

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.528-5

(09/2021)

Метод прогнозирования распространения радиоволн для воздушной подвижной и радионавигационной служб, работающих в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ

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-Т/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-Т/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.528-5*,**

Метод прогнозирования распространения радиоволн для воздушной подвижной и радионавигационной служб, работающих в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ

(Вопрос МСЭ-R 203/3)

(1978-1982-1986-2012-2019-2021)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации представлен метод прогнозирования основных потерь передачи в полосе частот 100 МГц – 30 ГГц для воздушной службы. Описан пошаговый метод расчета основных потерь передачи. Единственными данными, необходимыми для расчетов по этому методу, являются расстояние между антеннами, высоты антенн над средним уровнем моря, частота, поляризация и процент времени.

Кроме того, в настоящей Рекомендации приводится расчет ожидаемого защитного отношения (или отношения полезного сигнала к мешающему), превышаемого на входе приемника в течение по крайней мере 95% времени, $R(95)$. Для этого расчета требуются следующие дополнительные данные о полезном и мешающем сигналах: передаваемая мощность, коэффициент усиления передающей антенны и коэффициент усиления приемной антенны.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что существует потребность в руководстве для инженеров по вопросам планирования служб радиосвязи в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ;
- b) что в основе модели распространения радиоволн, приведенной в Приложении 2, лежит значительный объем экспериментальных данных (см. Приложение 1);
- c) что в воздушной службе часто предусматривается функция, связанная с обеспечением безопасности человеческой жизни, и поэтому в ней предъявляются более высокие требования к готовности по сравнению со многими другими службами;
- d) что для обеспечения более высокой надежности службы, ее коэффициент готовности по времени должен составлять 95%,

рекомендует,

1 чтобы при определении значений и кривых основных потерь передачи для тех значений высоты антенн в терминалах, частот и процентов времени, которые могут быть характерны для воздушных служб, использовалось программное обеспечение, приведенное в настоящей Рекомендации;

2 чтобы следующие Примечания рассматривались как часть настоящей Рекомендации.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Следует подчеркнуть, что определяемые значения основываются на данных, полученных главным образом в условиях умеренно континентального климата.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – С помощью приведенного метода определяются основные потери передачи, то есть потери между идеальными изотропными антеннами, в которых отсутствуют собственные потери. В случае если влияние многолучевого распространения за счет отражения от поверхности ослабляется на входе земной станции или радиоприемника с помощью противовесов или направленных антенн с подходящими диаграммами излучения в вертикальной плоскости, то эти диаграммы излучения антенн следует включать в данный анализ.

* Настоящая Рекомендация предлагается вниманию 5-й Исследовательской комиссии.

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

Приложение 1

Разработка и применение данной модели

Разработаны методы прогнозирования потерь передачи, позволяющие определить основные потери передачи в течение 1–99% времени при высотах антенн, применимых для воздушных служб. В основе этих методов лежит значительный объем экспериментальных данных, а также результаты широкомасштабных сравнений прогнозов с этими данными. При таких расчетах предполагалась гладкая поверхность Земли (параметр неровности местности $\Delta h = 0$) и использовалась среднегодовая глобальная стандартная атмосфера. Модель атмосферы основана на экспоненциальной горизонтальной модели расположения слоев атмосферы, в которой выполняется трассировка лучей для учета искривления лучей из-за изменения коэффициента преломления. Кроме того, использовались константы для усредненной почвы, изотропные антенны и статистические данные о долгосрочных замираниях мощности сигналов в условиях умеренно континентального климата. Хотя для многих применений эти параметры могут считаться либо приемлемыми, либо описывающими наихудший случай, использовать соответствующие расчетные значения следует с осторожностью, если условия коренным образом отличаются от указанных выше.

За исключением области вблизи радиогоризонта, значения медианных основных потерь передачи для трасс в пределах горизонта были получены путем добавления величины ослабления за счет атмосферного поглощения (в децибелах) к потерям передачи в свободном пространстве. В области вблизи радиогоризонта значения потерь передачи рассчитывались с применением геометрической оптики, что позволяет учитывать интерференцию между прямым лучом и лучом, отраженным от земной поверхности.

Двухлучевая модель интерференции специально не использовалась для расчетов в пределах горизонта, так как лепестковая структура, получаемая в этом случае для коротких трасс, сильно зависит от характеристик поверхности (неровности местности, а также электрических постоянных), атмосферных условий (эквивалентный радиус Земли изменяется со временем) и характеристик антенны (поляризации, ориентации и диаграммы усиления). Такие кривые скорее могут ввести в заблуждение, чем оказаться полезными, так как конкретная структура лепестков сильно зависит от параметров, которые трудно определить с достаточной точностью. Вместе с тем статистический анализ лепестковой структуры производится при оценке изменчивости.

Для коэффициентов готовности по времени, отличных от 50%, полученные пользователем значения основных потерь передачи L_b не всегда возрастают монотонно с увеличением расстояния. Это происходит потому, что колебания изменчивости с расстоянием иногда могут перекрывать изменения медианного уровня. Изменчивость определяется вкладом как часовых медианных или долгосрочных замираний мощности, так и влиянием внутрисюсовых или кратковременных интерференционных замираний по фазе. Кратковременные замирания обусловлены как отражением от земной поверхности, так и тропосферной многолучевостью. Статистические данные о долгосрочных замираниях мощности сигналов основаны на большом количестве эмпирических данных, собранных в течение продолжительных периодов времени в разных местах с разной геометрией каналов.

Значения основных потерь передачи $L_b(5)$ могут использоваться для оценки значений L_b мешающего сигнала, превышаемых в течение 95% (100% – 5%) времени. Медианные условия распространения (в течение 50% времени) можно оценить по значениям $L_b(50)$. Значения $L_b(95)$ можно использовать для оценки зоны обслуживания полезного сигнала, в которой обслуживание при отсутствии помех будет обеспечиваться в течение 95% времени.

Ожидаемое защитное отношение или отношение полезного сигнала к мешающему, превышаемое на входе приемника в течение по крайней мере 95% времени $R(95)$, можно оценить следующим образом:

$$R(95) = R(50) + Y_R(95); \quad (1)$$

$$R(50) = [P_t + G_t + G_r - L_b(50)]_{Wanted} - [P_t + G_t + G_r - L_b(50)]_{Unwanted} \quad (2)$$

и

$$Y_R = -\sqrt{[L_b(95) - L_b(50)]_{Wanted}^2 + [L_b(5) - L_b(50)]_{Unwanted}^2}. \quad (3)$$

В уравнении (2) P_t – это передаваемая мощность, а G_t и G_r – коэффициенты усиления изотропных передающей и приемной антенн, выраженные в дБ.

В уравнении (3) можно легко учесть дополнительную изменчивость за счет других факторов, например коэффициентов усиления антенн, если их изменчивость поддается определению. В приведенной выше формуле для $R(95)$ подразумевается непрерывное (в течение 100% времени) или совместное использование канала, так что влияние передатчика, работающего с перерывами, должно рассматриваться отдельно.

Комплексное программное обеспечение для расчета значений и кривых основных потерь передачи и документация к нему содержатся в прилагаемом ZIP-файле [R-REC-P.528-5-202109-I!!ZIP-E.zip](#). Кроме того, в прилагаемом файле в табличной форме представлены избранные значения основных потерь передачи.

Приложение 2

Пошаговый метод

В настоящем Приложении используется правило о том, что переменные, относящиеся к нижнему терминалу (то есть к наземной станции, например высота нижнего терминала h_{r1}), даются с нижним индексом "1", а переменные, относящиеся к верхнему терминалу (то есть к станции воздушного судна, например высота верхнего терминала h_{r2}) – с нижним индексом "2". Кроме того, базовые буквы некоторых переменных указывают на соответствующие переменные:

- d – расстояние по дуге большого круга, измеренное вдоль поверхности Земли;
- r – расстояние, пройденное лучом между двумя точками пространства;
- h – высота, измеряемая над средним уровнем моря;
- z – радиус, измеряемый от центра Земли.

Для целей настоящей Рекомендации средний радиус Земли и средний уровень моря относятся к одной и той же эталонной поверхности.

1 Введение

В настоящем Приложении приведен пошаговый метод расчета основных потерь передачи для заданной пользователем трассы, определяемых следующими параметрами:

- высоты терминалов h_{r1} и h_{r2} в км над средним уровнем моря – $0,0015 \leq h_{r1,2} \leq 20$ (от 1,5 до 20 000 м);
- частота f , МГц, $100 \leq f \leq 30\,000$ МГц;
- процент времени p , $1 \leq p \leq 99$;
- расстояние d между двумя терминалами по дуге большого круга, км;
- параметр, указывающий горизонтальную или вертикальную линейную поляризацию, T_{pol} .

Для некоторых сценариев использования воздушной службы геометрия канала связи определяется углом места нижнего терминала по отношению к верхнему терминалу (а не расстоянием между терминалами по дуге большого круга). Поэтому чтобы облегчить использование настоящей Рекомендации, полезно представить следующий набор уравнений для преобразования угла места в свободном пространстве θ_{elev} в расстояние по дуге большого круга d :

$$\phi = \arcsin\left(\frac{6371+h_{r1}}{6371+h_{r2}} \cos \theta_{elev}\right) \quad (\text{рад.}); \quad (4)$$

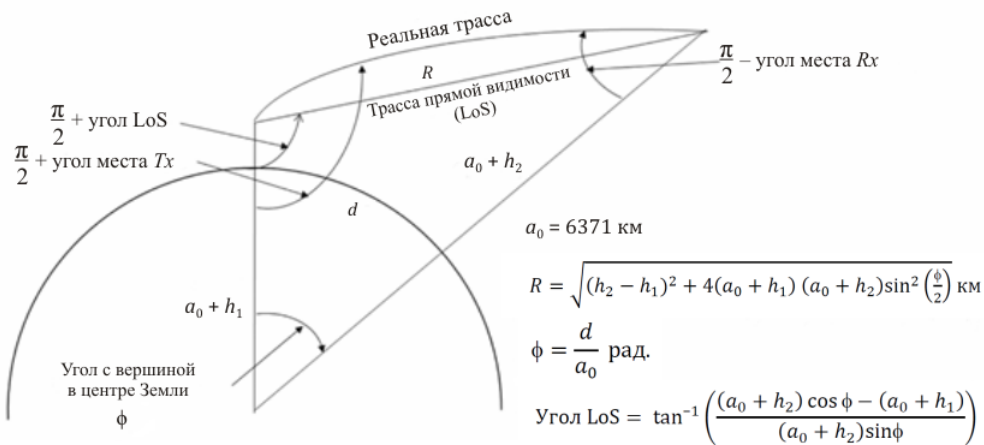
$$\theta_{ca} = \frac{\pi}{2} - \theta_{elev} - \phi \quad (\text{рад.}); \quad (5)$$

$$d = 6371\theta_{ca} \quad (\text{км}). \quad (6)$$

На рисунке 1 показаны взаимосвязи между различными параметрами, используемыми в настоящей Рекомендации.

