2}{d^2} \right) \quad \text{м,} \quad (163)$$

и, следовательно, высоту гладкой поверхности Земли в месте расположения станции, испытывающей помехи, h_{sr} , можно определить следующим образом:

$$h_{sr} = \left(\frac{v_2 - v_1 d}{d^2} \right) \quad \text{м.} \quad (164)$$

5.1.6.3 Значения эффективной высоты антенны для дифракционной модели

Найдем наибольшую высоту препятствия на прямой трассе от передатчика к приемнику, h_{obs} , и углы места горизонта, α_{obt} и α_{obr} , исходя из геометрии плоской Земли согласно уравнениям:

$$h_{obs} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i\} \quad \text{м;} \quad (165a)$$

$$\alpha_{obt} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i / d_i\} \quad \text{мрад;} \quad (165b)$$

$$\alpha_{obr} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i / (d - d_i)\} \quad \text{мрад,} \quad (165c)$$

где:

$$H_i = h_i - [h_{ts}(d - d_i) + h_{rs}d_i] / d \quad \text{м.} \quad (165d)$$

Рассчитаем предварительные значения высоты гладкой поверхности Земли на концах трассы со стороны передатчика и приемника.

Если h_{obs} меньше или равна нулю, то

$$h_{stp} = h_{st} \quad (\text{м}) \text{ над средним уровнем моря;} \quad (166a)$$

$$h_{srp} = h_{sr} \quad (\text{м}) \text{ над средним уровнем моря;} \quad (166b)$$

в ином случае:

$$h_{stp} = h_{st} - h_{obs}g_t \quad (\text{м}) \text{ над средним уровнем моря;} \quad (166c)$$

$$h_{srp} = h_{sr} - h_{obs}g_r \quad (\text{м}) \text{ над средним уровнем моря;} \quad (166d)$$

где:

$$g_t = \alpha_{obt} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr}); \quad (166e)$$

$$g_r = \alpha_{obr} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr}). \quad (166f)$$

Рассчитаем окончательные значения высоты гладкой поверхности Земли на концах трассы со стороны передатчика и приемника, требуемые для дифракционной модели.

Если h_{stp} больше h_0 , то

$$h_{std} = h_0 \quad (\text{м}) \text{ над средним уровнем моря;} \quad (167a)$$

в ином случае:

$$h_{std} = h_{stp} \quad (\text{м}) \text{ над средним уровнем моря.} \quad (167b)$$

Если h_{srp} больше h_n , то

$$h_{srd} = h_n \quad (\text{м}) \text{ над средним уровнем моря;} \quad (167c)$$

в ином случае:

$$h_{srd} = h_{srp} \quad (\text{м}) \text{ над средним уровнем моря.} \quad (167d)$$

5.1.6.4 Параметры для модели распространения в атмосферном волноводе/за счет отражения от слоев атмосферы

Рассчитаем высоты гладкой поверхности Земли в местах размещения передатчика и приемника, как это требуется для коэффициента неровности, согласно уравнениям

$$h_{st} = \min(h_{st}, h_0) \quad \text{м;} \quad (168a)$$

$$h_{sr} = \min(h_{sr}, h_n) \quad \text{м.} \quad (168b)$$

Если один из параметров, h_{st} или h_{sr} , или они оба были изменены в соответствии с уравнением (168a) или (168b), то также должен быть скорректирован и наклон гладкой поверхности Земли, m :

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{м/км.} \quad (169)$$

Эффективные высоты терминалов для модели распространения в атмосферном волноводе/за счет отражения от слоев атмосферы, h_{te} и h_{re} , определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} h_{te} &= h_{tg} + h_0 - h_{st} & \text{м;} \\ h_{re} &= h_{rg} + h_n - h_{sr} & \text{м.} \end{aligned} \quad (170)$$

Параметр, называемый неровностью земной поверхности, h_m (м), представляет собой максимальную высоту земной поверхности над гладкой поверхностью Земли на участке трассы между точками горизонта, включая эти точки:

$$h_m = \max_{i=i_{lt}}^{i_{lr}} [h_i - (h_{st} + m \cdot d_i)] \quad \text{м,} \quad (171)$$

где:

i_{lt} : индекс точки профиля на расстоянии d_{lt} от передатчика;

i_{lr} : индекс точки профиля на расстоянии d_{lr} от приемника.

На рисунке 12 показаны гладкая поверхность Земли и параметр h_m неровности земной поверхности.



Прилагаемый документ 3 к Приложению 1

Аппроксимация обратной кумулятивной функции нормального распределения для $x \leq 0,5$

Приводимая ниже аппроксимация обратной кумулятивной функции нормального распределения справедлива в диапазоне $0,000001 \leq x \leq 0,5$ и дает максимальную погрешность порядка 0,00054. Ее с уверенностью можно использовать в качестве выражения интерполяционной функции в уравнении (41b). Если $x < 0,000001$, а это означает, что $\beta_0 < 0,0001\%$, то x следует установить равным 0,000001. Тогда функцию $I(x)$ можно представить как:

$$I(x) = \xi(x) - T(x), \quad (172)$$

где:

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]}; \quad (172a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 \cdot T(x) + C_1) \cdot T(x)] + C_0}{[(D_3 \cdot T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1}; \quad (172b)$$

$$C_0 = 2,515516698; \quad (172c)$$

$$C_1 = 0,802853; \quad (172d)$$

$$C_2 = 0,010328; \quad (172e)$$

$$D_1 = 1,432788; \quad (172f)$$

$$D_2 = 0,189269; \quad (172g)$$

$$D_3 = 0,001308. \quad (172h)$$
