

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования

«Белорусский государственный университет

информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиотехнических устройств

**К. Л. Горбачев, В. М. Козел**

***ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА  
ЦИФРОВОЙ СЕТИ ФИКСИРОВАННОЙ СВЯЗИ***

Учебно-методическое пособие

по дисциплинам «Телекоммуникационные технологии и системы» и «Системы  
мобильной радиосвязи»

для студентов специальности «Радиоинформатика»

дневной формы обучения

МИНСК БГУИР 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 КОНЦЕПЦИЯ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ПЕРЕДАЧИ РАДИОЛИНИИ	6
2 ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ	10
2.1 Показатели качества по ошибкам	11
2.2 Показатели неготовности	12
2.3 Преобладающие факторы распространения радиоволн в различных диапазонах частот, влияющие на выбор показателей качества	13
3 ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ ТРАССЫ И ВЫБОР ВЫСОТ ПОДВЕСА АНТЕНН РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ	14
3.1 Расчет коэффициента эквивалентного радиуса Земли	14
3.2 Построение профиля трассы цифровой радиорелейной линии прямой видимости	22
3.3 Выбор высот подвеса антенн цифровой радиорелейной линии прямой видимости для незащищенной линии	28
4 РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ПЕРЕДАЧИ РАДИОЛИНИИ	32
4.1 Потери передачи в свободном пространстве	32
4.2 Потери передачи в атмосферных газах	33
4.3 Дифракционные потери	38
4.4 Расчет энергетического запаса на замирания цифровой радиорелейной линии связи прямой видимости	41
5 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА РРЛ	44
5.1 Определение геоклиматического коэффициента	44
5.2 Прогнозирование показателей качества по ошибкам цифровой радиорелейной линии прямой видимости	45
5.3 Прогнозирование времени неготовности цифровой радиорелейной линии прямой видимости	52

## **ВВЕДЕНИЕ**

В большинстве стран радиорелейные линии связи являются важной частью средств передачи информации на всех участках национальных и международных сетей электросвязи. По сравнению с проводными/волоконно-оптическими системами связи у радиорелейных линий, в частности цифровых, можно выделить следующие преимущества:

- быстрая установка;
- более быстрое и дешевое строительство на местности со сложным рельефом (водоемы, горы и т.д.);
- более простое и дешевое резервирование сетей связи;
- использование для быстрого восстановления связи при стихийных бедствиях и спасательных операциях.

В больших городах и городских зонах использование радиорелейной связи часто является единственной альтернативой волоконно-оптическим кабелям (помимо высокой стоимости прокладки подземного кабеля, иногда она просто неосуществима). Аналогичным образом во многих странах радиорелейные линии связи могут быть единственно возможным средством передачи информации через лесные, горные, степные, заболоченные и другие местности со сложным рельефом.

Распространение радиоволн в микроволновых диапазонах в пределах прямой видимости является квазиоптическим и обеспечивается при помощи высоконаправленных антенн, которые позволяют при относительно небольших мощностях передатчика реализовать связь на больших расстояниях. Низкая мощность передатчика и широкая полоса радиоканала (высокая скорость передачи информации) по существу исключают возможность использования эффектов тропосферного или ионосферного рассеяния радиоволн, т. е. загоризонтных систем. Требование прямой видимости ограничивает длину трассы (пролета) величиной порядка 40 км при равнинной местности.

Распространение радиоволн в атмосфере обычно достаточно статично, однако периодически на него воздействуют атмосферные возмущения, которые понижают или повышают уровень принимаемого сигнала. Один вид воздействия атмосферных возмущений – замирание сигнала вследствие многолучевости в чистой атмосфере («в условиях ясного неба»), другой – замирание в дожде и снеге («в гидрометеорах»). Глубина этих замираний изменяется с рабочей частотой и в течение времени (сезона года). При глубине замирания, равной так называемому «запасу на замирание» (превышению среднего уровня принимаемого сигнала над чувствительностью), происходит превышение числа ошибочно принятых бит над допустимой величиной, т. е. сбой связи.

С момента появления цифровой связи в начале 70-х гг. XX в., чтобы конкурировать с существующими аналоговыми системами связи, новые цифровые системы должны были иметь определенное минимальное число цифровых телефонных каналов. Виды цифровой модуляции низкого уровня, основанные на двоичном кодировании и применяемые в кабельных системах связи, как выяснилось, слишком неэкономично используют радиочастотный ресурс по сравнению с аналоговыми системами. Поэтому первые цифровые радиорелейные линии прямой видимости использовали 4-позиционную (4FSK, QPSK, OQPSK) и 8-позиционную (8PSK) модуляцию, формат которой быстро вырос до 16-64-позиционной и далее до 512-позиционной (QAM). Более сложные виды цифровой модуляции весьма эффективны с точки зрения использования радиочастотного ресурса, однако требуют высокого отношения сигнал/шум для обеспечения заданного качества передачи информации. Поэтому там, где объем радиочастотного ресурса достаточно велик (приблизительно на частотах выше 15 ГГц), широко используются системы с 4-позиционной модуляцией.

При проектировании цифровых радиорелейных линий прямой видимости (ЦРРЛ ПВ) одним из существенных моментов является предварительный расчет линии с целью прогнозирования параметров качества ЦРРЛ ПВ. На основе полученных результатов может быть сделан вывод о работоспособности

проектируемой линии в планируемой конфигурации и/или предъявлены требования к оборудованию и его размещению.

Прогнозирование параметров качества ЦРРЛ ПВ может быть осуществлено на основе Рекомендации Международного Союза Электросвязи (МСЭ) R-P.530 «Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости» и связанных с нею Рекомендаций. Изложенная в этой Рекомендации методика расчета применима в диапазоне частот приблизительно 150 кГц – 40 ГГц и для трасс протяженностью до 200 км при условии прямой видимости.

## 1 КОНЦЕПЦИЯ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ПЕРЕДАЧИ РАДИОЛИНИИ

Под радиолинией подразумевается совокупность передатчика, приемника, передающей и приемной антенн, связанных с ними цепей (фидеров, согласующих устройств, цепей коммутации и т. п.) и среды распространения радиоволн. При анализе радиорелейной линии одна из радиорелейных станций условно считается передающей или передатчиком, другая – приемной или приемником. Потери передачи радиолинии  $L_i$  [дБ] определяются как отношение, обычно выражаемое в децибелах, мощности сигнала на выходе передатчика (до фидера питания антенны) к мощности сигнала на входе приемника (после фидера снижения):

$$L_i = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_{tx}}{P_{rx}}\right) = P_{tx} - P_{rx}, \quad [\text{дБ}]$$

где  $P_{tx}$  [дБВт] и  $p_{tx}$  [Вт] – мощность сигнала на выходе передатчика;  
 $P_{rx}$  [дБВт] и  $p_{rx}$  [Вт] – мощность сигнала на входе приемника.

Потери передачи радиолинии  $L_i$  [дБ] определяются следующим образом:

$$L_i = L_{ftx} + L_{ctx} - G_{tx} + L_{bf} + L_m - G_{rx} + L_{crx} + L_{frx}, \quad [\text{дБ}]$$

где  $L_{ftx}$  [дБ] и  $L_{frx}$  [дБ] – соответственно потери в фидере передающей и приемной антенны;  
 $L_{ctx}$  [дБ] и  $L_{crx}$  [дБ] – соответственно потери в цепях передающей и приемной антенны;  
 $G_{tx}$  [дБи] и  $G_{rx}$  [дБи] – соответственно коэффициент усиления относительно изотропного излучателя передающей и приемной антенны;

$L_{bf}$  [дБ] – потери передачи в свободном пространстве;  
 $L_m$  [дБ] – потери передачи относительно свободного пространства.

Отметим, что все переменные, входящие в выражение для потерь передачи радиолинии, – величины неотрицательные.

Потери в цепях передающей и приемной антенны  $L_{ctx}$  [дБ] и  $L_{crx}$  [дБ] включают в себя все потери, за исключением потерь, связанных с излучением антенны. Эти потери могут быть определены следующим образом:

$$L_{ctx} (L_{crx}) = 10 \cdot \lg\left(\frac{r_a}{r_{ar}}\right), \quad [\text{дБ}]$$

где  $r_a$  – активная составляющая сопротивления антенны;

$r_{ar}$  – сопротивление излучения антенны.

Коэффициент усиления антенны по мощности определяется как отношение, выраженное в децибелах, мощности, которая должна поступать на вход свободной от потерь эталонной антенны (обычно – изотропной), к мощности на входе рассматриваемой антенны, для того, чтобы получить в данном направлении одинаковую напряженность поля или одинаковую плотность потока мощности на том же расстоянии.

Потери в фидере передающей и приемной антенн  $L_{ftx}$  [дБ] и  $L_{frx}$  [дБ], потери в цепях передающей и приемной антенны  $L_{ctx}$  [дБ] и  $L_{crx}$  [дБ] и коэффициенты усиления передающей и приемной антенн  $G_{tx}$  [дБ] и  $G_{rx}$  [дБ] являются техническими параметрами радиорелейной станции и задаются пользователем в исходных данных расчета.

Потери передачи в свободном пространстве  $L_{bf}$  [дБ] для данной радиолинии являются величиной постоянной (неизменной во времени).

Потери передачи относительно свободного пространства  $L_m$  [дБ] включают ряд слагаемых, часть из которых для данной радиолинии является величиной постоянной (неизменной во времени), а часть – величиной переменной, зависящей от электрических параметров среды распространения радиоволн (атмосферы Земли). Поскольку электрические параметры атмосферы с течением времени меняются случайным образом, ряд составляющих потерь относительно свободного пространства определяется на основе методов теории вероятности и математической статистики и представляет собой значение потерь, превышаемое в течение определенного процента времени. Таким образом, общие потери передачи радиолинии  $L_i$  [дБ] носят вероятностный характер и оцениваются величиной потерь, превышаемых в течение определенного процента времени.

Потери передачи относительно свободного пространства  $L_m$  [дБ] на наземной трассе (пролете) ЦРРЛ ПВ являются суммой ряда составляющих:

- ослабление в атмосферных газах;
- дифракционные замирания, обусловленные закрытием или частичным закрытием пролета ЦРРЛ ПВ;
- замирания, обусловленные многолучевостью, расширением пучка и мерцанием;
- ослабление, обусловленное колебанием угла прихода/выхода радиоволн;
- ослабление, обусловленное осадками (гидрометеорами);
- ослабление, обусловленное песчаными и пылевыми бурями.

