

Рекомендация МСЭ-R P.1812-8 (09/2025)

Серия Р: Распространение радиоволн

**Метод прогнозирования
распространения сигнала
на конкретной трассе для наземных
служб "из пункта в зону" в диапазоне
частот 30 МГц – 6 ГГц**



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.

Права интеллектуальной собственности

МСЭ обращает внимание на вероятность того, что практическое применение или выполнение настоящей Рекомендации может включать использование заявленного права интеллектуальной собственности. МСЭ не занимает какую бы то ни было позицию относительно подтверждения, действительности или применимости заявленных прав интеллектуальной собственности, независимо от того, доказываются ли такие права членами МСЭ или другими сторонами, не относящимися к процессу разработки Рекомендации.

На момент утверждения настоящей Рекомендации МСЭ получил извещение об интеллектуальной собственности, защищенной патентами, которые могут потребоваться для выполнения настоящей Рекомендации. Однако те, кто будет применять Рекомендацию, должны иметь в виду, что вышесказанное может не отражать самую последнюю информацию, и поэтому им настоятельно рекомендуется обращаться к соответствующей патентной информации МСЭ-R, имеющейся по адресу: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/Pages/itu-r-patent-information.aspx>.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

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

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, 2026 г.

© ITU 2026

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.1812-8*

Метод прогнозирования распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб "из пункта в зону" в диапазоне частот 30 МГц – 6 ГГц

(Вопрос МСЭ-R 203/3)

(2007-2009-2012-2013-2015-2019-2021-2023-2025)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации описывается метод прогнозирования распространения сигнала, пригодный для наземных служб связи "из пункта в зону" в диапазоне частот 30 МГц – 6 ГГц. Метод прогнозирует среднее значение уровней сигнала при многолучевом распространении, превышаемое в течение заданного процента времени $p\%$, лежащего в пределах $1\% \leq p \leq 50\%$, и для данного процента мест размещения p_L , лежащего в пределах $1\% \leq p_L \leq 99\%$. Данный метод предусматривает подробный анализ трассы на основе профиля местности.

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

Настоящая Рекомендация дополняет Рекомендацию МСЭ-R P.1546.

Ключевые слова

Распространение на конкретной трассе большой дальности, тропосферные трассы/линии, прогнозирование основных потерь передачи, изменчивость времени и местоположения

Сокращения/Глоссарий

amsl	Above mean sea level		Над средним уровнем моря
DTT	Digital terrestrial television	ЦНТ	Цифровое наземное телевидение
IDWM	ITU digitized world map		Карта мира МСЭ в цифровой форме
LoS	Line-of-sight		Линия прямой видимости
NLoS	Non-line-of-sight		Вне линии прямой видимости
P-P	Point-to-point		Связь пункта с пунктом
UHF	Ultra-high frequency	УВЧ	Ультравысокая частота
VHF	Very high frequency	ОВЧ	Очень высокая частота

Соответствующие Рекомендации МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.452 – Процедура прогнозирования для оценки помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 100 МГц

Рекомендация МСЭ-R P.528 – Метод прогнозирования распространения радиоволн для воздушной подвижной и радионавигационной служб, работающих в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ

Рекомендация МСЭ-R P.530 – Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости

Рекомендация МСЭ-R P.617 – Методы прогнозирования и данные о распространении радиоволн, необходимые для проектирования тропосферных радиорелейных систем

* В 2026 году 3-я Исследовательская комиссия по радиосвязи внесла поправки редакционного характера в настоящую Рекомендацию в соответствии с Резолюцией МСЭ-R 1.

Рекомендация МСЭ-R P.844 – Факторы ионосферного распространения, влияющие на совместное использование частот в ОВЧ и УВЧ диапазонах (30 МГц – 3 ГГц)

Рекомендация МСЭ-R P.1144 – Руководство по использованию методов прогнозирования распространения радиоволн, разработанных 3-й Исследовательской комиссией по радиосвязи

Рекомендация МСЭ-R P.1406 – Эффекты распространения радиоволн, касающиеся наземных сухопутной подвижной и радиовещательной служб в диапазонах ОВЧ и УВЧ

Рекомендация МСЭ-R P.1411 – Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования наружных систем радиосвязи малого радиуса действия и локальных радиосетей в диапазоне частот от 300 МГц до 100 ГГц

Рекомендация МСЭ-R P.1546 – Метод прогнозирования для трасс связи пункта с зоной для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 4000 МГц

Рекомендация МСЭ-R P.2001 – Универсальная модель наземного распространения радиоволн для широкого применения в полосе частот 30 МГц – 50 ГГц

Рекомендация МСЭ-R P.2040 – Влияние строительных материалов и структур на распространение радиоволн на частотах выше приблизительно 100 МГц

ПРИМЕЧАНИЕ. – Следует использовать последнюю редакцию/издание Рекомендации.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

a) что для инженеров необходимо разработать рекомендации по планированию наземных служб радиосвязи в полосах частот УВЧ и ОВЧ;

b) что для станций, работающих на том же или на смежных частотных каналах, одним из важнейших вопросов является определение минимального географического разнosa, обеспечивающего отсутствие неприемлемых помех из-за дальнего наземного распространения радиоволн,

признавая,

a) что в Рекомендации МСЭ-R P.528 содержится руководство по прогнозированию основных потерь передачи "из пункта в зону" для воздушной подвижной службы для диапазона частот от 100 МГц до 30 ГГц;

b) что в Рекомендации МСЭ-R P.452 содержится руководство по детальной оценке микроволновых помех между станциями на поверхности Земли на частотах выше приблизительно 0,1 ГГц;

c) что в Рекомендации МСЭ-R P.617 содержится руководство по прогнозированию потерь передачи "из пункта в пункт" для загоризонтных радиорелейных систем для диапазона частот выше 30 МГц и для расстояний в диапазоне от 100 км до 1000 км;

d) что в Рекомендации МСЭ-R P.1411 содержится руководство по прогнозированию для наружных систем ближней радиосвязи (до 1 км);

e) что в Рекомендации МСЭ-R P.530 содержится руководство по прогнозированию потерь при распространении "из пункта в пункт" для наземных систем прямой видимости;

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

g) что в Рекомендации МСЭ-R P.2001 представлена модель наземного распространения радиоволн в широкой полосе частот 30 МГц – 50 ГГц с учетом статистических данных по замиранию и усилению, которая хорошо подходит для использования в моделировании по методу Монте-Карло;

h) что в Рекомендации МСЭ-R P.2040 представлено руководство по определению влияния строительных материалов и структур на распространение радиоволн,

рекомендует

для детальной оценки уровней сигналов "из пункта в зону" применительно к этим службам использовать процедуру, описанную в Приложении.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Трассы распространения большой дальности могут также существовать в диапазоне ОВЧ при распространении через ионосферу. Эти режимы представлены в сводной форме в Рекомендации МСЭ-R P.844.

Приложение

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
1 Введение.....	5
2 Элементы модели прогнозирования параметров распространения радиоволн	6
3 Исходные параметры	6
3.1 Базовые исходные данные.....	6
3.2 Профиль трассы распространения радиосигнала	7
3.3 Радиоклиматические зоны	9
3.4 Расстояние от терминалов до побережья.....	10
3.5 Основные радиометеорологические параметры.....	10
3.6 Распространение по атмосферному волноводу	11
3.7 Эффективный радиус Земли	11
3.8 Параметры, полученные из анализа профиля трассы.....	12
4 Процедура прогнозирования	12
4.1 Общее описание.....	12
4.2 Распространение по линии прямой видимости (с учетом кратковременных явлений)	13
4.3 Распространение за счет дифракции.....	13
4.4 Распространение за счет тропосферного рассеяния.....	19
4.5 Распространение в атмосферном волноводу и за счет отражения от слоев атмосферы.....	20
4.6 Основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в 50% местоположений	22
4.7 Изменчивость местоположения потерь	24
4.8 Потери на проникновение сигнала в здание.....	25
4.9 Основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в $p_L\%$ местоположений.....	25

4.10	Напряженность поля, превышаемая в течение $p\%$ времени и в $p_L\%$ местоположений	26
	Прилагаемый документ 1 к Приложению – Анализ профиля трассы	26
1	Введение.....	26
2	Формирование профиля трассы	26
3	Протяженность трассы	28
4	Классификация трасс	29
5	Получение необходимых параметров из профиля трассы.....	29
5.1	Угол места горизонта передающей антенны над уровнем местного горизонта θ_t	29
5.2	Расстояние прямой видимости для передающей антенны d_{lt}	30
5.3	Угол места горизонта приемной антенны над уровнем местного горизонта θ_r	30
5.4	Расстояние прямой видимости для приемной антенны d_{lr}	30
5.5	Угловое расстояние θ (мрад)	30
5.6	Модель "гладкой земной поверхности" и эффективные высоты антенны	30
	Прилагаемый документ 2 к Приложению – Аппроксимация функции обратного дополнительного кумулятивного нормального распределения	33
	Прилагаемый документ 3 к Приложению – Альтернативный метод расчета потерь за счет дифракции на сферической поверхности Земли L_{bulb}	34

1 Введение

Метод прогнозирования параметров распространения радиоволн, описанный в настоящем Приложении, рекомендуется для детальной оценки уровней сигнала и пригоден для линий связи с наземными системами радиосвязи "из пункта в зону" в диапазоне частот 30–6000 МГц. Метод позволяет прогнозировать уровень сигнала (т. е. напряженность электрического поля), превышаемый в течение данного процента времени $p\%$ среднего года в пределах $1\% \leq p \leq 50\%$ и для $p_L\%$ мест размещения в пределах $1\% \leq p_L \leq 99\%$. Следовательно, этот метод может использоваться для прогнозирования как области обслуживания, так и готовности для желаемого уровня сигнала (площади покрытия), а также для прогнозирования уменьшения области обслуживания и готовности из-за мешающих сигналов, действующих в совпадающем и/или смежных каналах (помех).