РИСУНОК 1

Взаимосвязь между различными параметрами на линии воздух-земля



P.0528-1

Отметим, что эффекты изгиба луча на фактической трассе для наглядности преувеличены.

2 Допущения и определения

В Рекомендации МСЭ-R P.528 предполагаются следующие значения параметров:

- a_0 : средний радиус Земли. Принят равным 6371 км;
- a_e : эквивалентный радиус Земли. Принят равным 9257 км;
- ϵ_r : относительная диэлектрическая проницаемость. Принята равной 15 (соответствует значению для усредненной почвы);
- σ : удельная электропроводность. Принята равной 0,005 См/м (соответствует значению для усредненной почвы).

3 Пошаговый метод

Шаг 3-1. Рассчитать параметры для каждого терминала. Это требует выполнения пошаговых действий, приведенных в пункте 4, для нижнего и верхнего терминалов. По завершении переходить к шагу 3-2. Использовать расчеты по пункту 4 следующим образом:

дано:

- $h_{r1,2}$: высота терминала над средним уровнем моря, км;

- f : частота, МГц;
- найти:
- $d_{r1,2}$: расстояние по дуге большого круга до видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, км;
- $\theta_{r1,2}$: угол падения скользящего луча от видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, рад.;
- $h_{e1,2}$: эффективная высота терминала, км;
- $\Delta h_{1,2}$: поправка к высоте терминала, км;
- $A_{a1,2}$: средние потери на атмосферное поглощение для луча от терминала до видимого с него горизонта гладкой поверхности Земли, дБ;
- $r_{1,2}$: длина трассы луча от терминала до видимого с него горизонта гладкой поверхности Земли, км.

Шаг 3-2. Определить максимальное расстояние прямой видимости d_{ML} между двумя терминалами:

$$d_{ML} = d_{r1} + d_{r2} \quad (\text{км}). \quad (7)$$

Шаг 3-3. Дифракция над гладкой поверхностью Земли моделируется в настоящей Рекомендации линейной зависимостью. Для этого выбираются два расстояния, намного превышающие d_{ML} , рассчитываются дифракционные потери над гладкой поверхностью Земли на этих расстояниях и строится дифракционная линия, проходящая через обе получившиеся точки.

Шаг 3-3.1. Рассчитать два расстояния d_3 и d_4 , намного превышающие максимальное расстояние прямой видимости d_{ML} , определяемое по формуле (7):

$$d_3 = d_{ML} + 0,5(a_e^2/f)^{1/3} \quad (\text{км}); \quad (8)$$

$$d_4 = d_{ML} + 1,5(a_e^2/f)^{1/3} \quad (\text{км}). \quad (9)$$

Шаг 3-3.2. Рассчитать дифракционные потери A_{d3} и A_{d4} на расстояниях d_3 и d_4 соответственно. Для этого необходимо выполнить действия из пункта 10 дважды – по одному разу для каждого расстояния $d_{3,4}$. По завершении переходить к шагу 3-3.3. Использовать расчеты по пункту 10 следующим образом:

дано:

- $d_{3,4}$: рассматриваемое расстояние d_0 , необходимое для расчетов по пункту 10, км;
- $d_{r1,2}$: расстояние по дуге большого круга до видимого горизонта гладкой поверхности Земли от терминалов h_1 и h_2 , км, определяемое согласно шагу 3-1 (см. выше);
- f : частота, МГц;
- T_{pol} : параметр, указывающий горизонтальную или вертикальную линейную поляризацию;

найти:

- $A_{d3,4}$: дифракционные потери над гладкой поверхностью Земли A_d для расстояния $d_{3,4}$, дБ.

Шаг 3-3.3. Построить дифракционную линию над гладкой поверхностью Земли исходя из значений потерь A_{d3} и A_{d4} на расстояниях d_3 и d_4 соответственно, вычислив крутизну наклона M_d и отрезок прямой A_{d0} :

$$M_d = (A_{d4} - A_{d3}) / (d_4 - d_3) \quad (\text{дБ/км}); \quad (10)$$

$$A_{d0} = A_{d4} - M_d d_4 \quad (\text{дБ}). \quad (11)$$

Шаг 3-3.4. Рассчитать дифракционные потери на расстоянии d_{ML} :

$$A_{dML} = M_d d_{ML} + A_{d0} \quad (\text{дБ/км}). \quad (12)$$

Шаг 3-3.5. Рассчитать расстояние d_d , на котором, согласно дифракционной модели, предполагается уровень потерь в 0 дБ:

$$d_d = -(A_{d0}/M_d) \quad (\text{км}). \quad (13)$$

Шаг 3-4. Определить, находится ли трасса в зоне прямой видимости или же она загоризонтная для заданного расстояния d . Если $d < d_{ML}$, трасса находится в зоне прямой видимости, и переходить к шагу 3-5. В противном случае трасса является загоризонтной – и переходить к шагам 3-6 – 3-12.

Шаг 3-5. Ссылка на пункт 6 для расчетов на трассе в зоне прямой видимости.

Шаг 3-6. В загоризонтной области ($d \geq d_{ML}$) с увеличением расстояния на трассе распространения начинается дифракция над гладкой поверхностью Земли с последующим переходом на тропосферное рассеяние. Модели дифракции над гладкой поверхностью Земли и тропосферного рассеяния должны быть физически согласованы в точке перехода, то есть в этой точке между ними не должно быть разрыва. Так как модель тропосферного рассеяния нелинейна, непрерывность перехода между двумя моделями обеспечивается выполнением следующей итеративной процедуры.

Шаг 3-6.1. Пусть d' и d'' – итеративные тестовые расстояния, которым задаются следующие начальные значения:

$$d' = d_{ML} + 3 \quad (\text{км}); \quad (14)$$

$$d'' = d_{ML} + 2 \quad (\text{км}). \quad (15)$$

Шаг 3-6.2. Рассчитать потери на тропосферное рассеяние A'_s и A''_s на расстояниях d' и d'' соответственно. Для этого используются шаги, описанные в пункте 11, для обоих расстояний d' и d'' . Использовать расчеты по пункту 11 следующим образом:

дано:

- d : рассматриваемые расстояния d' и d'' , км;
- $d_{r1,2}$: расстояние по дуге большого круга до видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, км;
- f : частота, МГц;
- $h_{e1,2}$: эффективная высота терминала, км;

найти:

- A_s : потери на тропосферное рассеяние, соответствующие d' и d'' , дБ.

Шаг 3-6.3. Вычислить крутизну наклона M_s линии тропосферного рассеяния, проходящей через две точки (d', A'_s) и (d'', A''_s) , взятые из шага 3-6.2. Эта линия приблизительно является касательной к модели тропосферного рассеяния на расстоянии d' :

$$M_s = \frac{A'_s - A''_s}{d' - d''} \quad (\text{дБ/км}). \quad (16)$$

Шаг 3-6.4. Сравнить крутизну наклона M_s с крутизной наклона M_d дифракционной линии из формулы (10). Если $M_s > M_d$, увеличить оба расстояния d' и d'' на 1 км и вернуться к шагу 3-6.2 для продолжения итерации. В противном случае переходить к шагу 3-6.5.

Шаг 3-6.5. Результаты модели тропосферного рассеяния недействительны, если они меньше 20 дБ. Если либо A'_s , либо A''_s меньше 20 дБ, увеличить оба расстояния d' и d'' на 1 км и вернуться к шагу 3-6.2 для продолжения итерации. В противном случае переходить к шагу 3-6.6.

Шаг 3-6.6. При $M_s \leq M_d$ расстояние d' представляет собой приблизительное расстояние, на котором справедливо одно из двух.

Случай 1. Дифракционная модель гарантированно пересекается с моделью тропосферного рассеяния на некотором расстоянии $\geq d'$ ввиду поведения субмодели. Следовательно, модели потерь на распространение в загоризонтной области физически согласуются.

Случай 2. Дифракционная линия параллельна касательной к кривой потерь на модели тропосферного рассеяния. Однако потери на распространение в загоризонтной области могут быть физически не согласованы, то есть в точке перехода между ними возможен разрыв.

Чтобы определить, какой из случаев имеет место, найти дифракционные потери на расстоянии d'' :

$$A_d'' = M_d d'' + A_{d0} \quad (\text{дБ}). \quad (17)$$

Если $A_s'' \geq A_d''$, имеет место случай 1 и расчеты переходят к шагу 3-7. В противном случае наклон дифракционной линии необходимо скорректировать, чтобы она проходила через точку касания d' и тем самым обеспечивала физическую согласованность модели загоризонтного распространения. Для этого строят новую дифракционную линию над гладкой поверхностью Земли, проходящую через точки $(d_{ML}, A_{d_{ML}})$ и (d'', A_s'') , после чего пересчитывают параметры этой линии:

$$M_d = \frac{A_s'' - A_{d_{ML}}}{d'' - d_{ML}} \quad (\text{дБ/км}); \quad (18)$$

$$A_{d0} = A_s' - M_d d' \quad (\text{дБ}). \quad (19)$$

Теперь модели потерь на распространение в загоризонтной области физически согласуются и следует перейти к шагу 3-7.

Шаг 3-7. Рассчитать A_T , то есть потери, которые не отражены в потерях на распространение в свободном пространстве, и потери на атмосферное поглощение. Они определяются на основании моделей дифракции и тропосферного рассеяния с учетом поправок, внесенных согласно шагу 3-6.