Все перечисленные составляющие носят ярко выраженный переменный характер, т. к. прямо зависят от электрических параметров атмосферы.



Во всех методиках прогнозирования параметров качества ЦРРЛ ПВ используется понятие энергетического запаса на замирания. Исходя из приведенных выше соотношений, для потерь передачи радиолинии  $L_i$  [дБ] энергетический запас на замирания составляет:

$$A_m = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{ftx} - L_{rtx} - L_{ctx} - L_{crx} - L_{bf} - L_m - P_{rxo}, \quad [\text{дБ}]$$

где  $P_{rxo}$  [дБВт] – мощность сигнала на входе приемника, соответствующая заданному пороговому значению коэффициента ошибочных бит  $BER_o$  (чувствительность приемника).

На основе рассчитанного таким образом энергетического запаса определяются вероятность или процент времени, в течение которого превышаются потери относительно свободного пространства, вызываемые такими случайными факторами, как многолучевость распространения радиоволн, ослабление в атмосферных осадках (гидрометеорах) и т. д.

## 2 ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ

Качество передачи информации для ЦРРЛ ПВ, согласно Рекомендациям МСЭ, характеризуется, в частности, следующими параметрами:

- коэффициент ошибок по битам (BER) – для бинарного цифрового сигнала это отношение числа битов, принятых с ошибками, к общему числу битов, принятых за данный интервал времени;
- секунда с ошибками (ES – Errored Second) – временной интервал длительностью в 1 с, в течение которого данный цифровой сигнал принимается с одной или более ошибками;
- пораженная секунда (SES – Severely Errored Second) – временной интервал длительностью в 1 с, в течение которого данный цифровой сигнал принимается с коэффициентом ошибок по битам (BER), превышающим заданную величину (обычно  $1 \cdot 10^{-3}$ ).

Также качество передачи информации для ЦРРЛ ПВ может характеризоваться несколько иными параметрами:

- блок с ошибками (EB – Errored Block) – блок, в котором один или несколько битов являются ошибочными;
- секунда с ошибками (ES) – период в 1 с с одним или несколькими ошибочными блоками или как минимум с одним дефектом;
- секунда, пораженная ошибками (SES) – период в 1 с, содержащий не менее 30 % блоков с ошибками (EB) или как минимум один дефект. SES является частным случаем ES.

Поскольку условия распространения радиоволн, помехи, отказы оборудования и другие факторы, влияющие на качество передачи информации ЦРРЛ ПВ, носят случайный характер, показатели качества устанавливаются статистически в виде процентов времени. В настоящей методике при расчете

параметров качества ЦРРЛ ПВ учитываются и принимаются во внимание только условия распространения радиоволн.

В зависимости от длительности интервала времени, в течение которого качество передачи информации становится ниже заданного предела, установлено два показателя качества ЦРРЛ ПВ:

- при длительности периодов пораженных секунд менее 10 последовательных секунд качество ЦРРЛ ПВ оценивается показателем качества по ошибкам;
- при длительности периодов пораженных секунд 10 или более последовательных секунд качество ЦРРЛ ПВ оценивается показателем неготовности.

## **2.1 Показатели качества по ошибкам**

Показатели качества по ошибкам ЦРРЛ ПВ оцениваются в единицах секунд с ошибками ES и пораженных секунд SES, а также в значениях коэффициента секунд с ошибками ESR (Errored Second Ratio) и коэффициента пораженных секунд SESR (Severely Errored Second Ratio). Коэффициент секунд с ошибками ESR (пораженных секунд SESR) – это отношение числа секунд с ошибками ES (пораженных секунд SES) к общему числу секунд фиксированного интервала времени. Данные параметры применимы только в том случае, когда ЦРРЛ ПВ находится в состоянии готовности и когда длительность периодов пораженных секунд менее 10 последовательных секунд.

Используемые в дальнейшем методы прогнозирования показателей качества ЦРРЛ ПВ в результате расчета получают общий процент времени, в течение которого при наличии многолучевых замираний будет превышать заданная величина коэффициента ошибок по битам. Таким образом, рассчитываемый процент времени является предварительной оценкой коэффициента пораженных секунд SESR.

Превышение заданной величины коэффициента ошибок по битам вследствие многолучевого распространения радиоволн называется также сбоем в условиях ясного неба.

Показатель качества по ошибкам ЦРРЛ ПВ, таким образом, представляет собой процент времени, в течение которого превышает (ухудшается) заданная величина коэффициента ошибок по битам  $BER_0$ . При этом длительность периодов пораженных секунд всегда меньше 10 последовательных секунд. Вместо процента времени может использоваться вероятность отказов (сбоев), равная проценту времени, деленному на 100.

## **2.2 Показатели неготовности**

Понятие неготовности для ЦРРЛ ПВ определяется следующим образом:

– период времени неготовности начинается в тот момент, когда по крайней мере в одном направлении передачи в течение как минимум 10 последовательных секунд имеют место одно или оба из следующих состояний:

- 1) прием цифрового сигнала прерывается;
- 2) коэффициент ошибочных бит (BER) в течение каждой секунды хуже (т.е. более) заданного значения  $BER_0$  (все секунды поражены ошибками).

Эти десять секунд считаются временем неготовности;

– новый период готовности начинается в момент начала 10 непораженных секунд для обоих направлений передачи. Эти десять секунд считаются временем готовности.

Показатель неготовности устанавливается статистически в виде процентов времени.

Состояние неготовности обычно вызывается в ЦРРЛ ПВ, работающих в диапазонах частот выше примерно 10 ГГц вследствие ослабления сигнала в осадках (атмосферных гидрометеорах).

Показатель неготовности ЦРРЛ ПВ, таким образом, представляет собой процент времени, в течение которого линия находится в состоянии неготовности. Вместо процента времени может использоваться вероятность отказов (сбоев), равная проценту времени, деленному на 100.

### **2.3 Преобладающие факторы распространения радиоволн в различных диапазонах частот, влияющие на выбор показателей качества**

На трассах (пролетах) распространения радиоволн на частотах выше примерно 17 ГГц преобладает ослабление сигнала в дожде (гидрометеорах), а на частотах ниже примерно 10 ГГц – искажения вследствие многолучевого распространения.

Поэтому ЦРРЛ ПВ в основном должны проектироваться исходя из требований на неготовность при работе на частотах выше 17 ГГц и исходя из показателей качества по ошибкам при работе на частотах ниже примерно 10 ГГц; при работе в диапазоне частот 10 – 17 ГГц следует учитывать оба показателя.

### **3 ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ ТРАССЫ И ВЫБОР ВЫСОТ ПОДВЕСА АНТЕНН РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

Выбор высот подвеса антенн, основанный на анализе профиля радиолинии, является ключевым моментом проектирования ЦРРЛ ПВ. Отметим, что трассу ЦРРЛ ПВ рекомендуется строить таким образом, чтобы по возможности исключить дифракционные замирания и отражения радиосигнала от поверхности Земли.

#### **3.1 Расчет коэффициента эквивалентного радиуса Земли**

При построении профиля трассы (пролета) ЦРРЛ ПВ и основанных на нем выборе высот подвеса антенн, расчете дифракционных потерь и потерь за счет многолучевости с отражением от земной поверхности необходимо учитывать влияние на распространение радиоволн тропосферной рефракции, обусловленной электрическими параметрами атмосферы. Это осуществляется путем введения в расчеты вместо истинного радиуса Земли эквивалентного радиуса.

Эквивалентный радиус Земли – радиус гипотетической сферической Земли без атмосферы, для которой траектории распространения радиоволн являются прямыми линиями, причем высоты и земные расстояния остаются теми же, что и для реальной Земли, окруженной атмосферой с постоянным вертикальным градиентом модуля рефракции. Эквивалентный радиус Земли  $R_{eq}$  [м] связан с истинным радиусом  $R_e = 6\,371\,000$  м коэффициентом эквивалентного радиуса Земли:

$$R_{eq} = k_{eq} \cdot R_e = k_{eq} \cdot 6371000. \quad [м]$$

Коэффициент эквивалентного радиуса Земли зависит от электрических параметров атмосферы (вертикального градиента индекса рефракции), которые

с течением времени меняются случайным образом. Поэтому коэффициент эквивалентного радиуса Земли (и, соответственно, эквивалентный радиус Земли) задается статистически как медианное значение  $k_{eqmed}$  и значение  $k_{equp}$ , превышаемое в течение 99,9 % времени.

Коэффициент эквивалентного радиуса Земли может рассчитываться несколькими способами:

$$k_{eq} = \frac{1}{1 + R_e \cdot \frac{dn}{dh}},$$

где  $R_e = 6\,371\,000$  м – фактический радиус Земли;  
 $dn/dh$  [1/м] – вертикальный градиент индекса рефракции  $n$ .

$$k_{eq} = \frac{157}{157 + \Delta N},$$

где  $\Delta N$  [N-единиц/км] – градиент рефракции вблизи поверхности Земли.

Отметим, что часто при расчете коэффициента эквивалентного радиуса Земли и в справочных данных используется и приводится значение не градиента рефракции, а средняя скорость убывания рефракции, т. е. величина, противоположная по знаку градиенту рефракции (в приведенной выше формуле в знаменателе стоит знак «минус»).

Согласно отечественным методикам

$$k_{eq} = \frac{1}{1 + \frac{R_e}{2} \cdot \frac{d\varepsilon}{dh}},$$

где  $d\varepsilon/dh$  [1/м] – вертикальный градиент относительной диэлектрической проницаемости атмосферы  $\varepsilon$ .

В настоящей методике используется процедура расчета эквивалентного радиуса Земли, основанная на статистических данных о вертикальном градиенте диэлектрической проницаемости атмосферы  $d\varepsilon/dh$  для территорий бывшего СССР. Для большинства климатических районов бывшего СССР вертикальный градиент диэлектрической проницаемости атмосферы  $d\varepsilon/dh$  подчиняется примерно нормальному закону распределения, причем дисперсия градиента, как правило, существенно больше в летние месяцы.