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

Этот метод сначала описывает расчет основных потерь передачи (дБ), которые не превышаются в течение $p\%$ времени для среднего числа местоположений. Затем в дополнение к элементу потерь на проникновение в здание, описанному в Рекомендации МСЭ-R P.2040, выполняется статистическое описание элемента, определяемого изменчивостью местоположения, для мест размещения приемников. Затем выполняется процедура приведения к напряженности электрического поля дБ(мкВ/м) для эффективно излучаемой мощности = 1 кВт.

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

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

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

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

С учетом изложенного выше представленный в настоящей Рекомендации элемент, определяемый изменчивостью местоположения, и представленный в Рекомендации МСЭ-R P.2040 элемент модели потерь на проникновение в здание, описываются статистическими параметрами логнормального распределения для соответствующих точек размещения приемников. Хотя, как может показаться, такое статистическое описание задачи распространения "из пункта в зону" делает общую модель

асимметричной (т. е. необратимой), пользователи настоящей Рекомендации должны помнить, что изменчивость местоположения может в принципе применяться к обоим концам трассы (т. е. к обоим терминалам) или даже к обоим сразу (т. е. и к передатчику, и к приемнику). Однако поправка на изменчивость местоположения имеет смысл только в ситуациях, когда точное место расположения данного терминала неизвестно, и возможные места размещения этого терминала требуется описать статистически. Маловероятно, чтобы было много случаев, когда вышесказанное было применимо к точке размещения передатчика. Если места размещения обоих терминалов точно известны и эта процедура используется в режиме "из пункта в пункт", то настоящая Рекомендация применима только со значением $p_L = 50\%$.

Аналогичное заявление справедливо и для потерь на проникновение в здание. Аргумент здесь несколько сложнее, чем для потери из-за изменчивости местоположения, вследствие того факта, что коэффициент коррекции средних потерь на проникновение не равен нулю. На стороне передатчика пользователи должны также добавить потери на проникновение в здание к основным потерям передачи, но пользователи должны также знать, что если передатчик расположен не в "среднем" местоположении, то использование средних значений потерь может вводить в заблуждение.

2 Элементы модели прогнозирования параметров распространения радиоволн

Данный метод прогнозирования учитывает следующие элементы модели:

- прямая видимость (LoS);
- дифракция (учитывает случаи гладкой Земли, пересеченной местности и случаи суб-трасс);
- тропосферное рассеяние;
- аномальное распространение (атмосферные волноводы и отражение от слоев);
- изменчивость местоположения;
- потери на проникновение в здание (в Рекомендации МСЭ-R P.2040).

3 Исходные параметры

3.1 Базовые исходные данные

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

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

ТАБЛИЦА 1
Базовые исходные данные

Параметр	Минимум	Максимум	Описание
f (ГГц)	0,03	6,0	Частота (ГГц)
p (%)	1,0	50,0	Процент времени среднего года, в течение которого превышает рассчитанный уровень сигнала
p_L (%)	1	99	Процент мест размещения, в которых превышает рассчитанный уровень сигнала
ϕ_t, ϕ_r (градусы)	-80	+80	Широта передатчика, приемника
ψ_t, ψ_r (градусы)	-180,0	180,0	Долгота передатчика, приемника (положительные значения = на восток от Гринвича)

ТАБЛИЦА 1 (окончание)

Параметр	Минимум	Максимум	Описание
h_{ig}, h_{rg} (м)	1	3 000	Высота центра антенны над уровнем земли
Поляризация			Единственная поляризация, например вертикальная или горизонтальная
w_s (м)	1	100	Ширина улицы. В отсутствие конкретных местных значений следует использовать значение 27

Поляризация в таблице 1 является параметром, не имеющим числового значения. Эта информация используется в п. 4.3.3 в связи с уравнениями (29a), (29b) и (30).

3.2 Профиль трассы распространения радиосигнала

Для профилей трасс, используемых в описанном ниже методе, требуются данные конкретных трасс о высоте местности и, кроме того, либо о категории препятствий (наземный покров), либо о высоте поверхности вдоль трассы. Под высотой местности понимается высота земной поверхности без растительности, для того чтобы отличать ее от высоты поверхности, которая включает естественные или искусственные структуры на вершине местности.

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

d_i : расстояние от передатчика до i -й точки профиля (км); (1a)

h_i : высота местности в i -й точке профиля над уровнем моря (м); (1b)

g_i : высота поверхности i -й точки профиля над уровнем моря (м); (1c)

где:

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

n : количество точек профиля.

Высота препятствий не должна добавляться к высоте местности в точке размещения передатчика и приемника. Таким образом, g_i – это высота местности в точке размещения передатчика (в метрах над уровнем моря), а g_n – высота местности в точке размещения приемника (в метрах над уровнем моря).

Между передатчиком и приемником должна находиться по крайней мере одна промежуточная точка профиля. Следовательно, n должно удовлетворять условию $n \geq 3$. Такое малое число точек приемлемо только для коротких трасс, протяженностью не более 1 км.

Отметим, что первой точкой профиля является передатчик. Следовательно, $d_1 = 0$, а h_1 равна высоте местности в точке размещения передатчика (в метрах над уровнем моря). Аналогично n -й точкой профиля является приемник. Следовательно, d_n = протяженности трассы в км, а h_n равна высоте местности в точке размещения приемника (в метрах над уровнем моря).

Конкретное расстояние между точками профиля не задано. Если предположить, что профили взяты из цифровых наборов данных о высоте земной поверхности и наземного покрова (препятствий), подходящее распределение точек профиля, как правило, будет аналогично распределению точек из исходных наборов данных с аналогичной разрешающей способностью обоих. Не обязательно, чтобы точки профиля были расположены на одинаковом расстоянии, но желательно, чтобы они были расположены на одинаковом расстоянии для всего профиля.

Для получения высоты поверхности g_i можно использовать два метода расчета профиля, которые описаны в следующих разделах. В первом методе используются данные наземного покрова для определения репрезентативной высоты препятствий, которую можно добавить к высоте местности. Во втором методе используются данные о высоте поверхности, где значения высоты включают препятствия без явного различия между рельефом местности и препятствиями.

3.2.1 Данные о местности и наземном покрове

Метод включает:

- построение профиля местности с использованием реальных значений высоты местности;
- добавление к профилю местности значений типовой высоты препятствий на основе категорий препятствий.

Если этот метод применяется для расчета дифракционных потерь с использованием профиля местности без препятствий, дифракционные потери будут занижены в случае среды с препятствиями, в отличие от комбинированного представления местности и препятствий. Этот метод был разработан и проверен на цифровых данных о местности путем объединения цифровых данных о местности со статистически репрезентативными категориями препятствий. Важно отметить, что дифракционные потери могут быть завышены, если значения высоты местности h_i включают естественные или искусственные структуры на вершине местности. Если доступны точные данные о высоте поверхности, можно получить более точную оценку потерь при распространении, используя расширенный метод расчета профиля в п. 3.2.2, или изучить другие методы, такие как трехмерное трассирование лучей, которое включает эффект дифракции вокруг зданий.

В этом методе профиль высоты поверхности аппроксимируется с использованием значений высоты местности с добавлением репрезентативных значений высоты препятствий на основе категорий препятствий в каждой точке профиля.

Высота поверхности g_i определяется следующим образом:

$$g_i = \begin{cases} h_i + \text{типовая высота препятствия } i\text{-й точки профиля (м)} & \text{при } i = 2, \dots, n-1 \\ h_1 & \text{при } i = 1 \\ h_n & \text{при } i = n \end{cases} \quad (1d)$$

При использовании этого метода разнос между точками в профиле должен быть не менее 30 м.

"Типовая высота препятствия", используемая в уравнении (1c) – это статистическая информация о высоте, связанной с классификацией наземного покрова, такого как растительность и здания, то есть одно значение высоты, связанное с каждым классом наземного покрова/препятствия. Добавление к профилю значений типовой высоты препятствий базируется на предположении, что высоты h_i представляют собой поверхность Земли без растительности. Если трасса распространения радиоволн протекает через лес или городские постройки, где имеют место дифракция или побочные пути распространения, в общем случае эффективная высота профиля будет выше, потому что радиосигнал будет проходить через препятствия. Таким образом, более адекватное представление профиля можно получить путем добавления значений типовой высоты для учета препятствий.

Добавляются не обязательно физические высоты, такие как высота крыш в случае зданий. Там, где существуют промежутки между препятствиями применительно к радиоволнам, некоторое количество энергии может перемещаться между препятствиями, а не над ними. В этой ситуации наличие препятствий, как ожидается, увеличит дифракционные потери, но не настолько, как повышение профиля до физической высоты препятствий.

Особенно это относится к высотным городским районам. Такие категории, как "плотная городская застройка" или "высотная городская застройка", как правило, ассоциируются со зданиями высотой 30 метров и выше. Но в некоторых высотных районах между высокими зданиями имеются большие пространства, и это дает возможность распространения с низкими потерями вокруг них по сравнению с распространением над крышами. В таких случаях уместными могут быть меньшие значения типовой высоты, а не значения физической высоты препятствий.

С другой стороны, даже в районах, которые классифицируются как открытая или сельская местность, земная поверхность редко бывает совершенно лишенной растительности, т. е. без наличия на ней каких-либо объектов, которые могут способствовать увеличению потерь при распространении. Таким образом, во многих случаях могут быть уместны малые значения типовой высоты препятствий, а не нуль.

Таким образом, типовая высота препятствия зависит не только от физической высоты типичных препятствий, но и от горизонтального разнеса объектов и промежутков между ними. Не существует

общепринятого стандарта представления такой категории препятствий, как "городские условия", в физических единицах в разных странах. При наличии следует использовать информацию о типовой высоте препятствия на основе статистических данных или данных, полученных из других источников, о высоте местного препятствия. В качестве альтернативы в некоторых администрациях используются модели классификации препятствий, разработанные на основе местных или региональных геопространственных данных и проверенные по результатам измерений. В таблице 2 предлагаются значения по умолчанию для типовой высоты препятствий, которые возможно использовать в отсутствие конкретной информации о регионе/стране.