Шаг 3-7.1. Рассчитать прогнозируемые дифракционные потери над гладкой поверхностью Земли A_d для расстояния d вдоль трассы:

$$A_d = M_d d + A_{d0} \quad (\text{дБ}). \quad (20)$$

Шаг 3-7.2. Рассчитать потери на тропосферное рассеяние A_s для расстояния d вдоль трассы. Использовать расчеты по пункту 7 следующим образом:

дано:

- d : расстояние по дуге большого круга между двумя терминалами, км;
- $d_{r1,2}$: расстояние по дуге большого круга до видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, км;
- f : частота, МГц;
- $h_{e1,2}$: эффективная высота терминалов, км;

найти:

- A_s : потери на тропосферное расстояние, дБ;
- h_v : высота до границы общего объема, км;
- θ_s : угол рассеяния, рад.

Шаг 3-7.3. Выбрать значение потерь исходя из нижеследующих условий:

если $d < d'$ (с d' , полученным на последней итерации согласно шагу 3-6), то

$$A_T = A_d \quad (\text{дБ}); \quad (21)$$

иначе, в зависимости от того, какой из двух случаев имел место согласно шагу 3-6.6:

$$A_T = \begin{cases} \min(A_d, A_s), & \text{случай 1 является справедливым (TRUE);} \\ A_s, & \text{случай 2 является справедливым (TRUE).} \end{cases} \quad (\text{дБ}) \quad (22)$$

Шаг 3-8. Выполнить следующие расчеты методом трассировки лучей, определяемым в пункте 5:

дано:

- h_v : высота до границы общего объема (согласно шагу 3-7.2), км;
- f : частота, МГц;

найти:

A_{av} : средние потери на атмосферное поглощение для луча вдоль трассы от терминала до видимого с него горизонта гладкой поверхности Земли, дБ;

r_v : длина трассы луча от горизонта до границы общего объема, км.

Шаг 3-9. Рассчитать общие средние потери на атмосферное поглощение A_a в децибелах для трассы, используя результаты шагов 3-1 и 3-8:

$$A_a = A_{a1} + A_{a2} + 2A_{av} \quad (\text{дБ}). \quad (23)$$

Шаг 3-10. Рассчитать потери в свободном пространстве A_{fs} в децибелах для трассы:

$$r_{fs} = r_1 + r_2 + 2r_v \quad (\text{км}); \quad (24)$$

$$A_{fs} = 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} r_{fs} + 32,45 \quad (\text{дБ}). \quad (25)$$

Шаг 3-11. Рассчитать долгосрочные потери, обусловленные изменчивостью $Y(p)$, для процента времени p согласно пункту 12. Затем переходить к шагу 3-12.

Дано:

$h_{r1,2}$: высота терминалов над средним уровнем моря, км;

d : расстояние между терминалами по дуге большого круга, км;

f : частота, МГц;

p : процент времени;

A_T : потери, рассчитанные на шаге 3-7.3, дБ;

θ_s : угол рассеяния, рассчитанный на шаге 3-7.2, рад.;

найти:

$Y(p)$: долгосрочные потери, обусловленные изменчивостью $Y_{total}(p)$, дБ.

Шаг 3-12. Рассчитать основные потери передачи L_b , дБ:

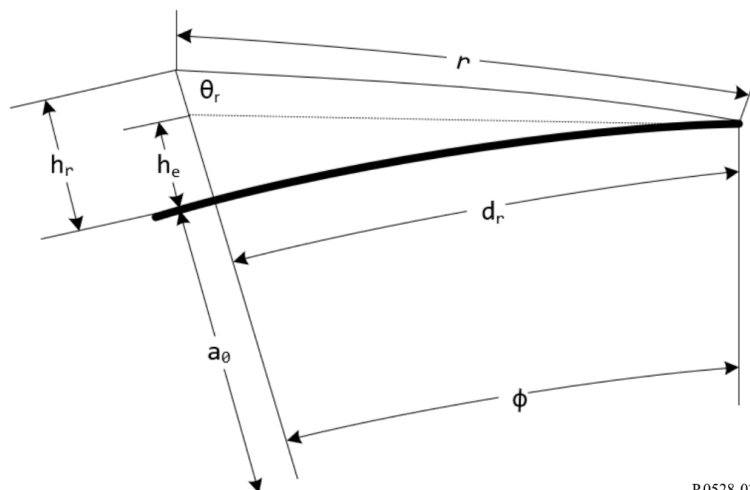
$$L_b = A_{fs} + A_a + A_T + Y(p) \quad (\text{дБ}). \quad (26)$$

На этом пошаговая процедура расчета загоризонтной трассы по заданным пользователем входным параметрам завершается.

4 Параметры терминала

РИСУНОК 2

Геометрические параметры, связанные с терминалом



В этом разделе рассчитываются следующие параметры, связанные с терминалом, как показано на рисунке 2.

Дано:

h_r : высота терминала над средним уровнем моря, км;

f : частота, МГц;

найти:

d_r : расстояние по дуге большого круга до видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, км;

θ_r : угол падения скользящего луча от видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, рад.;

h_e : эффективная высота терминала, км;

Δh : поправка к высоте терминала, км;

A_a : средние потери на атмосферное поглощение для луча от терминала до видимого с него горизонта гладкой поверхности Земли, дБ;

r : длина трассы луча от терминала до видимого с него горизонта гладкой поверхности Земли, км.

Шаг 4-1. Выполнить следующие расчеты методом трассировки лучей, определяемым в пункте 5:

дано:

h_r : высота терминала над средним уровнем моря, км;

f : частота, МГц;

найти:

d_r : расстояние по дуге большого круга до видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, км;

θ_r : угол падения скользящего луча от видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, рад.;

A_a : средние потери на атмосферное поглощение для луча от терминала до видимого с него горизонта гладкой поверхности Земли, дБ;

r : длина трассы луча от терминала до видимого с него горизонта гладкой поверхности Земли, км.

Шаг 4-2. Вычислить эффективную высоту терминала h_e , км:

$$\phi = d_r / a_e \quad (\text{рад.}); \quad (27)$$

$$h_e = \frac{a_e}{\cos \phi} - a_e \quad (\text{км}). \quad (28)$$

Шаг 4-3. Вычислить поправку к высоте терминала Δh :

$$\Delta h = h_r - h_e \quad (\text{км}). \quad (29)$$

На этом расчет параметров терминала завершен.

5 Трассировка лучей

Радиоволны в атмосфере отклоняются из-за изменений градиента атмосферной рефракции. В традиционных моделях наземного распространения этот эффект обычно учитывается при использовании стандартного метода "4/3 Earth", в котором моделируется линейный градиент атмосферной рефракции и который является допустимой аппроксимацией для трасс, пролегающих вблизи поверхности. Однако в действительности градиент атмосферной рефракции имеет экспоненциальный характер, и на трассах распространения воздух-земля применение линейной модели может внести значительные погрешности.

В настоящей Рекомендации для вычисления траектории луча через атмосферу используются методы трассировки лучей, определенные в Приложении 1 к Рекомендации МСЭ R P.676-12. Атмосфера – это среднегодовая глобальная стандартная атмосфера, определенная в Рекомендации МСЭ-R P.835-6.

Дано:

- h_r : высота терминала над средним уровнем моря, км;
 f : частота, МГц;

найти:

- d_r : расстояние по дуге большого круга до видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, км;
 θ_r : угол падения скользящего луча от видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, рад.;
 A_a : средние потери на атмосферное поглощение для луча от терминала до видимого с него горизонта гладкой поверхности Земли, дБ;
 r : длина трассы луча от терминала до видимого с него горизонта гладкой поверхности Земли, км (в Рекомендации МСЭ-R P.676-12 обозначена символом a);
 τ : угол отклонения трассы луча (в Рекомендации МСЭ-R P.676-12 обозначен *bending*).

Шаг 5-1. Используя Приложение 1 к Рекомендации МСЭ-R P.676-12, проследить скользящий луч ($\beta = \pi/2$) от поверхности Земли до высоты терминала h_r .

В процессе трассировки луча вычислить общий угол отклонения луча τ (в Рекомендации МСЭ-R P.676-12 обозначен *bending*), атмосферное поглощение луча вдоль трассы A_a и длину трассы луча r (в Рекомендации МСЭ-R P.676-12 обозначается символом a).

Шаг 5-2. Вычислить угол θ_r падения луча на терминал. Шаг 5-1 приводит к конечному углу α_i , который измеряется относительно зенита:

$$\theta_r = \frac{\pi}{2} - \alpha_i \quad (\text{рад.}) \quad (30)$$

Шаг 5-3. Вычислить расстояние по дуге большого круга вдоль поверхности Земли между терминалом и видимым с него горизонтом гладкой поверхности Земли, используя центральный угол ϕ :

$$\phi = \theta_r + \tau \quad (\text{рад.}); \quad (31)$$

$$d_r = \phi a_0 \quad (\text{км}). \quad (32)$$

На этом раздел, посвященный трассировке лучей, завершается.

6 Зона прямой видимости

В этом разделе описана пошаговая процедура расчета потерь на распространение для трассы, пролегающей в зоне прямой видимости.

Дано:

- d_{ML} : максимальное расстояние прямой видимости из уравнения (7), км;
 d_d : расстояние, на котором модель дифракции предсказывает потери 0 дБ из уравнения (13), км;
 $h_{e1,2}$: эффективная высота терминалов, км;
 $d_{r1,2}$: расстояние по дуге большого круга до видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, км;
 f : частота, МГц;
 A_{dML} : дифракционные потери на расстоянии d_{ML} из уравнения (12), км;

- p : процент времени;
 d : расстояние между терминалами по дуге большого круга, км;

найти:

- L_b : основные потери передачи, дБ;
 K : вспомогательная величина для последующих вычислений, связанных с изменчивостью.