*Исходные данные для расчета:*

$g_{\varepsilon med}$  [1/м] – среднее значение градиента диэлектрической проницаемости атмосферы для места расположения ЦРРЛ ПВ. Берется значение для времени года, при котором стандартное отклонение наибольшее;

$\sigma_{\varepsilon}$  [1/м] – стандартное отклонение градиента диэлектрической проницаемости атмосферы для места расположения ЦРРЛ ПВ. Берется значение для времени года, при котором стандартное отклонение наибольшее;

$d$  [м] – расстояние между передатчиком и приемником (длина пролета/трассы ЦРРЛ ПВ).

Данные о параметрах распределения градиента диэлектрической проницаемости атмосферы для территории Республики Беларусь приведены в таблице 3.1.



Таблица 3.1 – Параметры распределения градиента диэлектрической проницаемости атмосферы для территории Республики Беларусь

Сезон	Среднее значение $g_{\text{emed}} [1/\text{м}]$	Стандартное отклонение $\sigma_{\varepsilon} [1/\text{м}]$
Летние месяцы	$-9 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$
Зимние месяцы	$-8 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$
Летние месяцы в районе водных массивов (реки, болота и пр.)	$-10 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-8}$

Приведенные в таблице 3.1. величины получены при длине трасс 50–60 км. При других длинах трасс стандартное отклонение  $\sigma_{\varepsilon}$  изменяется незначительно в области повышенной рефракции и более существенно в области субрефракции. На коротких трассах возможно значительное увеличение  $\sigma_{\varepsilon}$ , т. к. субрефракция часто носит местный характер. Вследствие этого на коротких трассах закон распределения градиента диэлектрической проницаемости атмосферы отличается от нормального. Однако приближенно закон распределения можно считать нормальным с коррекцией значения  $\sigma_{\varepsilon}$  для трасс длиной менее 50 км:

– для  $d \geq 50$  км

$$\sigma_{\varepsilon}(d) = \sigma_{\varepsilon},$$

– для  $d < 50$  км

$$\sigma_{\varepsilon}(d) = \left[ 10^{-7} + \frac{g_{\varepsilon med}}{3.1} \right] \cdot \left[ \frac{1}{0.54 + 0.46 \cdot \text{th}\left(5.4 \cdot 10^{-3} \cdot (d \cdot 10^{-3})^{1.5}\right)} - 1 \right] + \frac{\sigma_{\varepsilon}}{0.54 + 0.46 \cdot \text{th}\left(5.4 \cdot 10^{-3} \cdot (d \cdot 10^{-3})^{1.5}\right)},$$

где  $\sigma_{\varepsilon}$  [1/м] – стандартное отклонение градиента диэлектрической проницаемости атмосферы для места расположения ЦРРЛ ПВ.

Рассчитать значение медианного коэффициента эквивалентного радиуса Земли  $k_{eqmed}$ :

$$k_{eqmed} = \frac{1}{1 + \frac{R_e}{2} \cdot g_{\varepsilon med}},$$

где  $R_e = 6\,371\,000$  м – фактический радиус Земли.

Рассчитать стандартное отклонение градиента диэлектрической проницаемости атмосферы  $\sigma_{\varepsilon}(d)$ .

Рассчитать значение градиента диэлектрической проницаемости атмосферы  $g_{\varepsilon \beta}$ , превышаемого для 99,9 % времени:

$$g_{\varepsilon \beta} = g_{\varepsilon med} + \sigma_{\varepsilon} \cdot I(\beta),$$

где  $\beta = 99,9 \%$ ;

$I(\beta)$  – обратная кумулятивная функция нормального распределения.

Обратная кумулятивная функция нормального распределения может быть вычислена по следующей аппроксимации, справедливой в диапазоне 0,0001 %  $\leq \beta \leq 50$  % и дающей максимальную погрешность порядка 0,00054:

$$I_{\beta} = T - \xi \quad - \text{если } \beta \geq 50 \%;$$

$$I_{\beta} = \xi - T \quad - \text{если } \beta < 50 \%;$$

$$x = 1 - \frac{\beta}{100}, \quad - \text{если } \beta \geq 50 \%;$$

$$x = \frac{\beta}{100}, \quad - \text{если } \beta < 50 \%;$$

$$T = \sqrt{-2 \cdot \ln I};$$

$$\xi = \frac{C_2 \cdot T + C_1 \cdot T^3 + C_0}{D_3 \cdot T + D_2 \cdot T^3 + D_1 \cdot T^5 + 1};$$

$$C_0 = 2,515516698;$$

$$C_1 = 0,802853;$$

$$C_2 = 0,010328;$$

$$D_1 = 1,432788;$$

$$D_2 = 0,189269;$$

$$D_3 = 0,001308.$$

Рассчитать значение эквивалентного радиуса Земли  $k_{\text{equr}}$ , превышаемого для 99,9 % времени:

$$k_{\text{equr}} = \frac{1}{1 + \frac{R_e}{2} \cdot g_{\text{equr}}},$$

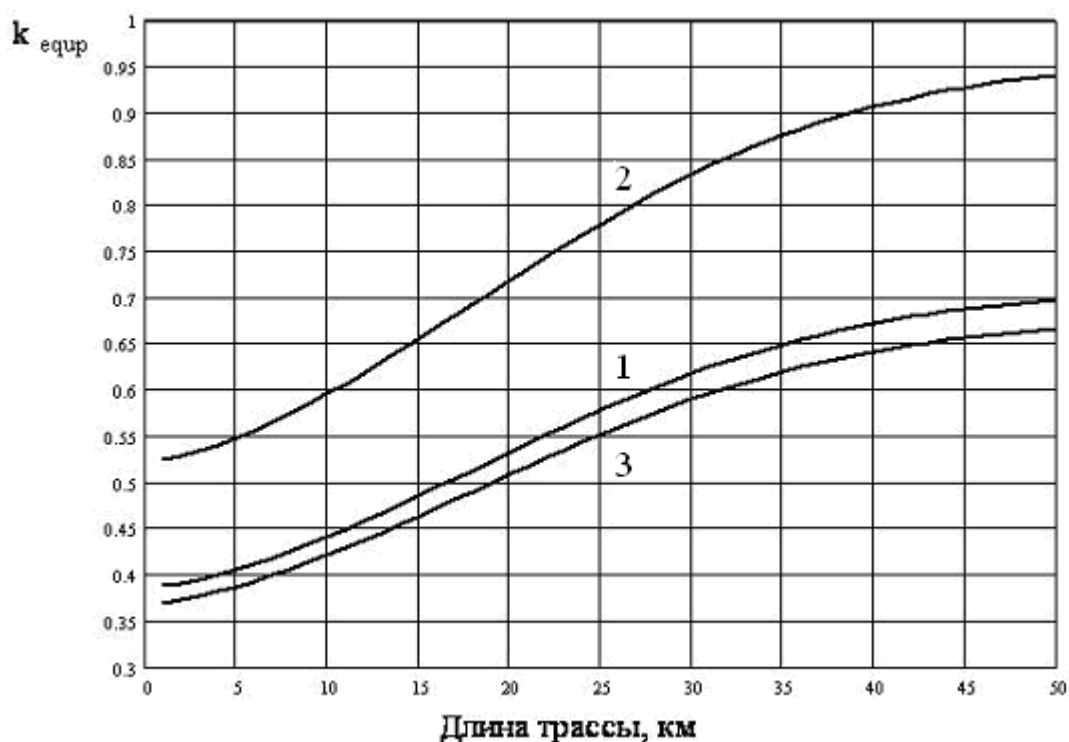
*Результат расчета:* значения коэффициента эквивалентного радиуса Земли  $k_{\text{eqmed}}$  и  $k_{\text{equr}}$ .

Значения медианного коэффициента эквивалентного радиуса Земли, рассчитанные по данным таблицы 3.1, приведены в таблице 3.2. Там же приведено значение для случая, когда отсутствуют точные данные, соответствующее стандартной атмосфере.

Таблица 3.2 – Медианный коэффициент эквивалентного радиуса Земли для территории Республики Беларусь

Летние месяцы	1,402
Зимние месяцы	1,342
Летние месяцы в районе водных массивов (реки, болота и пр.)	1,467
При отсутствии точных данных (стандартная атмосфера)	$4/3 = 1,333$

Значения коэффициента эквивалентного радиуса Земли, превышаемого в течение 99,9 % времени и рассчитанного по данным таблицы 3.1, приведены на рисунке 3.1 (по оси абсцисс отложена длина трассы ЦРРЛ ПВ в км). На рисунке 3.2 приведены значения коэффициента эквивалентного радиуса Земли, превышаемого в течение 99.9 % времени для случая, когда отсутствуют точные данные, согласно Рекомендациям МСЭ.



1 – летние месяцы;

2 – зимние месяцы;

3 – летние месяцы в районе водных массивов (реки, болота и пр.)