ТАБЛИЦА 2

Значения типовой высоты препятствия по умолчанию

Категория препятствия	Типовая высота препятствия (м)
	Добавление к профилю уравнения (1с) при $i = 2$ до $n - 1$
Вода/море	0
Открытая местность/сельская местность	0
Пригороды	10
Городские условия/деревья/лес	15
Плотная городская застройка	20

3.2.2 Данные о местности и поверхности

В этом методе профиль высоты поверхности формируется непосредственно на основе данных о высоте поверхности.

Высота поверхности g_i определяется следующим образом:

$$g_i = \begin{cases} \text{высота поверхности } i\text{-й точки профиля над уровнем моря (м)} & \text{при } i = 2, \dots, n - 1 \\ h_1 & \text{при } i = 1 \\ h_n & \text{при } i = n \end{cases} \quad (1e)$$

Учитывая, что данные о высоте поверхности следует использовать с разрешением, аналогичным разнесу между точками профиля, при использовании этого метода расстояние менее 10 м может привести к завышенной оценке основных потерь передачи, поскольку данные будут описывать отдельные препятствия. Широкомасштабные испытания показали, что использование разнеса между точками профиля, превышающего 50 м, не дает преимуществ по сравнению с методом, описанным в п. 3.2.1.

3.3 Радиоклиматические зоны

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

Для справочных целей администрация, возможно, пожелает использовать контуры побережья, содержащиеся в цифровой карте мира МСЭ (IDWM), которая доступна в БР по адресу: <https://www.itu.int/pub/R-SOFT-IDWM>. Если все точки трассы находятся, как минимум, на расстоянии 50 км от моря и иных больших водоемов, то используется только категория "территория, удаленная от моря".

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.

ТАБЛИЦА 3
Радиоклиматические зоны

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

3.4 Расстояние от терминалов до побережья

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

3.5 Основные радиометеорологические параметры

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

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

В отсутствие данных местных измерений эти количественные значения могут быть получены по картам, имеющимся в предоставляемых вместе с настоящей Рекомендацией неотъемлемых цифровых продуктах. Карты содержатся в файлах DN50.txt и N050.txt, соответственно. Данные представлены в диапазоне от 0° до 360° по долготы и от +90° до –90° по широте с разрешением 1,5° по долготы и широте. Эти данные используются в сочетании с файлами сопроводительных данных LAT.txt и LON.txt, содержащих, соответственно, значения широты и долготы соответствующих записей (узловые точки) в файлах DN50.txt и N050.txt. Для местоположения, не являющегося узловой точкой, параметр в желательном местоположении может быть получен путем билинейной интерполяции по значениям в четырех ближайших узловых точках, как описано в Рекомендации МСЭ-R P.1144.

ТАБЛИЦА 4
Неотъемлемые цифровые продукты

Имя файла	Источник	Широта			Долгота		
		От (градусы)	До (градусы)	Разнесение (градусы)	От (градусы)	До (градусы)	Разнесение (градусы)
DN50.txt	P.453	90	–90	1,5	0	360	1,5
N050.txt	P.453	90	–90	1,5	0	360	1,5
LAT.txt	P.453	90	–90	1,5	0	360	1,5
LON.txt	P.453	90	–90	1,5	0	360	1,5

Эти цифровые карты получены по результатам анализа глобальной базы данных подъемов радиозондов за десять лет (1983–1992 гг.).

Цифровые карты содержатся в упакованном файле [R-REC-P.1812-8-202509-I!!ZIP-E.zip](#).

3.6 Распространение по атмосферному волноводу

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

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

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

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

и

$$\tau = 1 - \exp(-0,000412d_{lm}^{2,41}), \quad (3)$$

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \mu_4 &= \mu_1^{(-0,935+0,017\phi)} & \text{для } |\phi| \leq 70^\circ \\ \mu_4 &= \mu_1^{0,3} & \text{для } |\phi| > 70^\circ \end{aligned} \quad (4)$$

где:

ϕ : географическая широта середины трассы (градусы).

Рассчитать β_0 :

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

3.7 Эффективный радиус Земли

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

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

Значение средней вертикальной скорости изменения коэффициента рефракции ΔN можно получить из неотъемлемой цифровой карты DN50.txt, используя в качестве описателя трассы широту и долготу середины трассы.

Среднее значение эффективного радиуса Земли a_e определяется выражением:

$$a_e = k_{50} a \quad \text{км}, \quad (7a)$$

где $a = 6371$ км – средний фактический радиус Земли.

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

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

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

Определяется общий эффективный радиус Земли, где $a_p = a_e$ при 50% времени и $a_p = a_\beta$ при $\beta_0\%$ времени.

3.8 Параметры, полученные из анализа профиля трассы

Значения множества параметров трассы, необходимых для расчетов и показанных в таблице 5, должны быть получены в ходе начального анализа профиля трассы на основе значения a_e , вычисленного из уравнения (7a). Информация о получении данных, формировании и анализе профиля трассы приведена в Прилагаемом документе 1 к настоящему Приложению.

4 Процедура прогнозирования

4.1 Общее описание

В настоящем разделе описана полная процедура прогнозирования. Во-первых, оцениваются основные потери передачи L_b (дБ), не превышаемые в течение требуемого процента времени года $p\%$ и в 50% мест размещения, как описано в пп. 4.2–4.6 (т. е. основные потери передачи из-за распространения по линии прямой видимости, потери за счет дифракции, потери за счет тропосферного рассеяния, потери из-за распространения по атмосферному волноводу/отражения от слоев атмосферы и потери из-за комбинации этих механизмов распространения, для того чтобы прогнозировать основные потери передачи, соответственно). В пп. 4.7–4.8 описаны методы учета влияния изменчивости местоположения и потерь на проникновение в здание. В итоге в п. 4.10 приводятся выражения, которые связывают основные потери передачи с напряженностью поля (дБ(мкВ/м)) для эффективной излучаемой мощности = 1 кВт.

ТАБЛИЦА 5

Значения параметров, которые должны быть получены из анализа профиля трассы

Параметр	Описание
d	Расстояние на трассе вдоль дуги большого круга (км)
d_{lt}, d_{lr}	Расстояние от передающей и приемной антенн до соответствующих им горизонтов (км)
θ_t, θ_r	Углы места передающей и приемной антенн, соответственно (мрад)
θ	Угловое расстояние трассы (мрад)
h_{ts}, h_{rs}	Высота антенного центра над средним уровнем моря (м)
h_{te}, h_{re}	h_{ts} и h_{rs} , соответственно
h_{ie}, h_{re}	Эффективная высота антенн над местностью (м) для модели атмосферного волновода/отражения от слоев атмосферы и согласно определению в Прилагаемом документе к Приложению 1
d_b	Суммарная длина участков трасс, проходящих над водной поверхностью (км)
ω	Доля общей трассы, проходящая над водной поверхностью: $\omega = d_b / d,$ где d – расстояние по дуге большого круга (км), рассчитанное по уравнению (73). Для полностью сухопутных трасс: $\omega = 0$.

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

Приведенные далее значения следует оценить как для трасс прямой видимости (LoS), так и для загоризонтных трасс.

Основные потери передачи в свободном пространстве определяются выражением:

$$L_{bfs} = 92,4 + 20 \log f + 20 \log(d_{fs}) \quad \text{дБ}, \quad (8)$$

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 на трассе вдоль дуги большого круга (км);

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.3 Распространение за счет дифракции

Потери за счет дифракции вычисляются путем сочетания метода, основанного на конструкции Буллингтона, и метода расчета дифракции на сферической поверхности Земли. 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 также используются для расчета дифракционных потерь на сферической поверхности Земли. Окончательный результат получается как комбинация из трех видов потерь, рассчитанных, как указано выше. Для идеально гладкой трассы окончательные потери за счет дифракции вычисляются с использованием модели сферической Земли.

Этот метод обеспечивает оценку дифракционных потерь для трасс всех типов, в том числе трасс над морем, над территорией, удаленной от моря, или над побережьем, независимо от того, является ли трасса гладкой или пересеченной, трассой LoS или загоризонтной трассой.

Этот метод расчета дифракции всегда используется для среднего эффективного радиуса Земли. Если требуется общий прогноз для $p = 50\%$, никаких дальнейших расчетов дифракции выполнять не нужно.

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

Затем вычисляются потери за счет дифракции, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, для $1\% \leq p \leq 50\%$, с применением процедуры ограничения или интерполяции, описанной в п. 4.3.5.

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

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

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

Полный расчет дифракции описывается в следующих пунктах:

В п. 4.3.1 описывается часть метода расчета дифракции, основанная на модели Буллингтона. При каждом расчете дифракции для данного эффективного радиуса Земли она используется дважды. Во втором случае высоты антенн изменяются, и все высоты профиля равны нулю.

В п. 4.3.2 описывается часть модели на основе дифракции на сферической поверхности Земли. Эта часть используется с теми же высотами антенн, что и при втором использовании модели Буллингтона, описанной в п. 4.3.1.

В п. 4.3.3 описывается порядок комбинированного использования методов, изложенных в пп. 4.3.1 и 4.3.2, для выполнения полного расчета дифракции для данного эффективного радиуса Земли. Из-за того, каким образом используются модель Буллингтона и расчет на основе сферической Земли, полный расчет дифракции получил название "модель дельта-Буллингтон".

В п. 4.3.4 описывается полный расчет потерь из-за дифракции, не превышаемых в течение заданного p процента времени.

4.3.1 Часть расчета дифракции, основанная на модели Буллингтона

В следующих уравнениях наклоны рассчитываются в м/км относительно основной линии, соединяющей уровень моря на стороне передатчика и уровень моря на стороне приемника. Расстояние до i -й точки профиля и ее высота составляют соответственно d_i километров и g_i метров над уровнем моря, i принимает значения от 1 до n , где n – число точек профиля, а полная длина трассы равна d километрам. Для удобства терминалы в начале и конце профиля называются передатчиком и приемником с высотами h_{ts} и h_{rs} метров над уровнем моря соответственно. Эффективная кривизна Земли C_e км⁻¹ задается как $1/a_p$ где a_p – эффективный радиус Земли в километрах. Длина волны в метрах обозначается как λ . Значения, которые следует использовать для a_p , приведены в п. 4.3.5.