Шаг 6-1. Вычислить длину волны λ :

$$\lambda = 0,2997925/f \quad (\text{км}). \quad (33)$$

Шаг 6-2. Определить ψ_{limit} , угол отражения, соответствующий расстоянию, на котором $\Delta r = \lambda/2$, где Δr – разница в длине луча между прямым и непрямым лучами. Для определения ψ_{limit} рекуррентно применять метод лучевой оптики, описанный в пункте 7, выполняя двоичный поиск значения ψ_{limit} . Обновить значение ψ_{limit} на основе отношения, согласно которому увеличение ψ приводит к увеличению Δr . Использовать пункт 7 следующим образом:

дано:

- ψ : угол отражения луча, рад.;
 $h_{r1,2}$: высоты терминалов над средним уровнем моря, км;
 $\Delta h_{1,2}$: поправки к высотам терминалов, км;

найти:

- Δr : разность значений длины прямого и непрямого лучей, км;
 d : расстояние по дуге большого круга между терминалами, соответствующее углу отражения ψ , км.

Шаг 6-3. Определить расстояние $d_{\lambda/6}$, на котором разность значений длины прямой и отраженной волн составляет $\lambda/6$ м. Как и на шаге 6-2, определить это расстояние, рекуррентно применяя метод лучевой оптики, описанный в пункте 7, чтобы выполнить двоичный поиск величины ψ . Использовать пункт 7 следующим образом:

дано:

- ψ : угол отражения луча, рад.;
 $h_{r1,2}$: высоты терминалов над средним уровнем моря, км;
 $\Delta h_{1,2}$: поправки к высотам терминалов, км;

найти:

- $d_{\lambda/6}$: расстояние между терминалами по дуге большого круга, соответствующее углу отражения ψ , км.

Шаг 6-4. Определить расстояние d_0 , км.

Если $d \geq d_a$ или $d_a \geq d_{ML}$,

$$d_o = \begin{cases} d_1, & d > d_{\lambda/6} \text{ или } d_{\lambda/6} > d_{ML}; \\ d_{\lambda/6}, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (\text{км}). \quad (34)$$

Иначе, если $d_a < d_{\lambda/6}$ и $d_{\lambda/6} < d_{ML}$,

$$d_o = \begin{cases} d_{\lambda/6}, & d_a < d_{\lambda/6} \text{ и } d_{\lambda/6} < d_{ML}; \\ d_a, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (\text{км}). \quad (35)$$

Шаг 6-5. Текущее значение d_0 может служить грубой аппроксимацией для определенных трасс. Чтобы его уточнить, необходимо итеративным способом пересчитать расстояние в угол отражения ψ , используя шаг 6-3, и произвести вычисления методом лучевой оптики согласно пункту 7. Если результирующее значение d из пункта 7 больше или равно исходному значению d_0 или если при увеличении расстояния на 1 м оно выходит за пределы d_{ML} , использовать результирующее значение

расстояния согласно лучевой оптике в качестве значения d_0 . В противном случае увеличить расстояние на 1 м и произвести повторные вычисления методом лучевой оптики.

Шаг 6-6. Рассчитать потери в зоне прямой видимости на расстоянии d_0 . Сначала снова применить пункт 7, чтобы определить значение ψ_{d_0} . Затем определить потери A_{d_0} , используя пункт 8.

Шаг 6-7. Пересчитать требуемое расстояние d в соответствующий угол отражения ψ , рекуррентно применяя пункт 7. Обозначим конечное результирующее значение расстояния, полученное методом лучевой оптики, как d_{r0} .

Шаг 6-8. Рассчитать потери в зоне прямой видимости согласно пунктам 7 и 8, затем переходить к шагу 6-11. Использовать расчеты по пунктам 7 и 8 следующим образом:

дано:

- ψ : угол отражения луча, рад.;
- $h_{r1,2}$: высоты терминалов над средним уровнем моря, км;
- $\Delta h_{1,2}$: поправки к высотам терминалов, км;

найти:

- Δr : разность значений длины прямого и непрямого лучей, км;
- d : расстояние между терминалами, соответствующее углу отражения ψ , км.

Шаг 6-9. Рассчитать средние потери на поглощение в атмосфере A_a для трассы, применяя Приложение 1 к Рекомендации МСЭ-R P.676. Проследить трассу луча от нижнего терминала к верхнему, используя значение θ_{h1} в качестве угла места (с учетом того, что θ_{h1} отсчитывается от горизонтали терминала, а в Рекомендации МСЭ-R P.676 угол отсчитывается от зенита). Угол θ_{h1} вычисляется на шаге 6-8 согласно уравнению (53). Во время трассировки луча также вычислить общую длину луча r_{LOS} , км.

Шаг 6-10. Вычислить потери в свободном пространстве A_{fs} , дБ:

$$A_{fs} = 20 \log_{10} r_{LOS} + 20 \log_{10} f + 32,45 \quad (\text{дБ}). \quad (36)$$

Шаг 6-11. Вычислить вклад изменчивости в общую величину потерь. Для вычисления Y_{total} использовать пункт 13. Затем перейти к шагу 6-12. Использовать пункт 13 следующим образом:

дано:

- $h_{r1,2}$: высоты терминалов над средним уровнем моря, км;
- d : расстояние между терминалами по дуге большого круга, км;
- f : частота, МГц;
- p : процент времени;

найти:

- $Y(p)$: долгосрочные потери, обусловленные изменчивостью, дБ.

Шаг 6-12. Вычислить основные потери передачи:

$$A = A_{fs} + A_a + A_{LOS} + Y(p) \quad (\text{дБ}). \quad (37)$$

Шаг 6-13. Статистические данные, связанные с изменчивостью, приведенные в Рекомендации МСЭ-R P.528, представляют собой ожидаемые изменения уровня сигнала с течением времени. Эти статистические данные можно рассматривать как не зависящие от статистических данных, связанных с потерями из-за отражения от препятствий, как указано в Рекомендации МСЭ-R P.2108. Следовательно, если один конец линии находится в окружении искусственных препятствий, как указано в Рекомендации МСЭ-R P.2108 и требуется для этой Рекомендации, то метод определения потерь из-за отражения от препятствий и соответствующее ему статическое распределение потерь сигнала, описанные в пункте 3.3 Рекомендации МСЭ-R P.2108, можно объединить со статистическими результатами Рекомендации МСЭ-R P.528.

Если требуется определить именно потери из-за отражения от препятствий, то следует вычислить значение L_{ces} , как описано в пункте 3.3 Рекомендации МСЭ-R P.2108, используя в качестве угла места значение θ_{h1} (из уравнения (53)). Затем можно добавить результирующее значение L_{ces} к результату уравнения (37).

На этом пошаговая процедура расчета потерь на трассе прямой видимости по заданным пользователем входным параметрам завершается.

7 Расчеты методом лучевой оптики в зоне прямой видимости

В этом разделе описан расчет геометрических параметров трассы для двух терминалов, находящихся в пределах расстояния прямой видимости друг от друга, методом лучевой оптики.

Входные данные для этого раздела:

- Ψ : угол отражения луча, рад.;
- $h_{r1,2}$: высоты терминалов над средним уровнем моря, км;
- $\Delta h_{1,2}$: поправки к высотам терминалов, км.

Выходные данные для этого раздела:

- Δr : разность значений длины прямого и непрямого лучей, км;
- d : расстояние между терминалами по дуге большого круга для угла отражения ψ , км.

Шаг 7-1. Вычислить скорректированное значение радиуса Земли a_a :

$$z = (a_0/a_e) - 1; \quad (38)$$

$$k_a = 1/(1 + z \cos \psi); \quad (39)$$

$$a_a = a_0 k_a \quad (\text{км}). \quad (40)$$

Шаг 7-2. Вычислить скорректированные поправки к высотам терминалов $\Delta h_{a1,2}$:

$$\Delta h_{a1,2} = \Delta h_{1,2} (a_a - a_0)/(a_e - a_0) \quad (\text{км}). \quad (41)$$

Шаг 7-3. Вычислить высоты $H_{1,2}$:

$$H_{1,2} = h_{r1,2} - \Delta h_{a1,2} \quad (\text{км}). \quad (42)$$

Шаг 7-4. Рассчитать геометрические параметры $z_{1,2}$, $\theta_{1,2}$, $D_{1,2}$ и $H'_{1,2}$, связанные с терминалами:

$$z_{1,2} = a_a + H_{1,2} \quad (\text{км}); \quad (43)$$

$$\theta_{1,2} = \arccos (a_a \cos \psi / z_{1,2}) - \psi \quad (\text{рад.}); \quad (44)$$

$$D_{1,2} = z_{1,2} \sin \theta_{1,2} \quad (\text{км}); \quad (45)$$

$$H'_{1,2} = \begin{cases} H_{1,2}, & \psi > 1,56; \\ D_{1,2} \tan \psi, & \psi \leq 1,56. \end{cases} \quad (\text{км}). \quad (46)$$

Шаг 7-5. Вычислить разность значений длины радиус-векторов Δz , относящихся к терминалам:

$$\Delta z = |z_1 - z_2| \quad (\text{км}). \quad (47)$$

Шаг 7-6. Вычислить расстояние между двумя терминалами вдоль трассы для угла отражения ψ :

$$d = \max(a_a(\theta_1 + \theta_2), 0) \quad (\text{км}). \quad (48)$$

Шаг 7-7. По рассчитанным геометрическим параметрам определить длину прямого r_0 и непрямого r_{12} лучей:

$$\alpha = \arctan((H'_2 - H'_1)/(D_1 + D_2)) \quad (\text{рад.}); \quad (49)$$

$$r_0 = \max(\Delta z, (D_1 + D_2)/\cos \alpha) \quad (\text{км}); \quad (50)$$

$$r_{12} = (D_1 + D_2)/\cos \psi \quad (\text{км}). \quad (51)$$

Шаг 7-8. Вычислить разность значений длины двух лучей:

$$\Delta r = 4 H_1' H_2' / (r_0 + r_{12}) \quad (\text{км}). \quad (52)$$

Шаг 7-9. Вычислить углы $\theta_{h1,2}$:

$$\theta_{h1} = \alpha - \theta_1 \quad (\text{рад}); \quad (53)$$

$$\theta_{h2} = -(\alpha + \theta_2) \quad (\text{рад}). \quad (54)$$

На этом данный раздел завершается.

8 Расчет потерь в зоне прямой видимости

В этом разделе описана процедура расчета потерь для трассы, пролегающей в пределах зоны прямой видимости.