Рисунок 3.1 – Значения коэффициента эквивалентного радиуса Земли, превышаемого в течение 99.9 % времени (территория Республики Беларусь)

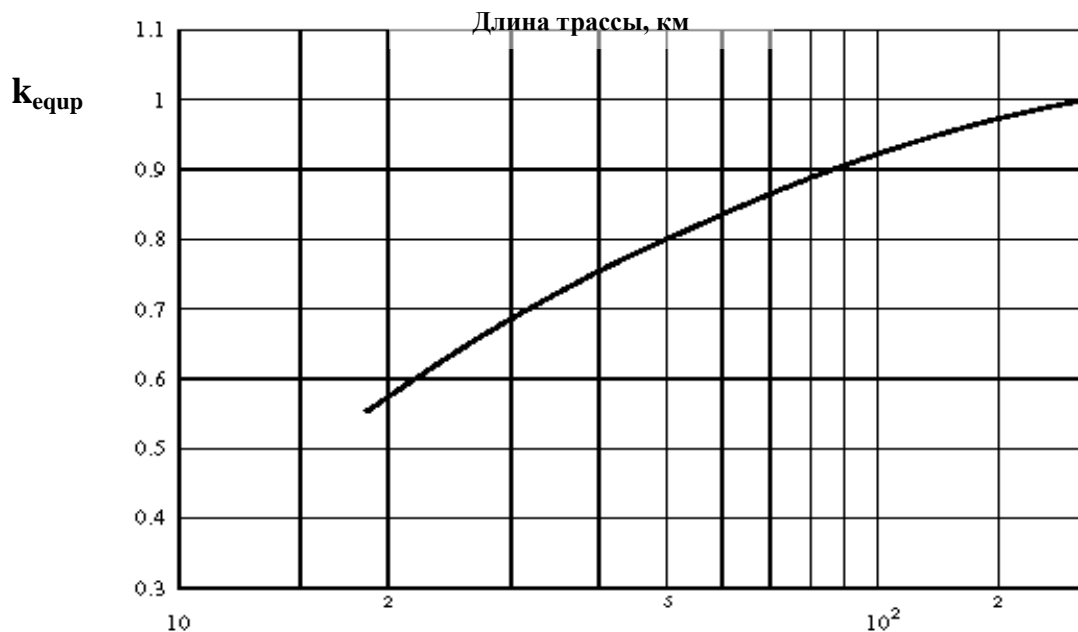


Рисунок 3.2 – Значения коэффициента эквивалентного радиуса Земли, превышаемого в течение 99.9 % времени (умеренный континентальный климат)

Поскольку значения коэффициента эквивалентного радиуса Земли, превышаемого в течение 99,9 % времени, согласно рисунку 3.1 существенно отличаются для летних и зимних месяцев, можно рекомендовать пользоваться наихудшим значением – для летних месяцев (кривая 1), соответственно используя в расчетах и значение медианного коэффициента эквивалентного радиуса Земли для летних месяцев.

### 3.2 Построение профиля трассы цифровой радиорелейной линии прямой видимости

Профиль трассы (пролета) ЦРРЛ ПВ отображает вертикальный разрез местности между передатчиком и приемником со всеми высотными отметками, включая строения, лес и т. д. На профиле необходимо указывать водные поверхности: реки, болота, водохранилища.

*Исходные данные для расчета:*

$k_{\text{equip}}$  – коэффициент эквивалентного радиуса Земли, превышаемый в течение 99.9 % времени (берется из расчета коэффициента эквивалентного радиуса Земли);

$k_{\text{eqmed}}$  – медианное значение коэффициента эквивалентного радиуса Земли (значение берется из расчета коэффициента эквивалентного радиуса Земли);

$d$  [м] – расстояние между передатчиком и приемником (длина пролета ЦРРЛ ПВ);

$f$  [Гц] – рабочая частота ЦРРЛ ПВ (частота передаваемого сигнала).

При построении профиля первоначально используются карты масштаба 1:100 000 и 1:50 000. В дальнейшем отдельные участки трассы, включая критические точки (локальные возвышенности), места установки антенн и пр., уточняются по картам более крупного масштаба (1:25 000, 1:10 000 и т. д.) или непосредственно на местности. Точность построения профилей на критических участках должна быть не хуже  $\pm 3$  м. В таблице 3.3 приведены возможные средние ошибки из-за неточности карт различного масштаба. Предельные ошибки не превышают удвоенной величины средней ошибки.

Таблица 3.3 – Возможные средние ошибки снятия профиля ЦРРЛ ПВ  
из-за неточности используемых карт, м

Характер местности	Масштаб карты			
	1:10 000	1:25 000	1:50 000	1:100 000
Плоскоравнинная	1	1	3	6
Равнинно-холмистая и равнинная залесенная	1	2	4	9
Горы, предгорье, песчаные пустыни	2,5	2,5	5	10
Высокогорная	---	5	10	20

Для удобства построения профиля трассы (пролета) радиорелейной линии используется параболический масштаб. Профиль строится в прямоугольных координатах: расстояние между передатчиком и приемником откладывается не по дуге окружности, а по оси абсцисс, высоты антенн и рельефа откладываются не по радиусам, а по оси ординат. В этом случае линия, изображающая на профиле уровень моря или другой условный нулевой уровень, имеет вид параболы:

$$h_e = \frac{d_1 \cdot (d - d_1)}{2 \cdot R_{eq}} = \frac{d_1 \cdot (d - d_1)}{2 \cdot k_{eq} \cdot R_e}, \quad [м]$$

где  $d_1$  [м] – расстояние между передатчиком и текущей координатой (точкой) профиля, для которой определяется дополнительная высота за счет кривизны земной поверхности;

$d$  [м] – расстояние между передатчиком и приемником (длина пролета радиорелейной линии);

$R_{eq}$  [м] – эквивалентный радиус Земли;

$k_{eq}$  – коэффициент эквивалентного радиуса Земли;

$R_e = 6\,371\,000$  м – фактический радиус Земли.

При выборе высот подвеса антенн определяющим фактором является просвет, т. е. расстояние между траекторией распространения радиоволны между передающей и приемной антенной и профилем трассы (пролета) ЦРРЛ ПВ. Просвет считается положительным, когда траектория распространения радиоволны проходит выше любой точки профиля трассы (пролета), и отрицательным, когда траектория распространения радиоволны пересекает профиль трассы (пролета) радиорелейной линии. Обычно просвет оценивается относительно радиуса первой зоны Френеля. Радиус первой зоны Френеля  $F_1$  [м]:



$$F_1 = 17300 \cdot \sqrt{\frac{d_1 \cdot (d - d_1)}{f \cdot d}}, \quad [\text{м}]$$

где  $d_1$  [м] – расстояние между передатчиком и текущей координатой (точкой) профиля, для которой определяется дополнительная высота за счет кривизны земной поверхности;

$d$  [м] – расстояние между передатчиком и приемником (длина пролета ЦРРЛ ПВ);

$f$  [Гц] – рабочая частота ЦРРЛ ПВ (частота передаваемого сигнала).

Отметим, что величина просвета зависит от величины коэффициента эквивалентного радиуса Земли и, следовательно, является случайной величиной, зависящей от электрических свойств атмосферы. Численное значение просвета всегда соответствует конкретной величине коэффициента эквивалентного радиуса Земли.

В зависимости от величины просвета трассы подразделяются на три типа.

1 Открытые трассы, для которых величина просвета  $H$ :

$$H \geq H_0 = \alpha \cdot F_1,$$

где  $\alpha$  – коэффициент, равный  $1/\sqrt{3} \approx 0,6$ ;

$F_1$  – радиус первой зоны Френеля.

В различных методиках значение коэффициента  $\alpha$  может отличаться от 0,6 и составлять 0–1,0.

2 Полуоткрытые трассы, для которых величина просвета  $H$ :

$$0 < H < \alpha \cdot F_1.$$

### 3 Закрытые трассы, для которых величина просвета $H$ :

$$H < 0.$$

В данной методике используется понятие линии минимально допустимого просвета, под которой понимается линия, высота которой меньше высоты траектории распространения радиоволны от передатчика к приемнику на величину, равную заданному минимально допустимому просвету  $H_{\min} = \alpha \cdot F_1$ .

Построение профиля трассы (пролета) ЦРРЛ ПВ может быть произведено двумя эквивалентными способами, отличающимися учетом дополнительной высоты за счет кривизны Земли либо в высоте рельефа местности, либо в высоте траектории распространения радиоволны от передатчика к приемнику. Второй способ более удобен, т.к. позволяет на одном графике оценить величину просвета для различных значений коэффициента эквивалентного радиуса Земли.

Важным моментом при построении профиля является выбор шага снятия по расстоянию высот профиля трассы ЦРРЛ ПВ с карты. Это особенно актуально при снятии профиля с цифровой карты местности, где пользователь часто не имеет возможности визуально оценить адекватность снятия профиля (учет всех высоких точек рельефа и искусственных препятствий на трассе). В различных методиках рекомендуется для цифровых карт точность представления рельефа местности в пределах 20 – 1000 м.

Построение профиля трассы (пролета) ЦРРЛ ПВ осуществляется в следующей последовательности.

1 Относительно нулевой линии строится профиль высот рельефа, снятый с карты или полученный иным образом. При значительном превышении средним уровнем высот рельефа уровня моря для укрупнения масштаба по оси ординат профиль рельефа рекомендуется строить относительно условного

нулевого уровня, превышающего уровень моря на некоторое фиксированное значение.

2 Для выбранных высот подвеса отмечаются точки расположения передающей и приемной антенны.

3 Строится траектория распространения радиоволны как кривая линия, высота которой меньше прямой линии, соединяющая точки расположения передающей и приемной антенны, на дополнительную высоту за счет кривизны Земли:

$$h_e = \frac{d_1 \cdot (d - d_1)}{2 \cdot k_{eq} \cdot R_e}, \text{ [м]}$$

где  $k_{eq}$  – заданное значение коэффициента эквивалентного радиуса Земли.

4 Строится линия минимально допустимого просвета для заданной величины  $H_{min} = \alpha \cdot F_1$ . При необходимости в линии минимально допустимого просвета учитывается ошибка снятия профиля, т. е. данная линия строится с высотой, меньшей высоты соединяющей антенны линии на величину:

$$H_{min} = \alpha \cdot F_1 + \Delta h = \alpha \cdot 17300 \cdot \sqrt{\frac{d_1 \cdot (d - d_1)}{f \cdot d}} + \Delta h, \text{ [м]}$$

где  $\Delta h$  [м] – ошибка снятия профиля. Может принимать значения от нуля до удвоенной средней ошибки для карты, по которой снимался или уточнялся профиль для критических точек трассы.

### **3.3 Выбор высот подвеса антенн цифровой радиорелейной линии прямой видимости для незащищенной линии**

Под незащищенной ЦРРЛ ПВ понимается радиорелейная линия, в которой не используются методы разнесения.

Идеально спроектированной трассой ЦРРЛ ПВ считается такая, в которой отсутствуют (или сведены к минимуму) потери распространения радиоволн за счет дифракции и отражения от поверхности Земли.