Найти промежуточную точку профиля с наибольшим наклоном линии от передатчика к точке.

$$S_{tim} = \max \left[\frac{g_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - h_{tc}}{d_i} \right] \quad \text{м/км}, \quad (13)$$

где номер профиля i принимает значения от 2 до $n - 1$.

Рассчитать наклон линии от передатчика к приемнику, предполагая трассу LoS:

$$S_{tr} = \frac{h_{rc} - h_{tc}}{d} \quad \text{м/км}. \quad (14)$$

Теперь необходимо рассмотреть два случая.

Случай 1. Дифракционная трасса LoS.

Если $S_{tim} < S_{tr}$, то дифракционная трасса является трассой прямой видимости (LoS).

Найти промежуточную точку профиля с наибольшим параметром дифракции v :

$$v_{\max} = \max \left\{ \left[g_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{tc} (d - d_i) + h_{rc} d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\}, \quad (15)$$

где номер профиля i принимает значения от 2 до $n - 1$.

В этом случае потери за счет дифракции на остром краю для точки Буллингтона определяются выражением:

$$L_{uc} = J(v_{\max}) \quad \text{дБ}, \quad (16)$$

где функция J определяется из уравнения (12) для v_b больше $-0,78$, и в других случаях равны 0.

Случай 2. Загоризонтная дифракционная трасса

Если $S_{tim} \geq S_{tr}$, то дифракционная трасса является загоризонтной.

Найти промежуточную точку профиля с наибольшим наклоном линии от приемника к точке.

$$S_{rim} = \max \left[\frac{g_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - h_{rc}}{d - d_i} \right] \quad \text{м/км}, \quad (17)$$

где номер профиля i принимает значения от 2 до $n - 1$.

Рассчитать расстояние до точки Буллингтона от передатчика:

$$d_{bp} = \frac{h_{rc} - h_{tc} + S_{rim} d}{S_{tim} + S_{rim}} \quad \text{км}. \quad (18)$$

Рассчитать параметр дифракции v_b для точки Буллингтона:

$$v_b = \left[h_{tc} + S_{tim} d_{bp} - \frac{h_{tc} (d - d_{bp}) + h_{rc} d_{bp}}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_{bp} (d - d_{bp})}}. \quad (19)$$

В этом случае потери за счет дифракции на остром краю для точки Буллингтона определяются выражением:

$$L_{uc} = J(v_b) \quad \text{дБ}. \quad (20)$$

Для L_{uc} , рассчитанного по формуле (16) или (20), потери за счет дифракции Буллингтона на трассе определяются выражением:

$$L_{bull} = L_{uc} + \left[1 - \exp\left(-\frac{L_{uc}}{6}\right) \right] (10 + 0,02d) \quad \text{дБ}. \quad (21)$$

4.3.2 Потери за счет дифракции на сферической поверхности Земли

Потери за счет дифракции на сферической поверхности Земли L_{dsph} для эффективной высоты антенн h_{tesph} и h_{resph} (м) вычисляются следующим образом.

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

$$d_{los} = \sqrt{2a_p} \left(\sqrt{0,001h_{tesph}} + \sqrt{0,001h_{resph}} \right) \quad \text{км}. \quad (22)$$

Значения, которые следует использовать для a_p , приведены в п. 4.3.5. Значения эффективной высоты антенн h_{tesph} и h_{resph} определяются с помощью уравнений (38a) и (38b).

Если $d \geq d_{los}$, рассчитать потери за счет дифракции, используя метод, описанный в п. 4.3.3, ниже, для $a_{dft} = a_p$, чтобы получить L_{dft} , и установить L_{dsph} равным L_{dft} . Дальнейших вычислений дифракции на сферической поверхности Земли не требуется.

В ином случае продолжить вычисления следующим образом:

Рассчитать наименьшую высоту просвета между трассой над криволинейной поверхностью Земли и лучом между антеннами, h_{se} , используя выражение:

$$h_{se} = \frac{\left(h_{tesph} - 500 \frac{d_{se1}^2}{a_p} \right) d_{se2} + \left(h_{resph} - 500 \frac{d_{se2}^2}{a_p} \right) d_{se1}}{d} \quad \text{м,} \quad (23)$$

где:

$$d_{se1} = \frac{d}{2} (1 + b) \quad \text{км;} \quad (24a)$$

$$d_{se2} = d - d_{se1} \quad \text{км;} \quad (24b)$$

$$b = 2 \sqrt{\frac{m_c + 1}{3m_c}} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m_c}{(m_c + 1)^3}} \right) \right\}, \quad (24c)$$

где функция $\arccos$ возвращает угол в радианах:

$$c = \frac{h_{tesph} - h_{resph}}{h_{tesph} + h_{resph}}, \quad (24d)$$

$$m_c = \frac{250d^2}{a_p(h_{tesph} + h_{resph})}. \quad (24e)$$

Рассчитать требуемый просвет для нулевых потерь за счет дифракции h_{req} :

$$h_{req} = 17,456 \sqrt{\frac{d_{se1} d_{se2} \lambda}{d}} \quad \text{м.} \quad (25)$$

Если $h_{se} > h_{req}$, потери за счет дифракции на сферической поверхности Земли L_{dsph} равны нулю. Дальнейших вычислений дифракции на сферической поверхности Земли не требуется.

В ином случае продолжить вычисления следующим образом:

Рассчитать модифицированный эффективный радиус Земли a_{em} , который дает границу прямой видимости на расстоянии d , используя выражение:

$$a_{em} = 500 \left(\frac{d}{\sqrt{h_{tesph}} + \sqrt{h_{resph}}} \right)^2 \quad \text{км.} \quad (26)$$

Используем метод, описанный в п. 4.3.3, для $a_{dft} = a_{em}$, чтобы получить L_{dft} .

Если значение L_{dft} является отрицательным, потери за счет дифракции на сферической поверхности Земли L_{dsph} равны 0, и дальнейших расчетов дифракции на сферической поверхности Земли не требуется.

В ином случае продолжить вычисления следующим образом:

Рассчитать потери за счет дифракции на сферической поверхности Земли методом интерполяции:

$$L_{dsph} = \left[1 - \frac{h_{se}}{h_{req}} \right] L_{dft} \quad \text{дБ.} \quad (27)$$

4.3.3 Часть потерь за счет дифракции на сферической поверхности Земли, определяемая первым членом остаточного ряда

В данном подразделе приводится метод расчета дифракции на сферической поверхности Земли с использованием только первого члена остаточного ряда. Этот метод является частью полного метода расчета дифракции, описанного в п. 4.3.2, выше, и предназначен для определения потерь за счет дифракции с учетом первого члена остаточного ряда, L_{dft} , для данного значения эффективного радиуса Земли a_{dft} . Значение a_{dft} дано в п. 4.3.2.

Установим типичные электрические свойства местности для суши с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 22,0$ и проводимостью $\sigma = 0,003$ С/м и вычислим L_{dft} , используя уравнения (29)–(36), получим в результате $L_{dftland}$.

Установим типичные электрические свойства местности для моря с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 80,0$ и проводимостью $\sigma = 5,0$ С/м и вычислим L_{dft} , используя уравнения (29)–(36), получим в результате L_{dftsea} .

Потери за счет дифракции на сферической поверхности Земли, определяемые первым членом, находят из выражения:

$$L_{dft} = \omega L_{dftsea} + (1 - \omega) L_{dftland} \quad \text{дБ}, \quad (28)$$

где ω – часть трассы, проходящая над морем.

Начать вычисления, которые должны быть выполнены дважды, как описано выше:

Нормированный коэффициент полной проводимости поверхности для горизонтальной и вертикальной поляризации:

$$K_H = 0,036 (a_{dft} f)^{-1/3} \left[(\epsilon_r - 1)^2 + \left(\frac{18\sigma}{f} \right)^2 \right]^{-1/4} \quad (\text{горизонтальная поляризация}) \quad (29a)$$

и

$$K_V = K_H \left[\epsilon_r^2 + \left(\frac{18\sigma}{f} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{вертикальная поляризация}). \quad (29b)$$

Если вектор поляризации содержит и горизонтальный и вертикальный компоненты, например круговая или наклонная поляризация, разбить его на горизонтальный и вертикальный компоненты, вычислить каждый отдельно и объединить результаты как векторную сумму амплитуды поля. На практике такое разбиение в общем случае не потребуется, так как на частотах выше 300 МГц в уравнении (30) для β_{dft} может использоваться значение 1.

Вычислить параметр, учитывающий тип земной поверхности/поляризацию:

$$\beta_{dft} = \frac{1 + 1,6K^2 + 0,67K^4}{1 + 4,5K^2 + 1,53K^4}, \quad (30)$$

где $K - K_H$ или K_V в зависимости от типа поляризации.

Нормированное расстояние:

$$X = 21,88 \beta_{dft} \left(\frac{f}{a_{dft}^2} \right)^{1/3} d. \quad (31)$$

Нормированные высоты передатчика и приемника:

$$Y_t = 0,9575 \beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{tesph}; \quad (32a)$$

$$Y_r = 0,9575 \beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{resph}. \quad (32b)$$

Рассчитать член, определяющий расстояния, используя выражение:

$$F_X = \begin{cases} 11 + 10 \log(X) - 17,6X & \text{для } X \geq 1,6, \\ -20 \log(X) - 5,6488 X^{1,425} & \text{для } X < 1,6. \end{cases} \quad (33)$$

Определить функцию нормированной высоты, используя выражение:

$$G(Y) = \begin{cases} 17,6(B-1,1)^{0,5} - 5 \log(B-1,1) - 8 & \text{для } B > 2, \\ 20 \log(B+0,1B^3) & \text{иначе,} \end{cases} \quad (34)$$

где:

$$B = \beta_{dft} Y. \quad (35)$$

Ограничить $G(Y)$ так, чтобы $G(Y) \geq 2 + 20 \log K$.