Дано:

d : рассматриваемое расстояние вдоль трассы, км;

Ψ : угол отражения луча, рад.;

d_0 : расстояние вдоль трассы, на котором дифракция начинает влиять на распространение сигнала в зоне прямой видимости, км (см. шаг 6-5);

f : частота, МГц;

найти:

A_{LOS} : потери в зоне прямой видимости, дБ.

Шаг 8-1. Если расстояние вдоль трассы d больше d_0 , трасса пролегает в пределах зоны прямой видимости (LoS), где становится значимым влияние дифракции, и потери A_{LOS} определяются по формуле (55), что завершает этот раздел. Иначе, если $d \leq d_0$, переходить к шагу 8-2:

$$A_{LOS} = ((d - d_0)(A_{dML} - A_{d0}) / (d_{ML} - d_0)) + A_{d0} \quad (\text{дБ}). \quad (55)$$

Шаг 8-2. Если угол отражения $\psi > \psi_{limit}$, задать $A_{LOS} = 0$ дБ, используя значение ψ_{limit} из шага 6-2, и завершить этот раздел, так как в Рекомендации МСЭ-R P.528 не рассматривается двухлучевая модель в данной зоне. Иначе, если $\psi \leq \psi_{limit}$, переходить к шагу 8-3.

Шаг 8-3. Длина трассы d такова, что в Рекомендации МСЭ-R P.528 для нее используется двухлучевая модель. Вычислить длину волны λ :

$$\lambda = 0,2997925 / f \quad (\text{км}). \quad (56)$$

Шаг 8-4. Вычислить комплексные коэффициенты отражения R_g и Φ_g согласно пункту 9.

Шаг 8-5. Вычислить коэффициент расхождения D_v для данной трассы. Коэффициент расхождения позволяет учесть тот факт, что отражение от гладкой криволинейной поверхности Земли менее эффективно, чем от плоской поверхности Земли, используя значение $D_{1,2}$ из уравнения (45):

$$r_{1,2} = D_{1,2} / \cos \psi \quad (\text{км}); \quad (57)$$

$$R_r = (r_1 r_2) / r_{1,2} \quad (\text{км}); \quad (58)$$

$$D_v = \left[1 + \frac{2R_r(1 + \sin^2 \psi)}{a_a \sin \psi} + \left(\frac{2R_r}{a_a} \right)^2 \right]^{-1/2}. \quad (59)$$

Шаг 8-6. Коэффициент длины луча F_r служит для учета геометрических конфигураций, в которых прямой луч существенно больше (и короче) непрямого луча – например, когда оба терминала расположены высоко и близко друг к другу (случай двух воздушных судов). Формула для вычисления F_r следующая ($r_{1,2}$ – из уравнения (51)):

$$F_r = \min(r_0 / r_{12}, 1). \quad (60)$$

Шаг 8-7. Вычислить эффективные коэффициенты отражения R_{Tg} и ϕ_{Tg} :

$$R_{Tg} = R_g D_v F_r; \quad (61)$$

$$\phi_{Tg} = (2 \pi \Delta r / \lambda) + \phi_g. \quad (62)$$

Шаг 8-8. Вычислить потери A_{LOS} :

$$R = R_{Tg} \cos \phi_{Tg} - R_{Tg} \sin \phi_{Tg}; \quad (63)$$

$$W_{RL} = \min(|1 + R|, 1); \quad (64)$$

$$W_{R0} = W_{RL}^2; \quad (65)$$

$$A_{LOS} = 10 \log_{10} W_{R0}. \quad (66)$$

На этом данный раздел завершается.

9 Коэффициенты отражения от земной поверхности

В этом разделе описана процедура расчета коэффициентов отражения от земной поверхности.

Дано:

- Ψ : угол отражения луча, рад.;
 f : частота, МГц;
 T_{pol} : параметр, указывающий горизонтальную или вертикальную линейную поляризацию;

найти:

- R_g : действительная часть комплексного коэффициента отражения;
 ϕ_g : мнимая часть комплексного коэффициента отражения.

Расчет производится с учетом введенных ранее предположений об электрических характеристиках почвы ($\sigma = 0,005$ См/м и $\epsilon_r = 15$, значения для усредненной почвы).

Шаг 9-1. Вычислить значения параметров:

$$X = 18\,000 \sigma / f; \quad (67)$$

$$Y = \epsilon_r - \cos^2 \psi; \quad (68)$$

$$T = [Y^2 + X^2]^{0,5} + Y; \quad (69)$$

$$P = (0,5T)^{0,5}; \quad (70)$$

$$Q = X / 2P. \quad (71)$$

Шаг 9-2. Вычислить B и A , исходя из параметра поляризации T_{pol} :

$$B = \begin{cases} 1/(P^2 + Q^2), & \text{горизонтальная;} \\ (\epsilon^2 + X^2)/(P^2 + Q^2), & \text{вертикальная;} \end{cases} \quad (72)$$

$$A = \begin{cases} 2P/(P^2 + Q^2), & \text{горизонтальная;} \\ (2(P\epsilon + QX))/(P^2 + Q^2), & \text{вертикальная.} \end{cases} \quad (73)$$

Шаг 9-3. Вычислить значения действительной и мнимой частей комплексного коэффициента отражения:

$$R_g = [((1 + B \sin^2 \psi) - A \sin \psi) / ((1 + B \sin^2 \psi) + A \sin \psi)]^{0,5}; \quad (74)$$

$$\alpha = \begin{cases} \arctan 2(-Q, \sin \psi - P), & \text{горизонтальная;} \\ \arctan 2((\epsilon \sin \psi) - Q, \epsilon \sin \psi - P), & \text{вертикальная;} \end{cases} \quad (75)$$

$$\beta = \begin{cases} \arctan 2(Q, \sin \psi + P), & \text{горизонтальная;} \\ \arctan 2((X \sin \psi) + Q, \epsilon \sin \psi + P), & \text{вертикальная;} \end{cases} \quad (76)$$

$$\phi_g = \alpha - \beta. \quad (77)$$

На этом данный раздел завершается.

10 Дифракция над гладкой поверхностью Земли

В этом разделе описана процедура расчета дифракционных потерь над гладкой поверхностью Земли на заданном расстоянии в пределах района дифракции. В данной модели предполагается усредненная почва с удельной электропроводностью 0,005 См/м (σ) и относительной диэлектрической проницаемостью (ϵ_r), равной 15.

Дано:

- d_0 : рассматриваемое расстояние вдоль трассы, км;
- $d_{r1,2}$: расстояние по дуге большого круга до видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, км;
- f : частота, МГц;
- T_{pol} : параметр, указывающий горизонтальную или вертикальную линейную поляризацию.

найти:

- A_d : дифракционные потери над гладкой поверхностью Земли, дБ.

Дифракционные потери вычисляются по формуле (78):

$$A_d = G(x_0) - F(x_1) - F(x_2) - 20 \quad (\text{дБ}). \quad (78)$$

Шаг 10-1. Вычислить член K , зависящий от параметра поляризации T_{pol} :

$$s = 18\,000 \sigma / f; \quad (79)$$

$$K = \begin{cases} 0,01778 f^{-1/3} [(\epsilon_r - 1)^2 + s^2]^{-1/4}, & \text{горизонтальная;} \\ 0,01778 f^{-1/3} \left[\frac{\epsilon_r^2 + s^2}{\sqrt{(\epsilon_r - 1)^2 + s^2}} \right]^{1/2}, & \text{вертикальная.} \end{cases} \quad (80)$$

Шаг 10-2. Вычислить нормированные расстояния:

$$x_{0,1,2} = (1,607 - K) f^{1/3} d_{0,1,2} \quad (\text{км}). \quad (81)$$

Шаг 10-3. Вычислить значение зависящего от расстояния члена для всех трех нормированных расстояний:

$$G(x_{0,1,2}) = 0,05751 x_{0,1,2} - 10 \log_{10} x_{0,1,2} \quad (\text{дБ}). \quad (82)$$

Шаг 10-4. Вычислить член $y_{1,2}$:

$$y_{1,2} = 40 \log_{10} x_{1,2} - 117 \quad (\text{дБ}). \quad (83)$$

Шаг 10-5. Вычислить значения функций высоты.

Если $x_{1,2} \geq 2000$ км,

$$F(x_{1,2}) = G(x_{1,2}) \quad (\text{дБ}). \quad (84)$$

Если $200 < x_{1,2} < 2000$ км,

$$W_{1,2} = 0,0134 x_{1,2} e^{(-0,005 x_{1,2})}; \quad (85)$$

$$F(x_{1,2}) = W_{1,2} y_{1,2} + (1 - W_{1,2}) G(x_{1,2}) \quad (\text{дБ}). \quad (86)$$

Если $x \leq 200$,

$$x_t = 450 / -(\log_{10} K)^3 \quad (\text{км}); \quad (87)$$

$$F(x_{1,2}) = \begin{cases} \begin{cases} y_{1,2}, & \text{abs}(y_{1,2}) < 117 \\ -117, & \text{иначе} \end{cases}, & x_{1,2} \geq x_t \\ 20 \log K - 15 + (0,000025 x_{1,2}^2 / K), & x_{1,2} \leq x_t \end{cases} \quad (\text{дБ}). \quad (88)$$

Шаг 10-6. Из полученных значений $G(x_0)$ и $F(x_{1,2})$ рассчитать дифракционные потери над гладкой поверхностью Земли по формуле (78).

На этом данный раздел завершается.

11 Тропосферное рассеяние

В этом разделе описана процедура расчета потерь на тропосферное рассеяние на заданном расстоянии. Расчет потерь производится с применением математических методов, в которых рассматриваются криволинейные трассы луча в границах общего объема двух терминалов. Потери на тропосферное рассеяние рассчитываются по формуле (89), которая приводится ниже:

$$A_s = S_e + S_v + 10 \log_{10}(\kappa \theta_s^3 / \ell) \quad (\text{дБ}). \quad (89)$$

Дано:

$d_{r1,2}$: расстояние по дуге большого круга до видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, км;

$h_{e1,2}$: эффективные высоты терминалов, км;

f : частота, МГц;

d : рассматриваемое расстояние вдоль трассы, км;

найти:

A_s : потери на тропосферное рассеяние, дБ;

h_v : высота до границы общего объема, км;

θ_s : угол рассеяния, рад.