В соответствии с Рекомендацией МСЭ R-P.530 радиолинии следует прокладывать таким образом, чтобы использовать все преимущества местности и увеличить угол наклона трассы  $\theta$  (угол между горизонталью и направлением максимума диаграммы направленности антенны). Увеличение этого угла помогает уменьшить вредное влияние эффектов, связанных с расхождением лучей, поверхностным многолучевым замиранием и атмосферным многолучевым замиранием. Кроме того, радиолинии, если это возможно, должны располагаться таким образом, чтобы уменьшить отражение от поверхности Земли и, следовательно, уменьшить многолучевое замирание и искажение. Предполагается такой выбор трасс для надводных радиолиний, чтобы переместить точку отражения с водной поверхности на поверхность суши, а также избежать прохождения надводных и пролегающих над сушей трасс над плоскими сильно отражающими поверхностями, расположенными на суше. Другой способ уменьшения поверхностного отражения – это изменить угол наклона антенны, ориентируя ее несколько выше. В этом случае приходится делать выбор между ухудшением направленности антенны в условиях нормальной рефракции, которое влечет за собой этот метод, и уменьшением замирания, вызванного многолучевостью. Также возможно уменьшение просвета трассы, особенно на частотах ниже примерно 2 ГГц, чтобы избежать слишком больших высот подвеса антенн. В этом случае

приходится делать выбор между снижением интенсивности замирания за счет многолучевости и увеличением замирания в условиях субрефракции.

Выбор высот подвеса антенн ЦРРЛ ПВ осуществляется в следующей последовательности.

1 Строится профиль трассы (пролета) ЦРРЛ ПВ для медианного значения коэффициента эквивалентного радиуса Земли  $k_{eqmed}$  и минимально допустимого просвета, равного  $H_{min} = 1,0 \cdot F_1$  ( $F_1$  – радиус первой зоны Френеля).

2 Выбираются такие высоты передающей и приемной антенны, при которых линия минимально допустимого просвета для медианного значения эквивалентного радиуса Земли не пересекает профиль высот рельефа и хотя бы в одной точке касается его (реальный минимальный просвет на трассе равен минимально допустимому просвету).

3 Строится профиль трассы (пролета) РРЛ для значения коэффициента эквивалентного радиуса Земли  $k_{equp}$ , превышаемого в течение 99,9 % времени, и минимально допустимого просвета  $H_{min}$ , равного  $0,0 \cdot F_1$  (на трассе имеется единичное изолированное препятствие) или  $0,3 \cdot F_1$  (препятствие на трассе простирается вдоль ее части).

4 Выбираются такие высоты передающей и приемной антенны, при которых линия минимально допустимого просвета для значения эквивалентного радиуса Земли, превышаемого в течение 99,9 % времени, не пересекает профиль высот рельефа и хотя бы в одной точке касается его (реальный минимальный просвет на трассе равен минимально допустимому просвету).

5 Окончательно выбирается большее из значений высот антенн, определенных на шагах 2 и 4.

Шаги 1 и 3 могут быть объединены при использовании выбранного способа построения профиля трассы ЦРРЛ ПВ.

На рисунке 3.3 в качестве примера приведена типовая трасса ЦРРЛ ПВ (рабочая частота 7 ГГц).

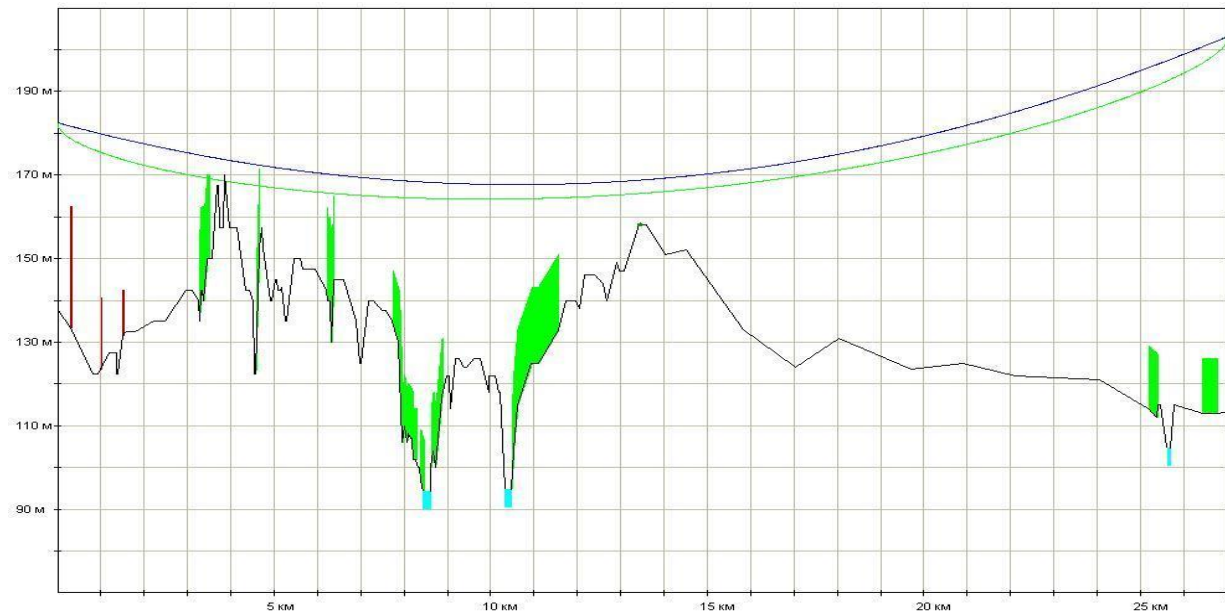


Рисунок 3.3 – Типовая трасса ЦРРЛ ПВ

Рассчитывается угол возвышения/наклона трассы радиорелейной линии  $\theta$  [рад] (угол между горизонталью и направлением максимума диаграммы направленности антенны):

$$\theta = \left| \arctg \left[ \frac{h_{txasl} - h_{rxasl}}{d} \right] \right| \approx \left| \frac{h_{txasl} - h_{rxasl}}{d} \right|, \text{ [рад]}$$

где  $h_{txasl}$  и  $h_{rxasl}$  [м] – соответственно выбранная высота подвеса передающей и приемной антенны над уровнем моря.

### *Результат расчета*

1 Профиль трассы ЦРРЛ ПВ для двух значений коэффициента эквивалентного радиуса Земли  $k_{eqmed}$  и  $k_{equip}$  с нанесенными линиями минимально допустимого просвета.

2 Высоты подвеса передающей и приемной антенны соответственно над уровнем земной поверхности в точке установки  $h_{tx}$  [м] и  $h_{rx}$  [м] и над уровнем моря  $h_{txasl}$  [м] и  $h_{rxasl}$  [м].

3 Угол возвышения/наклона трассы ЦРРЛ ПВ  $\theta$  [рад].

## 4 РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ПЕРЕДАЧИ РАДИОЛИНИИ

### 4.1 Потери передачи в свободном пространстве

Под распространением радиоволн в свободном пространстве понимается распространение электромагнитной волны в однородной идеальной диэлектрической среде, которую можно считать бесконечной во всех направлениях.

*Исходные данные для расчета*

$d$  [м] – расстояние между передатчиком и приемником (длина пролета ЦРРЛ ПВ);

$\lambda$  [м] или  $f$  [Гц] – рабочая длина волны или частота ЦРРЛ ПВ (длина волны или частота передаваемого сигнала).

Потери передачи в свободном пространстве  $L_{bf}$  [дБ]:

$$L_{bf} = 20 \cdot \lg\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda}\right), \quad [\text{дБ}]$$

или

$$L_{bf} = 20 \cdot \lg\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f}{c}\right) = 20 \cdot \lg\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f}{2.99792458 \cdot 10^8}\right), \quad [\text{дБ}]$$

где  $c = 2,99792458 \cdot 10^8$  [м/с] – скорость света в вакууме.

Потери передачи в свободном пространстве также могут быть рассчитаны по упрощенному выражению:

$$L_{bf} = -147.6 + 20 \cdot \lg\left(\frac{d}{f}\right) + 20 \cdot \lg\left(\frac{f}{c}\right), \quad [\text{дБ}]$$



где  $d$  [м] – расстояние между передатчиком и приемником (длина пролета ЦРРЛ ПВ);

$\lambda$  [м] или  $f$  [Гц] – рабочая длина волны или частота ЦРРЛ ПВ (длина волны или частота передаваемого сигнала).

*Результат расчета:* потери передачи в свободном пространстве  $L_{bf}$  [дБ].

## 4.2 Потери передачи в атмосферных газах

Потери распространения радиоволн, обусловленные поглощением в атмосферном кислороде и водяных парах, должны учитываться при расчете потерь передачи ЦРРЛ ПВ на частотах выше примерно 10 ГГц.

*Исходные данные для расчета:*

$d$  [м] – расстояние между передатчиком и приемником (длина пролета ЦРРЛ ПВ);

$f$  [Гц] – рабочая частота ЦРРЛ ПВ (частота передаваемого сигнала).

$p$  [Па] – атмосферное давление на пролете ЦРРЛ ПВ;

$t$  [°C] – температура воздуха на пролете ЦРРЛ ПВ.

$\rho$  [г/м<sup>2</sup>] – плотность паров воды в атмосфере на пролете ЦРРЛ ПВ.

Потери передачи в атмосферных газах  $A_a$ :

$$A_a = \gamma_a \cdot d, \quad [\text{дБ}]$$

где  $\gamma_a$  [дБ/м] – погонное ослабление в атмосферных газах;

$d$  [м] – расстояние между передатчиком и приемником (длина пролета ЦРРЛ ПВ).

Погонное ослабление  $\gamma_a$  состоит из двух слагаемых, отражающих погонное ослабление в сухом воздухе  $\gamma_o$  [дБ/м] и погонное ослабление в парах воды  $\gamma_w$  [дБ/м]:

$$\gamma_a = \gamma_o + \gamma_w. \quad [\text{дБ/м}]$$

Погонное ослабление в сухом воздухе  $\gamma_o$  для частот  $\leq 54$  ГГц:

$$\gamma_o = \left[ \frac{\frac{7.2 \cdot r_t^{2.8}}{f^2 \cdot 10^{-18} + 0.34 \cdot r_p^2 \cdot r_t^{1.6}} + \frac{0.62 \cdot \xi_3}{\left(54 - f \cdot 10^{-9}\right)^{1.16 \cdot \xi_1} + 0.83 \cdot \xi_2}}{\right] \times f^2 \cdot r_p^2 \cdot 10^{-24}, \quad [\text{дБ/м}]$$

$$\xi_1 = \varphi(r_p, r_t, 0.0717, -1.8132, 0.0156, -1.6515),$$

$$\xi_2 = \varphi(r_p, r_t, 0.5146, -4.6368, -0.1921, -5.7416),$$

$$\xi_3 = \varphi(r_p, r_t, 0.3414, -6.5851, 0.2130, -8.5854),$$

$$\varphi(r_p, r_t, a, b, c, d) = r_p^a \cdot r_t^b \cdot \exp\left[ \frac{c}{r_p} + d \cdot \frac{1}{r_t} \right]$$

$$r_p = \frac{p}{101300},$$

$$r_t = \frac{288}{273 + t},$$

где  $p$  [Па] – атмосферное давление на пролете ЦРРЛ ПВ;  
 $t$  [°C] – средняя температура воздуха на пролете ЦРРЛ ПВ;  
 $f$  [Гц] – рабочая частота ЦРРЛ ПВ (частота передаваемого сигнала).