Теперь получим потери за счет дифракции на сферической поверхности Земли, определяемые первым членом остаточного ряда, используя выражение:

$$L_{dft} = -F_X - G(Y_t) - G(Y_r) \quad \text{дБ.} \quad (36)$$

4.3.4 Полная модель потерь за счет дифракции "дельта-Буллингтон"

Используем метод, описанный в п. 4.3.1, для высот профиля трассы (g_i) и высот антенн (h_{tc} , h_{rc}). Установить результирующие потери за счет дифракции Буллингтона для реальной трассы $L_{bulla} = L_{bull}$, как это задано уравнением (21).

В Прилагаемом документе 3 к настоящему Приложению представлен альтернативный метод расчета L_{bulls} без использования анализа профиля местности.

Используем метод, описанный в п. 4.3.1, второй раз для всех высот профиля g_i , установленных в 0, и модифицированных высот антенн, определяемых выражениями:

$$h'_{tc} = h_{tc} - h_{std} \quad \text{м;} \quad (37a)$$

$$h'_{rc} = h_{rc} - h_{srd} \quad \text{м,} \quad (37b)$$

где высоты гладкой земной поверхности в месте размещения передатчика и приемника, h_{std} и h_{srd} , определены в п. 5.6.2 Прилагаемого документа 1 к настоящему Приложению. Установить результирующие потери за счет дифракции Буллингтона для этой гладкой трассы $L_{bulls} = L_{bull}$, как это задано уравнением (21).

Используем метод, описанный в п. 4.3.2, для вычисления потерь за счет дифракции на сферической поверхности Земли L_{dsph} для реальной трассы длиной d км при:

$$h_{tesph} = h'_{tc} \quad \text{м} \quad (38a)$$

$$h_{resph} = h'_{rc} \quad \text{м} \quad (38b)$$

Потери за счет дифракции для общей трассы теперь определяются выражением:

$$L_d = L_{bulla} + \max\{L_{dsph} - L_{bulls}, 0\} \quad \text{дБ.} \quad (39)$$

4.3.5 Потери за счет дифракции, не превышаемые в течение $p\%$ времени

Используем метод, описанный в п. 4.3.4, для вычисления потерь за счет дифракции L_d для среднего значения эффективного радиуса Земли $a_p = a_e$, определяемого из уравнения (7a). Установим средние потери за счет дифракции $L_{d50} = L_d$.

Если $p = 50\%$, потери за счет дифракции, не превышаемые в течение $p\%$ времени, L_{dp} , определяются как L_{d50} .

Если $p < 50\%$, потери за счет дифракции, не превышаемые в течение $p\%$ времени, L_{dp} , необходимо вычислять следующим образом.

Применить метод, описанный в п. 4.3.4, для вычисления потерь за счет дифракции L_d , не превышаемых в течение $\beta_0\%$ времени, для эффективного радиуса Земли, $a_p = a_\beta$, определяемого из уравнения (7b). Устанавливаем потери за счет дифракции, не превышаемые в течение $\beta_0\%$ времени, $L_{d\beta} = L_d$.

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

$$F_i = \begin{cases} 0 & \text{если } p = 50\% \\ \frac{I(p/100)}{I(\beta_0/100)}, & \text{если } \beta_0\% < p < 50\%, \\ 1 & \text{если } 1\% \leq p \leq \beta_0\% \end{cases} \quad (40)$$

где $I(x)$ – обратное дополнительное кумулятивное нормальное распределение в зависимости от вероятности x . Аппроксимация зависимости $I(x)$, которая может быть использована доверительно для $x \leq 0,5$, приведена в Прилагаемом документе 2 к настоящему Приложению.

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

$$L_{dp} = L_{d50} + (L_{d\beta} - L_{d50}) F_i \quad \text{дБ.} \quad (41)$$

F_i определяется из уравнения (40) в зависимости от значений p и β_0 .

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

$$L_{bd50} = L_{bfs} + L_{d50} \quad \text{дБ,} \quad (42)$$

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

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

$$L_{bd} = L_{b0p} + L_{dp} \quad \text{дБ,} \quad (43)$$

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

4.4 Распространение за счет тропосферного рассеяния

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – При процентах времени, значительно меньших 50%, трудно отделить истинный режим тропосферного рассеяния от других вторичных явлений распространения, которые оказывают аналогичное влияние на распространение. Таким образом, модель "тропосферного рассеяния", принятая в настоящей Рекомендации, является эмпирическим обобщением концепции тропосферного рассеяния, которое также охватывает эти вторичные эффекты распространения. Это позволяет осуществлять непрерывное прогнозирование основных потерь передачи в диапазоне p процентов времени от 0,001% до 50%, связывая таким образом модель волновода и модель отражения от слоев атмосферы для малых процентов времени с истинным "режимом рассеяния", подходящим для слабого остаточного поля, превышаемого в течение больших процентов времени.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Эта модель тропосферного рассеяния была разработана для целей прогнозирования помех и не подходит для расчета условий распространения в течение более 50% времени, что влияет на эксплуатационные характеристики тропосферных радиорелейных систем.

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

$$L_{bs} = 190,1 + L_f + 20 \log_{10}(d) + 0,573\theta - 0,15N_0 - 10,125 \left[\log_{10} \left(\frac{50}{p} \right) \right]^{0,7} \quad \text{дБ,} \quad (44)$$

где:

L_f : частотно-зависимые потери:

$$L_f = 25 \log_{10}(f) - 2,5 \left[\log_{10} \left(\frac{f}{2} \right) \right]^2 \quad \text{дБ} \quad (45)$$

N_0 : преломляющая способность поверхности на уровне моря в центре трассы из интегральной цифровой карты N050.txt

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

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

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

где:

A_f : суммарные фиксированные объединенные потери между антеннами и структурой аномального распространения 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 учета возрастающего ослабления и длины волны при волноводном распространении:

$$A_{lf}(f) = \begin{cases} 45,375 - 137,0f + 92,5f^2 & \text{дБ} \quad \text{для } f < 0,5 \text{ ГГц} \\ 0 & \text{дБ} \quad \text{для } f \geq 0,5 \text{ ГГц} \end{cases} \quad (47a)$$

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

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

где:

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

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

$$A_{ct, cr} = \begin{cases} -3 \exp \left(-0,25 d_{ct, cr}^2 \right) \left(1 + \tanh \left[0,07 (50 - h_{ts,rs}) \right] \right) & \text{дБ} \quad \text{для } \omega \geq 0,75 \\ -3 \exp \left(-0,25 d_{ct, cr}^2 \right) \left(1 + \tanh \left[0,07 (50 - h_{ts,rs}) \right] \right) & \text{дБ} \quad \text{для } \begin{matrix} \omega \geq 0,75 \\ d_{ct, cr} \leq d_{lt,lr} \\ d_{ct, cr} \leq 5 \text{ км} \end{matrix} \\ 0 & \text{дБ} \quad \text{для всех прочих условий} \end{cases} \quad (49)$$

Полезно отметить, что уравнение (49) используется при очень ограниченном наборе условий.

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

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

где:

γ_d : конкретное ослабление:

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

θ' : угловое расстояние (при необходимости, скорректированное (при помощи уравнения (48a)), для того чтобы иметь возможность применения модели экранирования, описанной уравнением (46)):

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

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

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

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

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

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

μ_2 : корректировка геометрии 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 превышать 1.

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

где:

ε : 3,5;

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

μ_3 : корректировка неровностей местности:

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

и

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

Остальные слагаемые определены в таблицах 1 и 2 и в Прилагаемом документе 1 к настоящему Приложению.

4.6 Основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в 50% местоположений

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

Рассчитать коэффициент интерполяции F_j , который позволит учесть угловое расстояние:

$$F_j = 1,0 - 0,5 \left[1,0 + \tanh \left(3,0 \xi \frac{(\theta - \Theta)}{\Theta} \right) \right], \quad (57)$$

где:

- Θ : фиксированный параметр, определяющий диапазон углов соответствующего слияния моделей, он выставляется = 0,3 мрад;
- ξ : фиксированный параметр, определяющий спад характеристики слияния в конце диапазона, он выставлен = 0,8;
- θ : угловое расстояние (мрад), определенное в таблице 7.

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

$$F_k = 1,0 - 0,5 \left[1,0 + \tanh \left(3,0 \kappa \frac{(d - d_{sw})}{d_{sw}} \right) \right], \quad (58)$$

где:

- d : протяженность трассы по дуге большого круга (км), определенная в таблице 3;
- d_{sw} : фиксированный параметр, определяющий диапазон расстояний соответствующего слияния; он выставляется = 20;
- κ : фиксированный параметр, определяющий спад характеристики слияния на границах диапазона, устанавливается = 0,5.

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

$$L_{minb0p} = \begin{cases} L_{b0p} + (1 - \omega)L_{dp} & \text{для } p < \beta_0 \quad \text{дБ} \\ L_{bd50} + (L_{b0\beta} + (1 - \omega)L_{dp} - L_{bd50})F_i & \text{для } p \geq \beta_0 \quad \text{дБ} \end{cases}, \quad (59)$$

где:

- L_{b0p} : теоретические основные потери передачи по линии прямой видимости, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, определяемые уравнением (10);
- $L_{b0\beta}$: теоретические основные потери передачи по линии прямой видимости, которые не превышаются в течение $\beta_0\%$ времени, определяемые уравнением (11);
- L_{dp} : потери из-за дифракции, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, определяемые уравнением (41);
- L_{bd50} : средние основные потери из-за дифракции, определяемые уравнением (42);
- F_i : коэффициент интерполяции дифракции, определяемый уравнением (40).

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

$$L_{minbap} = \eta \ln \left[\exp \left(\frac{L_{ba}}{\eta} \right) + \exp \left(\frac{L_{b0p}}{\eta} \right) \right] \quad \text{дБ}, \quad (60)$$

где:

L_{ba} : основные потери передачи, обусловленные атмосферным волноводом и отражением от слоев атмосферы, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, определяемые уравнением (46);

L_{b0} : теоретические основные потери передачи по линии прямой видимости, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, определяемые уравнением (10);

$\eta = 2,5$.