Шаг 11-1. Вычислить расстояние рассеяния d_s , км:

$$d_s = d - d_{r1} - d_{r2} \quad (\text{км}). \quad (90)$$

Шаг 11-2. Если $d_s = 0$, общий объем в геометрической конфигурации трассы отсутствует, и поэтому распространение в условиях тропосферного рассеяния не рассматривается. В этом случае установить значения, указанные ниже, и перейти к шагу 3-7.3 в пункте 3. Иначе, если $d_s > 0$, переходить к шагу 11-3:

$$A_s = 0 \quad (\text{дБ}); \quad (91)$$

$$h_v = 0 \quad (\text{км}); \quad (92)$$

$$\theta_s = 0 \quad (\text{рад.}). \quad (93)$$

Шаг 11-3. Расстояние вдоль гладкой поверхности Земли d_z от скользящего луча каждого терминала до центра общего объема составляет

$$d_z = 0,5d_s \quad (\text{км}). \quad (94)$$

Шаг 11-4. Вычислить параметры градиента атмосферного рассеяния:

$$A_m = 1/a_0; \quad (95)$$

$$dN = A_m - 1/a_e; \quad (96)$$

$$\Gamma_e = N_s \times 10^{-6} / dN. \quad (97)$$

Шаг 11-5. По приведенным ниже уравнениям вычислить геометрические параметры, связанные с тропосферным рассеянием, в том числе высоту общего объема h_v в километрах и углы наклона лучей, соответствующие углу пересечения θ_A в радианах:

$$z_a = \frac{1}{2a_e} \left(\frac{d_z}{2} \right)^2 \quad (\text{км}); \quad (98)$$

$$z_b = \frac{1}{2a_e} (d_z)^2 \quad (\text{км}); \quad (99)$$

$$Q_o = A_m - dN; \quad (100)$$

$$Q_{a,b} = A_m - dN * e^{-z_{a,b}/\gamma_e}; \quad (101)$$

$$z'_a = (7Q_o + 6Q_a - Q_b) \frac{d_z^2}{96} \quad (\text{км}); \quad (102)$$

$$z'_b = (Q_o + 2Q_a) \frac{d_z^2}{6} \quad (\text{км}); \quad (103)$$

$$Q_{A,B} = A_m - dN * e^{-z'_{a,b}/\gamma_e}; \quad (104)$$

$$h_v = (Q_o + 2Q_A) \frac{d_z^2}{6} \quad (\text{км}); \quad (105)$$

$$\theta_A = (Q_o + 4Q_A + Q_B) \frac{d_z}{6} \quad (\text{рад.}); \quad (106)$$

$$\theta_s = 2 \theta_A \quad (\text{рад.}). \quad (107)$$

Шаг 11-6. Вычислить член S_e , отражающий эффективность рассеяния:

$$\epsilon_1 = (5,67 \times 10^{-6}) N_s^2 - 0,00232 N_s + 0,031; \quad (108)$$

$$\epsilon_2 = 0,0002 N_s^2 - 0,06 N_s + 6,6; \quad (109)$$

$$\gamma = 0,1424 \left(1 + \frac{\epsilon_1}{\exp[(h_v/4)^6]} \right); \quad (110)$$

$$S_e = 83,1 - \frac{\epsilon_2}{1+0,07716h_v^2} + 20 \log_{10} [(0,1424/\gamma)^2 e^{\gamma h_v}] \quad (\text{дБ}). \quad (111)$$

Шаг 11-7. Вычислить член S_V , отражающий объем рассеяния:

$$X_{A1,2} = h_{1,2}^2 + 4(a_e + h_{1,2})a_e \sin^2 \left(\frac{d_{1,2}}{2a_e} \right); \quad (112)$$

$$\ell_{1,2} = \sqrt{X_{A1,2}} + d_z \quad (\text{км}); \quad (113)$$

$$\ell = \ell_1 + \ell_2 \quad (\text{км}); \quad (114)$$

$$s = \frac{\ell_1 - \ell_2}{\ell}; \quad (115)$$

$$\eta = \gamma \theta_s \ell / 2; \quad (116)$$

$$\kappa = f / 0,0477; \quad (117)$$

$$\rho_{1,2} = 2 \kappa \theta_s h_{1,2} \quad (\text{км}); \quad (118)$$

$$S_V = 10 \log_{10} \left(\frac{(A\eta^2 + B_S \eta) q_1 q_2}{\rho_1^2 \rho_2^2} + C_S \right) \quad (\text{дБ}), \quad (119)$$

где

$$X_{v1} = (1 + s)^2 \eta; \quad (120)$$

$$X_{v2} = (1 - s)^2 \eta; \quad (121)$$

$$q_1 = X_{v1}^2 + \rho_1^2; \quad (122)$$

$$q_2 = X_{v2}^2 + \rho_2^2; \quad (123)$$

$$A = (1 - s^2)^2; \quad (124)$$

$$B_S = 6 + 8s^2 + (8(1-s)X_{v1}^2\rho_1^2)/q_1^2 + (8(1+s)X_{v2}^2\rho_2^2)/q_2^2 + 2(1-s^2)(1+2X_{v1}^2/q_1)(1+2X_{v2}^2/q_2); \quad (125)$$

$$C_S = 12 \left(\frac{\rho_1 + \sqrt{2}}{\rho_1} \right)^2 \left(\frac{\rho_2 + \sqrt{2}}{\rho_2} \right)^2 \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{\rho_1 + \rho_2 + 2\sqrt{2}} \right). \quad (126)$$

Шаг 11-8. Вычислить потери на тропосферное рассеяние по формуле (89).

На этом данный раздел завершается.

12 Влияние общей изменчивости на загоризонтных трассах

В этом разделе определена процедура расчета полного вклада изменчивости в медианные основные потери передачи на загоризонтных трассах.

Дано:

- $h_{r1,2}$: высоты терминалов над средним уровнем моря, км;
- p : процент времени;
- f : частота, МГц;
- d : расстояние между терминалами по дуге большого круга, км;
- A_T : прогнозируемые потери, обусловленные дифракцией или тропосферным рассеянием, дБ;
- θ_s : угол рассеяния, рад.;

найти:

- $Y_{total}(p)$: полные потери, обусловленные изменчивостью, дБ.

Шаг 12-1. Рассчитать вклад долгосрочной изменчивости в течение процента времени p согласно пункту 14, затем переходить к шагу 12-2. Использовать расчеты по пункту 14 следующим образом:

дано:

- $h_{r1,2}$: высоты терминалов над средним уровнем моря, км;
- d : расстояние между терминалами по дуге большого круга, км;
- $d_{r1,2}$: расстояние по дуге большого круга до видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, км;
- f : частота, МГц;
- p : процент времени;
- $f_{\theta h}$: установлено равным $f_{\theta h} = 1$;
- A_T : прогнозируемые потери, обусловленные дифракцией или тропосферным рассеянием, дБ;

найти:

- $Y_e(p)$: долгосрочные потери, обусловленные изменчивостью, дБ.

Шаг 12-2. Чтобы корректно определить совокупное влияние долгосрочной изменчивости и тропосферной многолучевости в условиях, когда оба фактора характеризуются некоторым распределением, требуется знать среднее значение распределения долгосрочной изменчивости. Рассчитать вклад долгосрочной изменчивости в течение 50% времени согласно пункту 14, после чего переходить к шагу 12-3. Использовать расчеты по пункту 14 следующим образом:

дано:

- $h_{r1,2}$: высоты терминалов над средним уровнем моря, км;
- d : расстояние между терминалами по дуге большого круга, км;
- $d_{r1,2}$: расстояние по дуге большого круга до видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, км;
- f : частота, МГц;

50: средний процент времени ($p = 50$);

$f_{\theta h}$: установлено равным $f_{\theta h} = 1$;

A_T : прогнозируемые потери, обусловленные дифракцией или тропосферным рассеянием, дБ;

найти:

$Y_e(50)$: долгосрочные потери, обусловленные изменчивостью, дБ.

Шаг 12-3. Чтобы влияние тропосферной многолучевости не менялось скачкообразно при переходе из зоны прямой видимости в загоризонтную область, следует определить значение K , характеризующее тропосферную многолучевость, в точке перехода из зоны прямой видимости в загоризонтную область. Рассчитать потери в зоне прямой видимости согласно пункту 6, после чего переходить к шагу 12-4. Использовать расчеты по пункту 6 следующим образом:

дано:

d_{ML} : максимальное расстояние прямой видимости, км;

d_d : расстояние, на котором модель дифракции предсказывает потери 0 дБ, км, из уравнения (13);

$h_{r1,2}$: высота терминала над средним уровнем моря, км;

$d_{1,2}$: расстояние по дуге большого круга до видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, км;

f : частота, МГц;

A_{dML} : дифракционные потери на расстоянии d_{ML} , дБ;

p : процент времени;

d : рассматриваемое расстояние вдоль трассы;

найти:

A : основные потери передачи, дБ;

K_{LOS} : вспомогательная величина для последующих вычислений, связанных с изменчивостью.

Шаг 12-4. Вычислить значение K_t , используемое для учета влияния тропосферной многолучевости. Пусть $\theta_{1,5} = 0,02617993878$ рад. (1,5 градуса):

$$K_t = \begin{cases} 20, & \theta_s \geq \theta_{1,5}; \\ K_{LOS}, & \theta_s \leq 0; \\ (\theta_s(20 - K_{LOS})/\theta_{1,5}) + K_{LOS}, & 0 < \theta_s < \theta_{1,5}. \end{cases} \quad (127)$$

Шаг 12-5. Рассчитать вклад тропосферной многолучевости в течение процента времени p согласно пункту 15, после чего переходить к шагу 12-6. Использовать расчеты по пункту 15 следующим образом:

дано:

K_t : величина K_{LOS} ;

p : процент времени;

найти:

$Y_{\pi}(p)$: вклад тропосферной многолучевости в течение процента времени p , дБ.