Погонное ослабление для паров воды  $\gamma_w$ :

$$\gamma_w = \left\{ \begin{aligned} & \frac{3.98 \cdot \eta_1 \cdot \exp \left[ -0.23 \cdot \left( \frac{1}{r_t} \right) \right] \cdot g \left( f \cdot 10^{-9}, 22 \right) +}{\left( f \cdot 10^{-9} - 22.235 \right)^2 + 9.42 \cdot \eta_1^2} + \\ & \frac{11.96 \cdot \eta_1 \cdot \exp \left[ -0.7 \cdot \left( \frac{1}{r_t} \right) \right] +}{\left( f \cdot 10^{-9} - 183.31 \right)^2 + 11.14 \cdot \eta_1^2} + \\ & \frac{0.081 \cdot \eta_1 \cdot \exp \left[ -0.44 \cdot \left( \frac{1}{r_t} \right) \right] +}{\left( f \cdot 10^{-9} - 321.226 \right)^2 + 6.29 \cdot \eta_1^2} + \\ & \frac{3.66 \cdot \eta_1 \cdot \exp \left[ -0.6 \cdot \left( \frac{1}{r_t} \right) \right] +}{\left( f \cdot 10^{-9} - 325.153 \right)^2 + 9.22 \cdot \eta_1^2} + \\ & \frac{25.37 \cdot \eta_1 \cdot \exp \left[ -0.09 \cdot \left( \frac{1}{r_t} \right) \right] +}{\left( f \cdot 10^{-9} - 380 \right)^2} + \\ & \frac{17.4 \cdot \eta_1 \cdot \exp \left[ -0.46 \cdot \left( \frac{1}{r_t} \right) \right] +}{\left( f \cdot 10^{-9} - 448 \right)^2} + \\ & \frac{844.6 \cdot \eta_1 \cdot \exp \left[ -0.17 \cdot \left( \frac{1}{r_t} \right) \right] \cdot g \left( f \cdot 10^{-9}, 557 \right) +}{\left( f \cdot 10^{-9} - 557 \right)^2} + \\ & \frac{290 \cdot \eta_1 \cdot \exp \left[ -0.41 \cdot \left( \frac{1}{r_t} \right) \right] \cdot g \left( f \cdot 10^{-9}, 752 \right) +}{\left( f \cdot 10^{-9} - 752 \right)^2} + \\ & \frac{8.3328 \cdot 10^4 \cdot \eta_2 \cdot \exp \left[ -0.99 \cdot \left( \frac{1}{r_t} \right) \right] \cdot g \left( f \cdot 10^{-9}, 1780 \right)}{\left( f \cdot 10^{-9} - 1780 \right)^2} \end{aligned} \right\} \times f^2 \cdot r_t^{2.5} \cdot \rho \cdot 10^{-25}$$

[дБ/м]

где  $\rho$  [г/м<sup>3</sup>] – плотность паров воды в атмосфере на пролете ЦРРЛ ПВ;

$f$  [Гц] – рабочая частота ЦРРЛ ПВ (частота передаваемого сигнала);

$\gamma_p$  и  $\gamma_t$  – определены выше при расчете потерь в сухом воздухе.

*Результат расчета:* потери передачи в атмосферных газах  $A_a$  [дБ].

На рисунке 4.1 в качестве примера представлена зависимость погонного ослабления в атмосферных газах  $\gamma_o$  [дБ/км] от частоты [ГГц] для произвольно выбранных параметров атмосферы ( $p = 1013$  гПа,  $t = 15$  °С,  $\rho = 7,5$  г/м<sup>3</sup>).

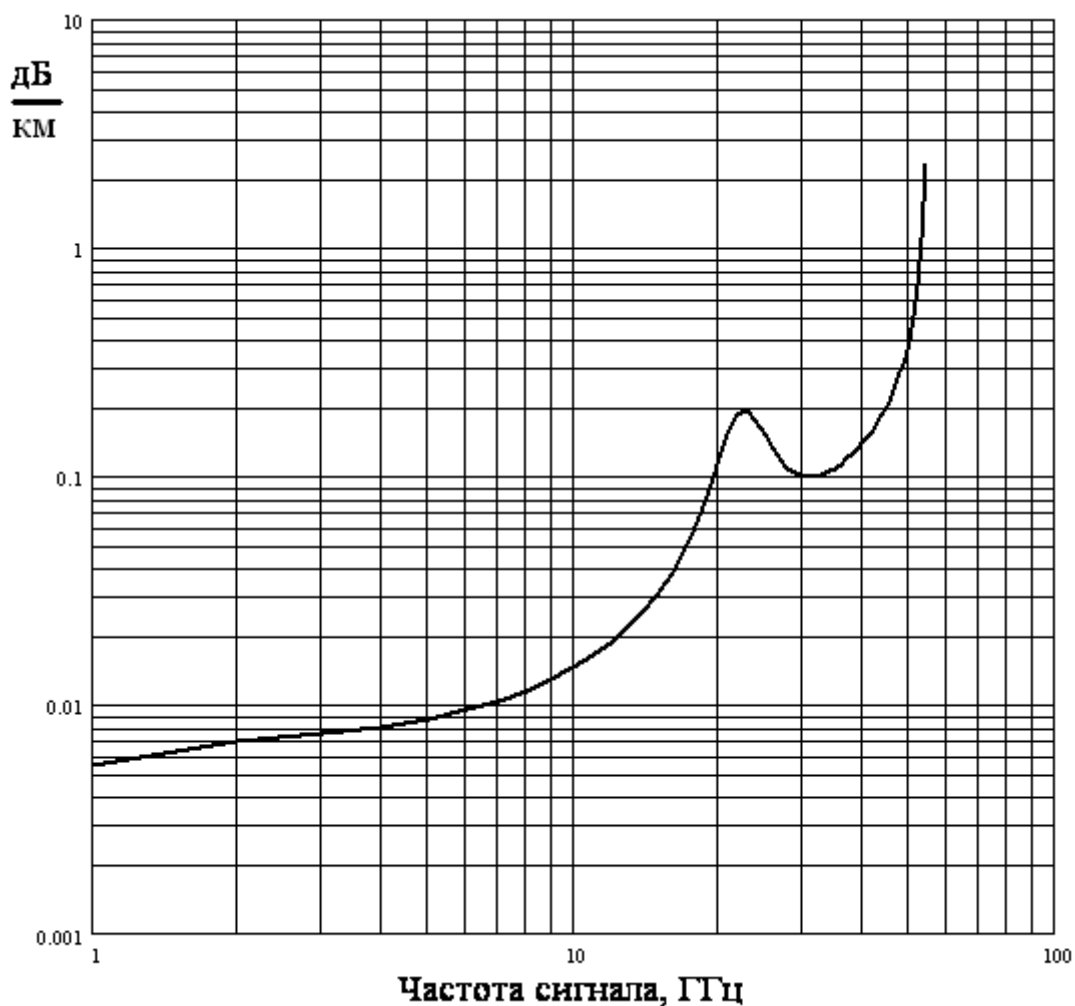


Рисунок 4.1 – Типовая зависимость погонного ослабления в атмосферных газах от частот радиосигнала

### 4.3 Дифракционные потери

Настоящая методика применима только для ЦРРЛ ПВ, для которых по крайней мере в течение достаточно большого процента времени линия визирования между передатчиком и приемником с учетом атмосферной рефракции радиоволн проходит над рельефом местности. Однако высоты антенн могут быть выбраны таким образом, что при критической субрефракции величина относительного просвета трассы будет достаточно мала (0 – 0,3 от радиуса первой зоны Френеля). В этом случае возможно появление дифракционных потерь, которые необходимо учесть в расчете потерь передачи радиолинии.

Расчет дифракционных потерь основан на обобщенном методе для одного или более препятствий. Исходным материалом расчета является профиль трассы (пролета) для выбранных высот передатчика и приемника, построенный для значения коэффициента эквивалентного радиуса Земли  $k_{\text{equip}}$ , превышаемого в течение заданного процента времени.

*Исходные данные для расчета:*

$d$  [м] – расстояние между передатчиком и приемником (длина пролета ЦРРЛ ПВ);

$k_{\text{equip}}$  – коэффициент эквивалентного радиуса Земли, превышаемый в течение заданного процента времени (значение берется из расчета коэффициента эквивалентного радиуса Земли);

$h_{\text{txasl}}$  [м] – высота передающей антенны над уровнем моря (значение берется из раздела построения профиля трассы ЦРРЛ ПВ и выбора высот подвеса антенн);

$h_{rxasl}$  [м] – высота приемной антенны над уровнем моря (значение берется из раздела построения профиля трассы ЦРРЛ ПВ и выбора высот подвеса антенн);

$\lambda$  [м] – рабочая длина волны ЦРРЛ ПВ (длина волны передаваемого сигнала).