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

$$L_{bda} = \begin{cases} L_{bd} & \text{для } L_{minbap} > L_{bd} \\ L_{minbap} + (L_{bd} - L_{minbap})F_k & \text{для } L_{minbap} \leq L_{bd} \end{cases} \quad \text{дБ}, \quad (61)$$

где:

L_{bd} : основные потери передачи из-за дифракции, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, из уравнения (43);

L_{minbap} : теоретические минимальные основные потери передачи, обусловленные распространением по линии прямой видимости и загоризонтным распространением, из уравнения (60);

F_k : коэффициент интерполяции, определяемый уравнением (58), в соответствии со значением расстояния трассы по дуге большого круга d .

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

$$L_{ban} = L_{bda} + (L_{minb0p} - L_{bda})F_j \quad \text{дБ}, \quad (62)$$

где:

L_{bda} : теоретические основные потери передачи, обусловленные дифракцией и распространением по линии прямой видимости или в атмосферном волноводе/из-за отражения от слоев атмосферы, определяемые уравнением (61);

L_{minb0p} : теоретические минимальные основные потери передачи, обусловленные распространением по линии прямой видимости и дифракцией на морских участках трассы, определяемые уравнением (59);

F_j : коэффициент интерполяции, определяемый уравнением (57), в соответствии с величиной углового расстояния трассы θ .

Рассчитать основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени и для 50% местоположений L_{bc} (дБ), используя выражение:

$$L_{bc} = -5 \log(10^{-0,2L_{bs}} + 10^{-0,2L_{bam}}) \quad \text{дБ}, \quad (63)$$

где:

L_{bs} : основные потери передачи из-за тропосферного рассеяния, которые не превышаются в течение $p\%$ времени, определяемые уравнением (44);

L_{bam} : измененные основные потери передачи, учитывающие изменение сигнала из-за дифракции, распространения по линии прямой видимости, распространения в атмосферном волноводе и отражения от слоев атмосферы, определяемые уравнением (62).

4.7 Изменчивость местоположения потерь

В настоящей Рекомендации, и в общем случае, изменчивость местоположения относится к пространственным статистическим данным о вариативности местного земного покрова. Этот результат полезен в масштабах гораздо более широких, чем вариативность свойств наземного покрова, и по сравнению с ними изменение трассы является несущественным. Изменчивость местоположения определяется без учета изменений, вносимых многолучевыми отражениями, поэтому она не зависит от полосы частот системы.

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

Результаты всестороннего анализа данных показывают, что распределение местных средних значений напряженности поля из-за изменений наземного покрова является аппроксимативно логарифмически нормальным.

Значения стандартной девиации зависят от разрешающей способности прогнозирования и частоты, и эмпирические исследования показали наличие разброса. Характерные значения, которые относятся к 50-му перцентилю распределения стандартной девиации изменчивости местоположения, определяются следующим выражением:

$$\sigma_L = (0,024f + 0,52)w_a^{0,28} \quad \text{дБ}, \quad (64)$$

где:

f : требуемая частота (ГГц);

w_a : разрешающая способность прогнозирования (м).

Разрешающая способность прогнозирования – это ширина квадратной зоны, в которой применяется изменчивость. Процент местоположений $p_L\%$ может меняться от 1% до 99%. Настоящая модель недействительна для процента местоположений менее 1% или более 99%.

Значения, приведенные в таблице 6, считаются приемлемыми для планирования услуг цифрового наземного телевидения (ЦНТ). Они соответствуют 93-му перцентилю функции кумулятивного распределения измерений для антенны на высоте крыши для зоны 100×100 м.

ТАБЛИЦА 6

Значения стандартной девиации изменчивости местоположения, используемые в определенных сценариях планирования

	Стандартная девиация (дБ)		
	100 МГц	600 МГц	2 000 МГц
Радиовещание, ЦНТ	5,5	5,5	5,5

Когда приемник/мобильная станция расположены на суше и вне здания, а его/ее высота над уровнем земли равна или выше высоты типичного отражающего препятствия, разумно предположить, что изменчивость местоположения будет монотонно уменьшаться с увеличением высоты, до тех пор пока она полностью не исчезнет в какой-то точке. В настоящей Рекомендации изменчивость местоположения из-за изменения высоты $u(h)$ определяется выражением:

$$\begin{aligned}
u(h) &= 1 && \text{для } 0 \leq h < R, \\
u(h) &= 1 - \frac{(h-R)}{10} && \text{для } R \leq h < R+10, \\
u(h) &= 0 && \text{для } R+10 \leq h,
\end{aligned} \tag{65}$$

где R (м) – высота типичного отражающего препятствия в месте размещения приемника/мобильной станции. Следовательно, для приемника/мобильной станции, находящихся вне зданий, стандартная девиация изменчивости местоположения, σ_L , определяемая либо из уравнения (64), либо по таблице 6, должна быть умножена на функцию изменения высоты $u(h)$, определяемую из уравнения (65), при расчете величины основных потерь передачи для значений $p_L\%$, не равных 50%.

4.8 Потери на проникновение сигнала в здание

Определения, теоретические модели и ссылки на полученные эмпирическим путем результаты, относящиеся к потерям на проникновение в здание, представлены в Рекомендации МСЭ-R P.2040.

Изменение напряженности поля для приема внутри зданий – это комбинированный результат изменений напряженности поля вне зданий (σ_L) и изменения из-за ослабления в здании (σ_{be}) (см. Рекомендацию МСЭ-R P.2040). Эти значения, по всей вероятности, не коррелированы. Следовательно, стандартную девиацию для приема внутри зданий (σ_i) можно рассчитать как квадратный корень из суммы квадратов отдельных значений стандартной девиации.

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_{be}^2} \quad \text{дБ}, \tag{66}$$

где σ_L – стандартная девиация изменчивости местоположения, определяемая из уравнения (64) или по таблице 6.

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

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

$$L_{loc} = 0 \quad (\text{вне зданий}) \quad \text{дБ}, \tag{67a}$$

$$L_{loc} = L_{be} \quad (\text{внутри зданий}) \quad \text{дБ} \tag{67b}$$

и

$$\sigma_{loc} = u(h)\sigma_L \quad (\text{вне зданий}) \quad \text{дБ}, \tag{68a}$$

$$\sigma_{loc} = \sigma_i \quad (\text{внутри зданий}) \quad \text{дБ}, \tag{68b}$$

где средние потери на проникновение сигнала в здание L_{be} приведены в Рекомендации МСЭ-R P.2040, функция высоты $u(h)$ определяется из уравнения (65), а значения стандартной девиации σ_L и σ_i берутся из уравнения (64) (или таблицы 6) и уравнения (66), соответственно.

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

$$L_b = \max \left[L_{b0p}, L_{bc} + L_{loc} - I \left(\frac{p_L}{100} \right) \sigma_{loc} \right] \quad \text{дБ}, \tag{69}$$

где:

- L_{b0p} : основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в 50% местоположений, обусловленные распространением по линии прямой видимости с кратковременными выбросами, определяемые уравнением (10);
- L_{bc} : основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в 50% местоположений, с учетом влияния потерь из-за отражений от терминала, определяемые уравнением (63);

- L_{loc} : среднее значение потерь в конкретном местоположении, определяемое уравнениями (67a)–(67b);
- $I(x)$: обратное дополнительное кумулятивное нормальное распределение в зависимости от вероятности x . Аппроксимация зависимости $I(x)$, которая может использоваться для $0,000001 \leq x \leq 0,999999$, приведена в Прилагаемом документе 2 к настоящему Приложению;
- σ_{loc} : комбинированная стандартная девиация (т. е. учитывающая потери на проникновение сигнала в здание и потери на изменчивость местоположения), определяемые уравнениями (68a)–(68b).

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

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

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

$$E_p = 199,36 + 20 \log(f) - L_b \quad \text{дБ(мкВ/м)}, \quad (70)$$

где:

- L_b : основные потери передачи, которые не превышаются в течение $p\%$ времени в $p_L\%$ местоположений, рассчитанные по уравнению (69);
- f : требуемая частота (ГГц).