Шаг 12-6. Суммировать влияние долгосрочной изменчивости и тропосферной многолучевости, чтобы определить полный вклад изменчивости $Y_{total}(p)$, используя ранее вычисленные значения $Y_e(p)$, $Y_e(50)$ и $Y_{\pi}(p)$. Среднее значение тропосферной многолучевости $Y_{\pi}(50) = 0$:

$$Y_{total}(50) = Y_e(50) + Y_{\pi}(50); \quad (128)$$

$$Y = [(Y_e(p) - Y_e(50))^2 + (Y_{\pi}(p) - Y_{\pi}(50))^2]^{0,5}; \quad (129)$$

$$Y_{total} = \begin{cases} Y_{total}(50) + Y, & p < 50; \\ Y_{total}(50) - Y, & p \geq 50. \end{cases} \quad (\text{дБ}) \quad (130)$$

На этом данный раздел завершается.

13 Влияние общей изменчивости на трассах в пределах прямой видимости

В этом разделе описана процедура расчета вклада изменчивости в медианные основные потери передачи.

Дано:

- $h_{r1,2}$: высота терминала над средним уровнем моря, км;
- p : процент времени;
- f : частота, МГц;
- d : расстояние между терминалами по дуге большого круга, км;
- A_{LOS} : прогнозируемые потери, дБ;
- θ_s : угол рассеяния, рад.;
- $f_{\theta h}$: входное значение;

найти:

- $Y_{total}(p)$: полные потери, обусловленные изменчивостью, дБ.

Шаг 13-1. Вычислить значение $f_{\theta h}$, используя значение θ_{h1} , полученное ранее методом лучевой оптики:

$$f_{\theta h} = \begin{cases} 1, & \theta_{h1} \leq 0; \\ 0, & \theta_{h1} \geq 1; \\ \max(0,5 - (1/\pi) \arctan(20 \log_{10}(32 \theta_{h1})), 0), & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (131)$$

Шаг 13-2. Рассчитать вклад долгосрочной изменчивости в течение процента времени p согласно пункту 14, после чего перейти к шагу 13-3. Использовать расчеты по пункту 14 следующим образом:

дано:

- $h_{r1,2}$: высота терминала над средним уровнем моря, км;
- d : расстояние между терминалами по дуге большого круга, км;
- $d_{r1,2}$: расстояние по дуге большого круга до видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, км;
- f : частота, МГц;
- p : процент времени;
- $f_{\theta h}$: входное значение для этого раздела;
- A_{LOS} : прогнозируемые потери, дБ;

найти:

- $Y_e(p)$: долгосрочные потери, обусловленные изменчивостью, дБ.

Шаг 13-3. Чтобы корректно объединить влияние долгосрочной изменчивости и тропосферной многолучевости в условиях, когда оба фактора характеризуются некоторым распределением, требуется знать среднее значение распределения долгосрочной изменчивости. Рассчитать вклад долгосрочной изменчивости в течение 50% времени согласно пункту 14, затем переходить к шагу 13-4. Использовать расчеты по пункту 14 следующим образом:

дано:

- $h_{r1,2}$: высота терминала над средним уровнем моря, км;
- d : расстояние между терминалами по дуге большого круга, км;

- $d_{r1,2}$: расстояние по дуге большого круга до видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, км;
- f : частота, МГц;
- 50: средний процент времени ($p = 50$);
- $f_{\theta h}$: входное значение для этого раздела;
- A_{LOS} : прогнозируемые потери, дБ;

найти:

$Y_e(50)$: долгосрочные потери, обусловленные изменчивостью, дБ.

Шаг 13-4. Рассчитать следующее значение K_{LOS} , используемое для определения влияния тропосферной многолучевости, с помощью значений A_Y из уравнения (166) и R_{Tg} из уравнения (61), как изложено ниже:

$$F_{AY} = \begin{cases} 1, A_Y \leq 0; \\ 0,1, A_Y \geq 9; \\ (1,1 + 0,9 \cos(\pi A_Y / 9)) / 2, \text{ в противном случае;} \end{cases} \quad (132)$$

$$F_{\Delta r} = \begin{cases} 1, \Delta r \geq \lambda/2; \\ 0,1, \Delta r \leq \lambda/6; \\ 0,5[1,1 - 0,9 \cos((3\pi/\lambda)(\Delta r - \lambda/6))] , \text{ в противном случае;} \end{cases} \quad (133)$$

$$R_s = R_{Tg} F_{\Delta r} F_{AY}. \quad (134)$$

Вычислить значение $Y_{\pi}(99)$ следующим образом:

$$Y_{\pi}(99) = 10 \log_{10}(f r_{LOS}^3) - 84,26 \quad (\text{дБ}), \quad (135)$$

где r_{LOS} – длина трассы луча, вычисленная во время трассировки луча между терминалами на линии прямой видимости.

Далее по таблице 5 интерполировать значение K , соответствующее $Y_{\pi}(99)$, и использовать это значение K для вычисления W_a :

$$W_a = 10^{0,1K}. \quad (136)$$

Определив значение W_a , вычислить K_{LOS} :

$$W_R = R_s^2 + 0,01^2; \quad (137)$$

$$W = W_R + W_a; \quad (138)$$

$$K_{LOS} = \begin{cases} 0, W \leq 0; \\ 10 \log_{10} W, W > 0. \end{cases} \quad (139)$$

Шаг 13-5. Рассчитать вклад тропосферной многолучевости в течение процента времени p согласно пункту 15, затем переходить к шагу 13-6. Использовать расчеты по пункту 15 следующим образом:

дано:

K : значение, заданное как K_{LOS} ;

p : процент времени;

найти:

$Y_{\pi}(p)$: вклад тропосферной многолучевости в течение процента времени p , дБ.

Шаг 13-6. Суммировать влияние долгосрочной изменчивости и тропосферной многолучевости, чтобы определить полный вклад изменчивости $Y_{total}(p)$, используя ранее вычисленные значения $Y_e(p)$, $Y_e(50)$ и $Y_{\pi}(p)$. Среднее значение тропосферной многолучевости $Y_{\pi}(50) = 0$:

$$Y_{total}(50) = Y_e(50) + Y_{\pi}(50); \quad (140)$$

$$Y = [(Y_e(p) - Y_e(50))^2 + (Y_{\pi}(p) - Y_{\pi}(50))^2]^{0,5}; \quad (141)$$

$$Y_{total} = \begin{cases} Y_{total}(50) + Y, & p < 50; \\ Y_{total}(50) - Y, & p \geq 50. \end{cases} \quad (\text{дБ}) \quad (142)$$

На этом данный раздел завершается.

14 Долгосрочная изменчивость

В этом разделе описана процедура расчета статистического распределения долгосрочной изменчивости в течение заданного процента времени p . При определении долгосрочной изменчивости оперируют нормированным эффективным расстоянием d_e , которое является функцией расстояний от терминалов до горизонта гладкой поверхности Земли и частотно-зависимого расстояния¹. В этом разделе используются статистические параметры, определенные по данным долгосрочных эмпирических измерений.

Дано:

- $h_{r1,2}$: высота терминала над средним уровнем моря, км;
- $d_{r1,2}$: расстояние по дуге большого круга до видимого с терминала горизонта гладкой поверхности Земли, км;
- p : процент времени;
- f : частота, МГц;
- d : расстояние между терминалами по дуге большого круга, км;
- $f_{\theta h}$: константа или рассчитанный ранее параметр в зависимости от типа трассы;
- $A_{T,LOS}$: прогнозируемые потери, полученные с использованием субмодели рассеяния на линии прямой видимости, за счет дифракции или в тропосфере (рассчитанные ранее), дБ;

найти:

- $Y_e(p)$: долгосрочные потери, обусловленные изменчивостью, дБ.

ПРИМЕЧАНИЕ. – В различных местах этого раздела используется обратная дополнительная интегральная функция нормального распределения $Q^{-1}(q)$. Методика аппроксимации его значений для этой пошаговой процедуры приведена в Рекомендации МСЭ-R P.1057. Функция $Q^{-1}(q)$ определена так, что $q = p/100$.

Шаг 14-1. Рассчитать d_e , эффективное расстояние в км между двумя терминалами:

$$d_{qs} = 65(100/f)^{1/3} \quad (\text{км}); \quad (143)$$

$$d_{Lq} = d_{r1} + d_{r2} \quad (\text{км}); \quad (144)$$

$$d_q = d_{Lq} + d_{qs} \quad (\text{км}); \quad (145)$$

$$d_e = \begin{cases} (130 d)/d_q, & d \leq d_q; \\ 130 + d - d_q, & d > d_q. \end{cases} \quad (\text{км}) \quad (146)$$

Шаг 14-2. Рассчитать g_{10} и g_{90} :

$$g_{10} = \begin{cases} 0,21 \sin(5,22 \log_{10}(f/200)) + 1,28, & f \leq 1600; \\ 1,05, & f > 1600; \end{cases} \quad (147)$$

$$g_{90} = f(x) = \begin{cases} 0,18 \sin(5,22 \log_{10}(f/200)) + 1,23, & f \leq 1600; \\ 1,05, & f > 1600. \end{cases} \quad (148)$$

¹ Прежний метод расчета статистики долгосрочной изменчивости основывался на эффективном значении преломляющей способности поверхности Земли, равном 329 N-единиц. Исследования и испытания показали, что использование среднегодовой глобальной стандартной атмосферы в этих расчетах дало почти идентичные результаты и обеспечило более точное физическое описание предлагаемых методов.

Шаг 14-3. Рассчитать $V(50)$, $Y_0(10)$ и $Y_0(90)$, пользуясь приведенными ниже формулами и значениями из таблицы 1.

ТАБЛИЦА 1

Значения для расчетов по формулам долгосрочной изменчивости

	$V(50)$	$Y_0(10)$	$Y_0(90)$
c_1	1,59e-5	5,25e-4	2,93e-4
c_2	1,56e-11	1,57e-6	3,78e-8
c_3	2,77e-8	4,70e-7	1,02e-7
n_1	2,32	1,97	2,00
n_2	4,08	2,31	2,88
n_3	3,25	2,90	3,15
f_∞	0,0	5,4	3,2
f_m	3,9	10,0	8,2

$$f_2 = f_\infty + (f_m - f_\infty) \exp(-c_2 d_e^{n_2}); \quad (149)$$

$$\left. \begin{array}{l} V(50) \\ Y_0(10) \\ Y_0(90) \end{array} \right\} = [c_1 d_e^{n_1} - f_2] \exp(-c_3 d_e^{n_3}) + f_2 \quad (\text{дБ}). \quad (150)$$

Шаг 14-4. Рассчитать значение $Y_e(p)$, изменчивость, связанную с долгосрочным (почасовым) замиранием мощности сигнала в течение заданного процента времени p .