Строится профиль трассы (пролета) ЦРРЛ ПВ для выбранных высот антенн передатчика и приемника и для значения коэффициента эквивалентного радиуса Земли  $k_{equip}$ , превышаемого в течение 99,9 % времени. Находится точка профиля с максимальной величиной вспомогательного параметра  $v_n$ :

$$v_n = \left[ h_n + \frac{d_{txn} \cdot d_{nrx}}{2 \cdot k_{equip} \cdot R_e} - \frac{h_{txasl} \cdot d_{nrx} + h_{rxasl} \cdot d_{txn}}{d} \right] \times \sqrt{\frac{2 \cdot d}{\lambda \cdot d_{txn} \cdot d_{nrx}}},$$

где

$d$  [м] – расстояние между передатчиком и приемником (длина пролета ЦРРЛ ПВ);

$h_n$  [м] – высота выбранной точки профиля над уровнем моря;

$d_{txn}$  и  $d_{nrx}$  [м] – соответственно расстояние по горизонтали между передатчиком и выбранной точкой профиля и выбранной точкой профиля и приемником;

$k_{equip}$  – коэффициент эквивалентного радиуса Земли, превышаемый в течение 99,9 % времени (значение берется из расчета коэффициента эквивалентного радиуса Земли);

$R_e = 6\,371\,000$  м – фактический радиус Земли;

$h_{txasl}$  [м] – высота передающей антенны над уровнем моря;

$h_{\text{rxasl}}$  [М] – высота приемной антенны над уровнем моря;  
 $\lambda$  [М] – рабочая длина волны ЦРРЛ ПВ (длина волны передаваемого сигнала).

Геометрический смысл входящих в выражение величин показан на рисунке 4.2.

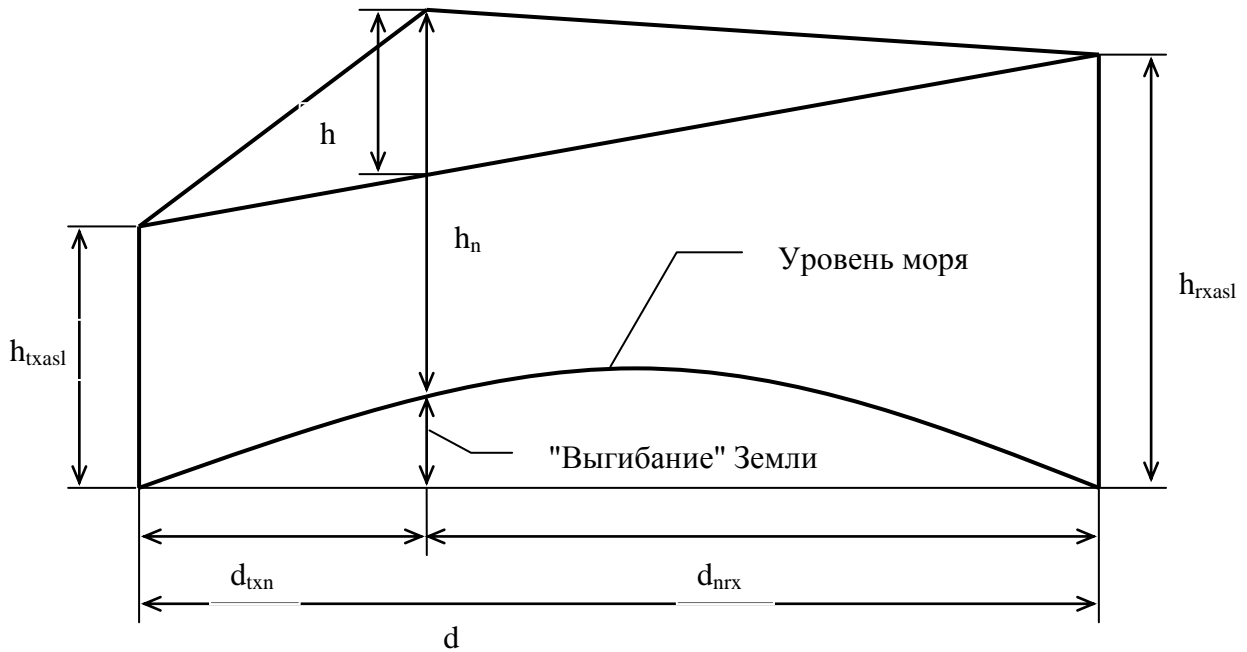


Рисунок 4.2 Пример анализа профиля трассы для расчета дифракционных потерь

Дифракционные потери за счет препятствия в выбранной точке профиля  $J(v_n)$  [дБ]:

$$J(v_n) = 6.9 + 20 \cdot \lg \left[ \sqrt{(v_n - 0.1)^2 + 1} + v_n - 0.1 \right], \quad [\text{дБ}] \quad \text{если } v_n > (-0,78),$$

$$J(v_n) = 0, \quad [\text{дБ}] \quad \text{если } v_n \leq (-0,78).$$



Если  $v_n \leq -0,78$ , то дифракционные потери  $A_d$  [дБ]:

$$A_d = 0. \quad [\text{дБ}]$$

Если  $v_n > -0,78$ , то дополнительно находятся две точки с максимальной величиной вспомогательного коэффициента  $v$  – по одной между передатчиком и выбранной выше точкой ( $v_t$ ) и между выбранной выше точкой и приемником ( $v_r$ ). Для этих двух точек по приведенным выше формулам определяются дополнительные дифракционные потери  $J(v_t)$  и  $J(v_r)$ . Дифракционные потери  $A_d$  [дБ]:

$$A_d = J(v_n) + \left[ 1.0 - \exp\left(-\frac{J(v_n)}{6.0}\right) \right] \cdot \left[ J(v_t) + J(v_r) + 10.0 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot d \right]. \quad [\text{дБ}]$$

*Результат расчета* – дифракционные потери  $A_d$  [дБ].

#### **4.4 Расчет энергетического запаса на замирания цифровой радиорелейной линии связи прямой видимости**

Расчет показателей качества ЦРРЛ ПВ (неготовности и показателя качества по ошибкам) основывается на энергетическом запасе на замирания.

*Исходные данные для расчета:*

$A_a$  [дБ] – потери передачи в атмосферных газах (значение берется из раздела расчета потерь в атмосферных газах);

$A_d$  [дБ] – дифракционные потери (значение берется из раздела расчета дифракционных потерь подраздела 4.3);

$P_{\text{rxo}}$  [дБВт] – мощность сигнала на входе приемника, соответствующая заданному пороговому значению коэффициента ошибочных бит  $BER_o$ ;

$P_{\text{tx}}$  [дБВт] – мощность сигнала на выходе передатчика (до фидера питания антенны);

$L_{\text{ftx}}$  [дБ] и  $L_{\text{frx}}$  [дБ] – соответственно потери в фидере передающей и приемной антенны;

$L_{\text{ctx}}$  [дБ] и  $L_{\text{crx}}$  [дБ] – соответственно потери в цепях передающей и приемной антенны;

$G_{\text{tx}}$  [дБи] и  $G_{\text{rx}}$  [дБи] – соответственно коэффициент усиления относительно изотропного излучателя передающей и приемной антенны;

$L_{\text{bf}}$  [дБ] – потери передачи в свободном пространстве газах (значение берется из раздела расчета потерь передачи в свободном пространстве).

Рассчитывается энергетический запас на замирания  $A_m$  [дБ]:

$$A_m = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} + G_{\text{rx}} - L_{\text{ftx}} - L_{\text{frx}} - L_{\text{ctx}} - L_{\text{crx}} - L_{\text{bf}} - A_a - A_d - P_{\text{rxo}}, \quad [\text{дБ}]$$

где  $A_{\text{ang}}$  [дБ] – потери, обусловленные колебанием угла прихода/выхода радиоволн;

$P_{\text{rxo}}$  [дБВт] – мощность сигнала на входе приемника, соответствующая заданному пороговому значению коэффициента ошибочных бит  $BER_o$ .

$P_{\text{tx}}$  [дБВт] – мощность сигнала на выходе передатчика (до фидера питания антенны);

$G_{\text{tx}}$  [дБи] и  $G_{\text{rx}}$  [дБи] – соответственно коэффициент усиления относительно изотропного излучателя передающей и приемной антенны;

$L_{ftx}$  [дБ] и  $L_{frx}$  [дБ] – соответственно потери в фидере передающей и приемной антенны;

$L_{ctx}$  [дБ] и  $L_{crx}$  [дБ] – соответственно потери в цепях передающей и приемной антенны;

$L_{bf}$  [дБ] – потери передачи в свободном пространстве;

$A_a$  [дБ] – потери передачи в атмосферных газах;

$A_d$  [дБ] – дифракционные потери.

*Результат расчета* – энергетический запас на замирания  $A_m$  [дБ].

## 5 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЦРРЛ

Типичными параметрами, характеризующими ЦРРЛ ПВ, являются показатели качества по ошибкам и готовность. На трассах (пролетах) распространения радиоволн на частотах выше примерно 17 ГГц преобладают ослабление сигнала в дожде (атмосферных гидрометеорах), а на частотах ниже примерно 10 ГГц – искажения вследствие многолучевого распространения.

Поэтому ЦРРЛ ПВ в основном должны проектироваться исходя из требований на неготовность при работе на частотах выше 17 ГГц и исходя из показателей качества по ошибкам при работе на частотах ниже примерно 10 ГГц; при работе в диапазоне частот 10–17 ГГц следует учитывать оба показателя.

### 5.1 Определение геоклиматического коэффициента

Для прогнозирования неселективных сбоев вследствие многолучевого характера распространения радиоволн необходимо знание геоклиматического коэффициента  $K$ . Геоклиматический коэффициент оценивается для среднего наихудшего месяца по данным о замираниях радиоволн для конкретной географической области.

*Исходные данные для расчета:*

$dN_1$  [N-единиц/км] – значение градиента рефракции в пределах первых 65 м атмосферы, не превышаемое в течение 1 % времени в течение года. Для территории Республики Беларусь  $dN_1 =$  минус 400 N-единиц/км;

$S_a$  [м] – неровность рельефа в месте расположения ЦРРЛ ПВ. Определяется как стандартное отклонение высот точек рельефа на площади  $110 \times 110$  км, взятых с шагом  $30''$ . Данная зона должна быть выровнена по долготе, так чтобы две одинаковые половины зоны находились по обе стороны долготы, проходящей через центр трассы. Для  $S_a < 1$  м следует принять  $S_a = 1$  м.

Геоклиматический коэффициент рассчитывается согласно выражению

$$K = 10^{-3.9 - 0.003 \cdot dN_1} \cdot S_a^{-0.42},$$

где  $dN_1$  [N-единиц/км] – значение градиента рефракции в пределах первых 65 м атмосферы, не превышаемое в течение 1 % времени в течение года;

$S_a$  [м] – неровность рельефа в месте расположения ЦРРЛ ПВ.