Прилагаемый документ 1 к Приложению

Анализ профиля трассы

1 Введение

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

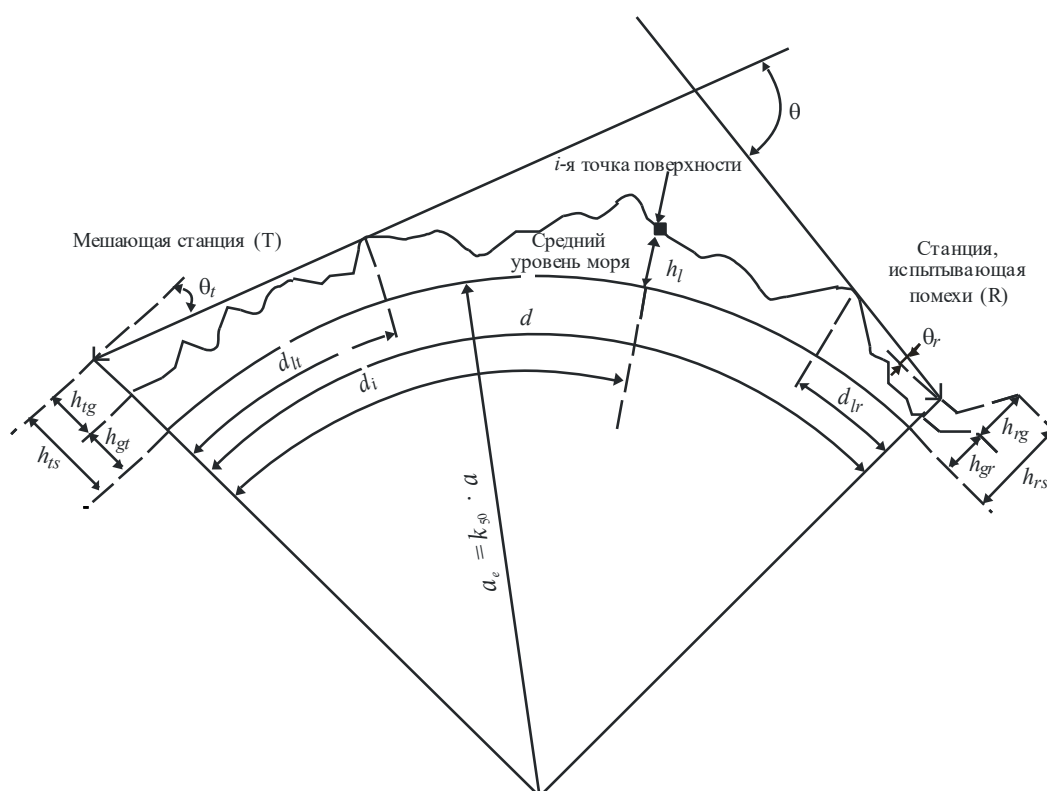
2 Формирование профиля трассы

На основании географических координат передающей (ϕ_t, ψ_t) и приемной (ϕ_r, ψ_r) станций, из базы топографических данных или из соответствующих топографических карт большого масштаба необходимо получить значения высоты местности (над средним уровнем моря) вдоль трассы по дуге большого круга. Разрешающая способность профиля по расстоянию должна быть такой, какая требуется для данного типа рельефа местности. Как правило, в зависимости от задачи, берется шаг расстояния от 30 м до 1 км. Для более длинных трасс обычно используются большие шаги расстояний. Профиль должен учитывать высоты земной поверхности в местах размещения передающей и приемной станций, которые являются начальной и конечной точками трассы. Приведенные далее уравнения учитывают, при необходимости, кривизну Земли, основываясь на значении a_e , полученном из уравнения (7a).

Хотя предпочтительным считается случай, когда точки профиля распределены равномерно, этот метод можно использовать с неравномерно распределенными точками профиля. Это может быть удобным, когда профиль строится по цифровой карте контуров высоты местности. Однако следует отметить, что настоящая Рекомендация была разработана на основе измерений для равномерно распределенных точек профиля; и в настоящее время отсутствует информация о том, каким образом на точность расчетов будет влиять неравномерное распределение точек профиля.

В настоящей Рекомендации точка профиля трассы в месте расположения передающей станции считается точкой 1, а точка профиля трассы в месте расположения приемной станции считается точкой n . Следовательно, профиль трассы состоит из n точек. На рисунке 1 показан пример профиля высоты местности выше среднего уровня моря, где хорошо видны различные параметры реальной местности.

РИСУНОК 1
Пример профиля (тропосферной) трассы



Примечание 1. – Значение θ_i , так как показано здесь, будет отрицательным.

P.1812-01

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

ТАБЛИЦА 7

Определения параметров профиля трассы

Параметр	Описание
a	Средний фактический радиус Земли (6 371 км)
a_e	Эффективный радиус Земли (км)
d	Расстояние на трассе вдоль дуги большого круга (км)
d_i	Расстояние вдоль дуги большого круга от передатчика до i -й точки профиля
d_{ii}	Длина приращения для регулярных (т. е. с равномерно распределенными точками) данных профиля трассы (км)
f	Частота (ГГц)
λ	Длина волны (м)
h_{ts}	Высота антенны передатчика (м) над средним уровнем моря
h_{rs}	Высота антенны приемника (м) над средним уровнем моря
θ_t	Для загоризонтной трассы угол места горизонта выше местного горизонта (мрад), измеренный от передающей антенны. Для трассы LoS эта величина должна быть равна углу места приемной антенны.
θ_r	Для загоризонтной трассы угол места горизонта выше местного горизонта (мрад), измеренный от приемной антенны. Для трассы LoS эта величина должна быть равна углу места передающей антенны.
θ	Угловое расстояние трассы (мрад)
h_{st}	Высота гладкой земной поверхности над средним уровнем моря в месте размещения передающей станции (м)
h_{sr}	Высота гладкой земной поверхности над средним уровнем моря в месте размещения приемной станции (м)
h_i	Высота i -й точки местности над средним уровнем моря (м) h_1 : высота земной поверхности для передатчика h_n : высота земной поверхности для приемника
h_m	Неровность местности (м)
h_{te}	Эффективная высота передающей антенны (м)
h_{re}	Эффективная высота приемной антенны (м)

3 Протяженность трассы

Протяженность трассы можно рассчитать с использованием геометрии большого круга (на основании среднего фактического радиуса Земли a), зная географические координаты передающей (φ_t, ψ_t) и приемной (φ_r, ψ_r) станций. Кроме того, протяженность трассы может быть рассчитана из профиля трассы. В общем случае протяженность трассы d (км) можно рассчитать, используя данные профиля трассы:

$$d = d_n \quad \text{км.} \quad (71)$$

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

$$d_i = (i-1)d_{ii} \quad \text{км} \quad (72)$$

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

4 Классификация трасс

Трасса должна классифицироваться как трасса LoS или загоризонтная трасса только для определения расстояний d_{lt} и d_{lr} и углов места θ_t и θ_r , см. ниже.

Профиль трассы следует использовать для определения, является ли трасса трассой LoS или загоризонтной трассой, на основании среднего эффективного радиуса Земли a_e , найденного из уравнения (7a).

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

Следовательно, условием загоризонтной трассы является:

$$\theta_{max} > \theta_{td} \quad \text{мрад,} \quad (73)$$

где:

$$\theta_{max} = \max_{i=2}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{мрад;} \quad (74)$$

θ_i : угол места в направлении i -й точки местности;

$$\theta_i = 1000 \arctan \left(\frac{h_i - h_{ts}}{10^3 d_i} - \frac{d_i}{2 a_e} \right) \quad \text{мрад,} \quad (75)$$

где:

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

h_{ts} : высота антенны передатчика (м) над средним уровнем моря;

d_i : расстояние от передатчика до i -й точки местности (км);

$$\theta_{td} = 1000 \arctan \left(\frac{h_{rs} - h_{ts}}{10^3 d} - \frac{d}{2 a_e} \right) \quad \text{мрад,} \quad (76)$$

где:

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

d : общее расстояние на трассе вдоль дуги большого круга (км);

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

5 Получение необходимых параметров из профиля трассы

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

5.1 Угол места горизонта передающей антенны над уровнем местного горизонта θ_t

Угол места горизонта для передающей антенны относительно местного горизонта определяется следующим выражением:

$$\theta_t = \max (\theta_{max}, \theta_{td}) \quad \text{мрад,} \quad (77)$$

где θ_{max} определяется из уравнения (74). Таким образом, для трассы LoS угол места горизонта для передающей антенны – это угол места относительно прямой линии до приемной антенны.

5.2 Расстояние прямой видимости для передающей антенны d_{lt}

Расстояние прямой видимости – это минимальное расстояние от передатчика, при котором из уравнения (74) вычисляется максимальный угол места горизонта антенны.

$$d_{lt} = d_i \quad \text{км} \quad \text{при } \max(\theta_i) \quad (78)$$

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

$$v_{\max} = \max \left\{ \left[h_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts}(d - d_i) + h_{rs} d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\}, \quad (78a)$$

где номер профиля i принимает значения от 2 до $n - 1$, а C_e – эффективная кривизна Земли определяется в п. 4.3.1 Приложения 1.

5.3 Угол места горизонта приемной антенны над уровнем местного горизонта θ_r

Для трассы LoS θ_r определяется выражением:

$$\theta_r = 1000 \arctan \left(\frac{h_{ts} - h_{rs}}{10^3 d} - \frac{d}{2a_e} \right) \quad \text{мрад.} \quad (79)$$

В ином случае θ_r определяется выражением:

$$\theta_r = \max_{j=2}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{мрад,} \quad (80)$$

$$\theta_j = 1000 \arctan \left[\frac{h_j - h_{rs}}{10^3 (d - d_j)} - \frac{d - d_j}{2a_e} \right] \quad \text{мрад.} \quad (80a)$$

5.4 Расстояние прямой видимости для приемной антенны d_{lr}

Расстояние прямой видимости – это минимальное расстояние от приемника, при котором из уравнения (80) вычисляется максимальный угол места горизонта антенны.

$$d_{lr} = d - d_j \quad \text{км} \quad \text{при } \max(\theta_j) \quad (81)$$

Для трассы LoS d_{lr} определяется следующим образом:

$$d_{lr} = d - d_{lt} \quad \text{км.} \quad (81a)$$

5.5 Угловое расстояние θ (мрад)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{мрад.} \quad (82)$$

5.6 Модель "гладкой земной поверхности" и эффективные высоты антенны

"Гладкую земную" поверхность получают из профиля для расчета эффективных высот антенны как для дифракционной модели, так и для оценки неровностей трассы, требуемой для модели распространения в атмосферном волноводе и за счет отражения от слоев атмосферы. Определения эффективных высот антенн отличаются от этих двух целей.

Раздел 5.6.1 определяет соответствие гладкой земной поверхности профилю, из которого получают значения высоты этой поверхности в местах размещения терминалов, h_{st} , и h_{sr} .

В п. 5.6.2, h_{st} и h_{sr} используются для расчета измененных значений высоты гладкой земной поверхности в местах размещения терминалов, h_{std} и h_{srd} , которые в п. 4.3.4 Приложения 1 используются при расчете эффективных высот антенны для дифракционной модели. В зависимости от профиля значения h_{std} и h_{srd} могут отличаться от h_{st} и h_{sr} , соответственно.

В п. 5.6.3 h_{st} и h_{sr} используются при расчете эффективных высот антенны h_{te} и h_{re} и параметра неровности местности h_m , требуемых для модели распространения в атмосферном волноводе и за счет отражения от слоев атмосферы, которая описана в п. 4.5 Приложения 1.