Если $p = 50$, то

$$Y_p = V(50) \quad (\text{дБ}). \quad (151)$$

Если $p > 50$, то:

$$z_{90} = Q^{-1}(90/100); \quad (152)$$

$$z_p = Q^{-1}(p/100); \quad (153)$$

$$c_p = z_p / z_{90}; \quad (154)$$

$$Y = c_p (-Y_0(90) g_{90}) \quad (\text{дБ}); \quad (155)$$

$$Y_p = Y + V(50) \quad (\text{дБ}). \quad (156)$$

Если $p < 0,50$, необходимо выполнить дополнительные действия. Если $p \geq 0,10$, то:

$$z_{10} = Q^{-1}(10/100); \quad (157)$$

$$z_p = Q^{-1}(p/100); \quad (158)$$

$$c_p = z_p / z_{10}; \quad (159)$$

$$Y = c_p (Y_0(10) g_{10}) \quad (\text{дБ}); \quad (160)$$

$$Y_p = Y + V(50) \quad (\text{дБ}). \quad (161)$$

В противном случае $1 \leq p < 10$. Пользуясь таблицей 2, произвести линейную интерполяцию c_p исходя из p , после чего из формул (160) и (161) получить Y_p .

ТАБЛИЦА 2

Малые значения вероятности для c_p

p	c_p
10	1,0000
5	1,3265
2	1,7166
1	1,9507

Шаг 14-5. Рассчитать значение Y_{10} , изменчивость, связанную с долгосрочным (почасовым) замиранием мощности в течение процента времени $p = 10$:

$$Y_{10} = (Y_0(10)g_{10}) + V(50) \quad (\text{дБ}). \quad (162)$$

Шаг 14-6. Рассчитать значения $Y_{el}(p)$ и $Y_{el}(10)$:

$$Y_{el}(p) = f_{\theta h} Y_p \quad (\text{дБ}); \quad (163)$$

$$Y_{el}(10) = f_{\theta h} Y_{10} \quad (\text{дБ}). \quad (164)$$

Шаг 14-7. Вычислить значение A_Y , которое используется для того, чтобы существующие мощности сигналов не превышали уровней, ожидаемых при распространении в свободном пространстве, на нереально большую величину в условиях, когда изменчивость относительно медианы велика и почти достигает уровня, характерного для свободного пространства:

$$A_{YI} = Y_{el}(10) - A_T - 3 \quad (\text{дБ}); \quad (165)$$

$$A_Y = \max(A_{YI}, 0) \quad (\text{дБ}). \quad (166)$$

Шаг 14-8. Если $p \geq 10$, вычислить полные потери, обусловленные изменчивостью, и завершить расчеты по этому разделу. В противном случае переходить к шагу 14-9 и продолжать процедуру:

$$Y_e(p) = Y_{el}(p) - A_Y \quad (\text{дБ}). \quad (167)$$

Шаг 14-9. Если заданный процент времени меньше 10%, может потребоваться дополнительная поправка. Вычислить значение Y_{temp} :

$$Y_{temp} = Y_{el}(p) - A_Y - A_{T,LOS} \quad (\text{дБ}). \quad (168)$$

Шаг 14-10. Пользуясь таблицей 3, произвести линейную интерполяцию c_{Yp} , исходя из p .

ТАБЛИЦА 3

Значения поправок для малых процентов вероятности

p	c_{Yp}
10	0,00
5	-3,70
2	-4,50
1	-5,00

Шаг 14-11. Вычислить полные потери, обусловленные изменчивостью:

$$Y_e(p) = \begin{cases} -c_{Yp} + A_{T,LOS}, & Y_{temp} > -c_{Yp}; \\ Y_{temp} + A_{T,LOS}, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (169)$$

На этом раздел долгосрочной изменчивости завершается.

15 Тропосферная многолучевость

В этом разделе описана процедура расчета вклада тропосферной многолучевости в полную изменчивость.

Дано:

K : входной параметр;

p : процент времени;

найти:

$Y_{\pi}(p)$: вклад тропосферной многолучевости в течение процента времени p , дБ.

В этом разделе используются табличные значения распределения Накагами-Райса. Таблица 4 содержит данные для $p < 50$, а таблица 5 – для $p > 50$. Для всех значений $p = 50$ величина $Y_{\pi}(p) = 0$ дБ.

ТАБЛИЦА 4

Значения распределения Накагами-Райса для малых значений процента времени

K	$Y_{\pi}(1)$	$Y_{\pi}(2)$	$Y_{\pi}(5)$	$Y_{\pi}(10)$	$Y_{\pi}(15)$	$Y_{\pi}(20)$	$Y_{\pi}(30)$	$Y_{\pi}(40)$
-40	-0,1417	-0,1252	-0,1004	-0,0784	-0,0634	-0,0515	-0,0321	-0,0155
-25	-0,7676	-0,6811	-0,5497	-0,4312	-0,3504	-0,2856	-0,1790	-0,0870
-20	-1,3183	-1,1738	-0,9524	-0,7508	-0,6121	-0,5003	-0,3151	-0,1537
-18	-1,6263	-1,4507	-1,1805	-0,9332	-0,7623	-0,6240	-0,3940	-0,1926
-16	-1,9963	-1,7847	-1,4573	-1,1557	-0,9462	-0,7760	-0,4916	-0,2410
-14	-2,4355	-2,1829	-1,7896	-1,4247	-1,1695	-0,9613	-0,6113	-0,3007
-12	-2,9491	-2,6507	-2,1831	-1,7455	-1,4375	-1,1846	-0,7567	-0,3737
-10	-3,5384	-3,1902	-2,6407	-2,1218	-1,7535	-1,4495	-0,9307	-0,4619
-8	-4,1980	-3,7974	-3,1602	-2,5528	-2,1180	-1,7565	-1,1345	-0,5662
-6	-4,9132	-4,4591	-3,7313	-3,0306	-2,5247	-2,1011	-1,3655	-0,6855
-4	-5,6559	-5,1494	-4,3315	-3,5366	-2,9578	-2,4699	-1,6150	-0,8154
-2	-6,3810	-5,8252	-4,9219	-4,0366	-3,3871	-2,8364	-1,8638	-0,9455
0	-7,0247	-6,4249	-5,4449	-4,4782	-3,7652	-3,1580	-2,0804	-1,0574
2	-7,5229	-6,8862	-5,8424	-4,8090	-4,0446	-3,3927	-2,2344	-1,1347
4	-7,8532	-7,1880	-6,0963	-5,0145	-4,2145	-3,5325	-2,3227	-1,1774
6	-8,0435	-7,3588	-6,2354	-5,1234	-4,3022	-3,6032	-2,3656	-1,1975
20	-8,2238	-7,5154	-6,3565	-5,2137	-4,3726	-3,6584	-2,3979	-1,2121

ТАБЛИЦА 5

Значения распределения Накагами-Райса для больших значений процента времени

K	$Y_{\pi}(60)$	$Y_{\pi}(70)$	$Y_{\pi}(80)$	$Y_{\pi}(85)$	$Y_{\pi}(90)$	$Y_{\pi}(95)$	$Y_{\pi}(98)$	$Y_{\pi}(99)$
-40	0,0156	0,0323	0,0518	0,0639	0,0791	0,1016	0,1271	0,1441
-25	0,0878	0,1828	0,2953	0,3651	0,4537	0,5868	0,7390	0,8420
-20	0,1564	0,3269	0,5308	0,6585	0,8218	1,0696	1,3572	1,5544
-18	0,1969	0,4127	0,6722	0,8355	1,0453	1,3660	1,7417	2,0014
-16	0,2478	0,5209	0,8519	1,0615	1,3326	1,7506	2,2463	2,5931
-14	0,3114	0,6573	1,0802	1,3505	1,7028	2,2526	2,9156	3,3872
-12	0,3903	0,8281	1,3698	1,7198	2,1808	2,9119	3,8143	4,4714
-10	0,4874	1,0404	1,7348	2,1898	2,7975	3,7820	5,0373	5,9833
-8	0,6045	1,2999	2,1887	2,7814	3,5868	4,9288	6,7171	8,1319
-6	0,7415	1,6078	2,7374	3,5059	4,5714	6,4060	8,9732	11,0973
-4	0,8935	1,9530	3,3611	4,3363	5,7101	8,1216	11,5185	14,2546
-2	1,0458	2,2979	3,9771	5,1450	6,7874	9,6276	13,4690	16,4251
0	1,1723	2,5755	4,4471	5,7363	7,5266	10,5553	14,5401	17,5511
2	1,2535	2,7446	4,7144	6,0581	7,9073	11,0003	15,0270	18,0526
4	1,2948	2,8268	4,8377	6,2021	8,0724	11,1869	15,2265	18,2566
6	1,3130	2,8619	4,8888	6,2610	8,1388	11,2607	15,3047	18,3361
20	1,3255	2,8855	4,9224	6,2992	8,1814	11,3076	15,3541	18,3864

Шаг 15-1. Пользуясь таблицами 4 и 5, путем линейной интерполяции определить $Y_{\pi}(p)$ для требуемых значений K и p . При этом необходимо помнить, что $Y_{\pi}(0) = 0$.

На этом данный раздел завершается.

Приложение 3

Экспериментальные результаты

В ноябре 1982 года, а также в апреле и июне 1983 года в Японии проводились экспериментальные исследования распространения радиоволн на трассах воздух-земля на частоте 930 МГц. Полученные в результате значения потерь на распространение в зоне прямой видимости хорошо согласуются со значениями для свободного пространства. Дальность прямой видимости, рассчитанная по данным измерений на высоте 10 000 м, оказалась меньше, чем предполагалось.