5.6.1 Определение гладкой земной поверхности

Вычислим значения высоты гладкой земной поверхности на терминалах h_{st} and h_{sr} , следующим образом:

$$v_1 = \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1}) \quad (83)$$

$$v_2 = \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1})[h_i(2d_i + d_{i-1}) + h_{i-1}(d_i + 2d_{i-1})] \quad (84)$$

$$h_{st} = \left(\frac{2v_1 d - v_2}{d^2} \right) \quad \text{м}, \quad (85)$$

$$h_{sr} = \left(\frac{v_2 - v_1 d}{d^2} \right) \quad \text{м}, \quad (86)$$

где:

h_{st} : высота над средним уровнем моря (м) гладкой земной поверхности в точке начала трассы, т. е. в месте размещения передатчика;

h_{sr} : высота над средним уровнем моря (м) гладкой земной поверхности в конце трассы, т. е. в месте размещения приемника.

5.6.2 Значения высоты гладкой земной поверхности для дифракционной модели

Найдем наибольшую высоту препятствия на прямой трассе от передатчика к приемнику h_{obs} и углы места горизонта для передающей и приемной антенн, α_{obt} и α_{obr} , основанные на геометрии плоской Земли согласно:

$$h_{obs} = \max(H_i) \quad \text{м} \quad (87a)$$

$$\alpha_{obt} = \max\left(\frac{H_i}{d_i}\right) \quad \text{мрад} \quad (87b)$$

$$\alpha_{obr} = \max\left[\frac{H_i}{(d - d_i)}\right] \quad \text{мрад}, \quad (87c)$$

где:

$$H_i = h_i - \frac{[h_{tc}(d - d_i) + h_{rc}d_i]}{d} \quad \text{м} \quad (87d)$$

и номер профиля i принимает значения от 2 до $(n - 1)$.

Рассчитаем предварительные значения высот гладкой земной поверхности на сторонах передатчика и приемника:

Если h_{obs} меньше или равно 0, то:

$$h_{stp} = h_{st} \quad \text{м над средним уровнем моря,} \quad (88a)$$

$$h_{srp} = h_{sr} \quad \text{м над средним уровнем моря;} \quad (88b)$$

в ином случае:

$$h_{stp} = h_{st} - h_{obs} g_t \quad \text{м над средним уровнем моря,} \quad (88c)$$

$$h_{srp} = h_{sr} - h_{obs} g_r \quad \text{м над средним уровнем моря,} \quad (88d)$$

где:

$$g_t = \frac{\alpha_{obt}}{(\alpha_{obt} + \alpha_{obr})}, \quad (88e)$$

$$g_r = \frac{\alpha_{obr}}{(\alpha_{obt} + \alpha_{obr})}. \quad (88f)$$

Рассчитаем окончательные значения высот гладкой земной поверхности на сторонах передатчика и приемника, требуемые для дифракционной модели:

Если h_{stp} больше чем h_1 , то:

$$h_{std} = h_1 \quad \text{м над средним уровнем моря;} \quad (89a)$$

в ином случае:

$$h_{std} = h_{stp} \quad \text{м над средним уровнем моря.} \quad (89b)$$

Если h_{srp} больше h_n , то:

$$h_{srd} = h_n \quad \text{м над средним уровнем моря;} \quad (89c)$$

в ином случае:

$$h_{srd} = h_{srp} \quad \text{м над средним уровнем моря.} \quad (89d)$$

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

Рассчитаем высоты гладкой земной поверхности в месте размещения передатчика и приемника, как это требуется для коэффициента неровности, определяемого выражением:

$$h_{st} = \min (h_{st}, h_1) \quad \text{м;} \quad (90a)$$

$$h_{sr} = \min (h_{sr}, h_n) \quad \text{м.} \quad (90b)$$

Наклон m гладкой земной поверхности необходимо рассчитывать следующим образом:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{м/км.} \quad (91)$$

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

$$h_{te} = h_{tg} + h_1 - h_{st} \quad \text{м} \quad (92a)$$

$$h_{re} = h_{rg} + h_n - h_{sr} \quad \text{м.} \quad (92b)$$

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

$$h_m = \max_{i=i_{lt}}^{i_{lr}} [h_i - (h_{st} + m d_i)] \quad \text{м,} \quad (93)$$

где:

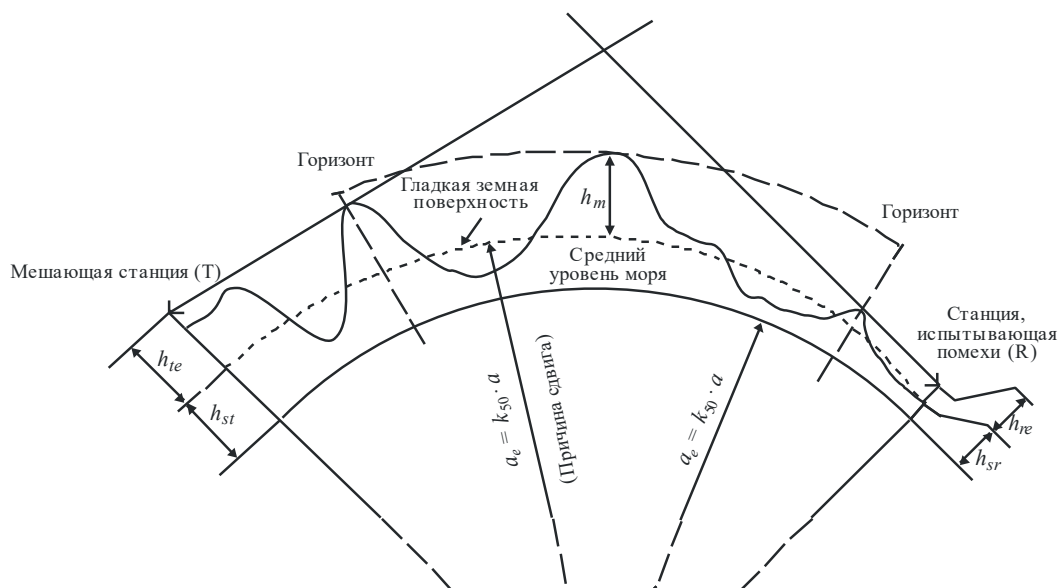
i_{lt} : номер точки профиля на расстоянии d_{lt} от передатчика;

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

Гладкая земная поверхность и параметр неровности местности h_m показаны на рисунке 2.

РИСУНОК 2

Пример гладкой земной поверхности и параметра неровности местности



P.1812-02

Прилагаемый документ 2 к Приложению

Аппроксимация функции обратного дополнительного кумулятивного нормального распределения

Приведенная далее аппроксимация функции обратного дополнительного кумулятивного нормального распределения действительна для $0,000001 \leq x \leq 0,999999$ и дает ошибку не более 0,00054. Если $x < 0,000001$, что предполагает $\beta_0 < 0,0001\%$, то x должен быть установлен в значение 0,000001. Аналогичные действия должны быть выполнены и для $x > 0,999999$. Эта аппроксимация может уверенно использоваться для интерполяционной функции в уравнениях (40) и (59), а также в уравнении (69). Однако в последнем уравнении значение x должно быть ограничено: $0,01 \leq x \leq 0,99$.

Функция $I(x)$ определяется выражением:

$$I(x) = T(x) - \xi(x) \quad \text{для } 0,000001 \leq x \leq 0,5 \quad (94a)$$

и симметрично:

$$I(x) = \xi(1-x) - T(1-x) \quad \text{для } 0,5 < x \leq 0,999999, \quad (94b)$$

где:

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]}; \quad (95a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 T(x) + C_1) T(x)] + C_0}{[(D_3 T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1}; \quad (95b)$$

$$C_0 = 2,515516698 \quad (95c)$$

$$C_1 = 0,802853 \quad (95d)$$

$$C_2 = 0,010328 \quad (95e)$$

$$D_1 = 1,432788 \quad (95f)$$

$$D_2 = 0,189269 \quad (95g)$$

$$D_3 = 0,001308. \quad (95h)$$

Прилагаемый документ 3 к Приложению

Альтернативный метод расчета потерь за счет дифракции на сферической поверхности Земли L_{bulls}

В настоящем Прилагаемом документе представлен альтернативный метод расчета L_{bulls} без использования анализа профиля местности.

Если $d < d_{los}$ (LoS), рассчитать параметр дифракции для наименьшей высоты просвета h_{se} (уравнение (23)) между трассой над криволинейной поверхностью Земли и лучом между антеннами с расстоянием d_{sel} (уравнение (24a)):

$$v_{\max} = -h_{se} \cdot \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_{sel}(d-d_{sel})}}. \quad (96)$$

Потери за счет дифракции на остром краю для данной точки описываются выражением:

$$L_{us} = J(v_{\max}) \quad \text{дБ.} \quad (97)$$

Если $d \geq d_{los}$ (непрямая видимость (NLOS)), определить наибольший наклон линии между антенной передатчика и трассой над криволинейной поверхностью Земли.

$$S_{tm} = 500 C_e d - 2 \sqrt{500 C_e h_{tesph}} \quad \text{м/км.} \quad (98)$$

Далее определить наибольший наклон линии между антенной приемника и трассой над криволинейной поверхностью Земли.

$$S_{rm} = 500 C_e d - 2\sqrt{500 C_e h_{resph}} \quad \text{м/км.} \quad (99)$$

Используя эти два наклона, рассчитать точку Буллингтона следующим образом:

$$d_s = \frac{h_{resph} - h_{tesph} + S_{rm} d}{S_{tm} + S_{rm}} \quad \text{км.} \quad (100)$$

Рассчитать параметр дифракции v_s для точки Буллингтона:

$$v_s = \left[h_{tesph} + S_{tm} d_s - \frac{h_{tesph} (d - d_s) + h_{resph} d_s}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_s (d - d_s)}}. \quad (101)$$

Потери за счет дифракции на остром краю для точки Буллингтона определяются выражением:

$$L_{us} = J(v_s) \quad \text{дБ.} \quad (102)$$

Для L_{us} рассчитанного по формуле (97) или (102), потери за счет дифракции Буллингтона на гладкой трассе определяются выражением:

$$L_{bulls} = L_{us} + \left(1 - \exp\left(\frac{-L_{us}}{6}\right) \right) (10 + 0,02d) \quad (103)$$