Если необходим быстрый расчет или цифровая карта местности недоступна, то геоклиматический коэффициент может быть рассчитан согласно выражению

$$K = 10^{-4.2 - 0.0029 \cdot dN_1}.$$

*Результат расчета:* геоклиматический коэффициент  $K$  для трассы ЦРРЛ ПВ.

## **5.2 Прогнозирование показателей качества по ошибкам цифровой радиорелейной линии прямой видимости**

*Исходные данные для расчета:*

$\theta$  [рад] – угол возвышения/наклона трассы ЦРРЛ ПВ (угол между горизонталью и направлением максимума диаграммы направленности антенны). Значение берется из расчета профиля трассы ЦРРЛ ПВ;

$A_m$  [дБ] – энергетический запас на замирания для заданного значения коэффициента ошибочных бит BER<sub>0</sub>;

$K$  – геоклиматический коэффициент;

$d$  [М] – расстояние между передатчиком и приемником (длина пролета ЦРРЛ ПВ);

$f$  [Гц] – рабочая частота ЦРРЛ ПВ (частота передаваемого сигнала);

$h_{txasl}$  [М] – высота передающей антенны над уровнем моря;

$h_{rxasl}$  [М] – высота приемной антенны над уровнем моря;

$W_M$  и  $W_{NM}$  [ГГц] – ширина сигнатуры ЦРРЛ ПВ, определенная соответственно при замирании с минимальной и неминимальной фазой;

$B_M$  и  $B_{NM}$  [дБ] – глубина сигнатуры ЦРРЛ ПВ, определенная соответственно при замирании с минимальной и неминимальной фазой;

$\tau_{r,M}$  и  $\tau_{r,NM}$  [нс] – эталонное значение задержки, используемое при нахождении сигнатуры ЦРРЛ ПВ соответственно при замирании с минимальной и неминимальной фазой;

$\lambda$  [М] – рабочая длина волны ЦРРЛ ПВ (длина волны передаваемого сигнала).

Расчет показателя качества по ошибкам  $P_t$  (вероятности сбоев в условиях ясного неба) включает расчет двух составляющих – вероятности сбоев из-за неселективной составляющей замираний и из-за селективной составляющей замираний.

Расчет вероятности (процента времени) сбоев из-за неселективной составляющей замираний  $P_{ns}$  ( $p_w$  [%]). Вначале вычисляется процент времени  $p_0$  [%] среднего наихудшего месяца, в течение которого превышаетя глубина неселективных замираний 0 дБ. Если геоклиматический коэффициент определен на основе цифровой карты (через параметр  $S_a$  – неровность рельефа в месте расположения ЦРРЛ ПВ), то

$$p_0 = K \cdot (d \cdot 10^{-3})^{3.2} \cdot (1 + \theta \cdot 1000)^{-0.97} \cdot 10^{0.032 \cdot f \cdot 10^{-9} - 0.00085 \cdot h_1}, \quad [\%]$$

где

$K$  – геоклиматический коэффициент;

$d$  [м] – расстояние между передатчиком и приемником (длина пролета ЦРРЛ ПВ);

$\theta$  [рад] – угол возвышения/наклона трассы ЦРРЛ ПВ (угол между горизонталью и направлением максимума диаграммы направленности антенны). Значение берется из расчета профиля трассы ЦРРЛ ПВ;

$f$  [Гц] – рабочая частота ЦРРЛ ПВ (частота передаваемого сигнала);

$h_1$  [м] – высота подвеса более низкой антенны (передатчика или приемника).

Если геоклиматический коэффициент определен без цифровой карты (не использовался параметр  $S_a$  – неровность рельефа в месте расположения ЦРРЛ ПВ), то

$$p_0 = K \cdot (d \cdot 10^{-3})^{3.0} \cdot (1 + \theta \cdot 1000)^{-1.2} \cdot 10^{0.033 \cdot f \cdot 10^{-9} - 0.001 \cdot h_1}, \quad [\%]$$

Вычисляется глубина замирания  $A_t$  [дБ], соответствующая границе между распределениями для глубокого и неглубокого замирания:

$$A_t = 25 + 1.2 \cdot \lg(p_0). \quad [\text{дБ}]$$

Дальнейший расчет зависит от соотношения величин  $A_t$  и энергетического запаса на замирания  $A_m$ .

Если  $A_m \geq A_t$ , то процент времени сбоев из-за неселективной составляющей замираний

$$p_w = p_0 \cdot 10^{-\frac{A_m}{10}}. \quad [\%]$$

Если  $A_m < A_t$ , то вначале рассчитывается процент времени  $p_t$  [%], в течение которого превышает глубину замираний  $A_t$ :

$$p_t = p_0 \cdot 10^{-\frac{A_t}{10}}. \quad [\%]$$

Рассчитывается вспомогательный коэффициент  $q'_a$ :

$$q'_a = -20 \cdot \lg \left[ -\ln \left( \frac{100 - p_t}{100} \right) \right] / A_t.$$

Рассчитывается вспомогательный коэффициент  $q_t$ :

$$q_t = \frac{q'_a - 2}{\left( 1 + 0.3 \cdot 10^{-\frac{A_t}{20}} \right) \cdot 10^{-0.016 \cdot A_t}} - 4.3 \cdot \left( 10^{-\frac{A_t}{20}} + \frac{A_t}{800} \right).$$

Рассчитывается вспомогательный коэффициент  $q_a$ :

$$q_a = 2 + \left[ 1 + 0.3 \cdot 10^{-\frac{A_m}{20}} \right] \cdot \left[ 10^{-0.016 \cdot A_m} \right] \cdot \left[ q_t + 4.3 \cdot \left( 10^{-\frac{A_m}{20}} + \frac{A_m}{800} \right) \right].$$



Рассчитывается процент времени сбоев из-за неселективной составляющей замираний:

$$p_w = 100 \cdot \left[ 1 - \exp \left( -10 \frac{q_a \cdot A_m}{20} \right) \right], \quad [\%]$$

Вероятность сбоев из-за неселективной составляющей замираний:

$$P_{ns} = \frac{P_w}{100}.$$

Расчет вероятности сбоев из-за селективной составляющей замираний  $P_s$ . Одна из основных причин искажений сигнала на линиях прямой видимости в диапазонах УВЧ и СВЧ – это зависимость амплитуды сигнала и групповой задержки многолучевого распространения в условиях ясного неба от частоты. В аналоговых системах увеличение запаса на замирание будет улучшать характеристики системы, поскольку при этом уменьшается влияние теплового шума. Однако в цифровых системах использование большего запаса на замирание не поможет, если замирание является частотно-избирательным и вызывает ухудшение рабочих характеристик.

Вначале вычисляется средняя временная задержка:

$$\tau_m = 0.7 \cdot \left[ \frac{d \cdot 10^{-3}}{50} \right]^{1.3}, \quad [\text{нс}]$$

где  $d$  [м] – расстояние между передатчиком и приемником  
(длина пролета/трассы радиорелейной линии).

Рассчитывается параметр многолучевой активности  $\eta$ :

$$\eta = 1 - \exp\left[-0.2 \cdot P_0^{0.75}\right],$$

$$P_0 = \frac{K}{100} \cdot \left(d \cdot 10^{-3}\right)^{3.2} \cdot (1 + \theta \cdot 1000)^{-0.97} \cdot 10^{0.032 \cdot f \cdot 10^{-9} - 0.00085 \cdot h_1},$$

если геоклиматический коэффициент определен на основе цифровой карты (через параметр  $S_a$  – неровность рельефа в месте расположения ЦРРЛ ПВ), то

$$P_0 = \frac{K}{100} \cdot \left(d \cdot 10^{-3}\right)^{3.0} \cdot (1 + \theta \cdot 1000)^{-1.2} \cdot 10^{0.033 \cdot f \cdot 10^{-9} - 0.001 \cdot h_1},$$

если геоклиматический коэффициент определен без цифровой карты (не использовался параметр  $S_a$  – неровность рельефа в месте расположения ЦРРЛ ПВ),

где  $P_0$  – показатель частоты возникновения многолучевости  
(вероятность превышения глубины замираний 0 дБ  
вследствие многолучевости);  
 $K$  – геоклиматический коэффициент;  
 $d$  [м] – расстояние между передатчиком и приемником  
(длина пролета ЦРРЛ ПВ);  
 $f$  [Гц] – рабочая частота ЦРРЛ ПВ (частота передаваемого  
сигнала);

$\theta$  [рад] – угол возвышения/наклона трассы ЦРРЛ ПВ (угол между горизонталью и направлением максимума диаграммы направленности антенны);

$h_l$  [м] – высота подвеса более низкой антенны (передатчика или приемника).

Рассчитывается вероятность селективных сбоев  $P_S$ :

$$P_S = 2.15 \cdot \eta \cdot \left[ W_M \cdot 10^{-\frac{B_M}{20}} \cdot \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,M}|} + W_{NM} \cdot 10^{-\frac{B_{NM}}{20}} \cdot \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,NM}|} \right],$$

где  $W_M$  и  $W_{NM}$  [ГГц] – ширина сигнатуры ЦРРЛ ПВ, определенная соответственно при замирании с минимальной и неминимальной фазой;

$B_M$  и  $B_{NM}$  [дБ] – глубина сигнатуры ЦРРЛ ПВ, определенная соответственно при замирании с минимальной и неминимальной фазой;

$\tau_{r,M}$  и  $\tau_{r,NM}$  [нс] – эталонное значение задержки, используемое при нахождении сигнатуры ЦРРЛ ПВ соответственно при замирании с минимальной и неминимальной фазой.

Если известен только нормированный параметр системы,  $K_n$ , вероятность селективных сбоев может быть вычислена как:

$$P_S = 2.15 \cdot \eta \cdot (K_{n,M} + K_{n,NM}) \cdot \frac{\tau_m^2}{T^2},$$

где  $K_{n,x}$  – нормированный параметр системы, причем индекс «x» означает замирание либо с минимальной («М»), либо с неминимальной («NM») фазой;

$T$  [нс] – период бода системы.

Расчет показателя качества по ошибкам  $P_t$  (вероятности сбоев в условиях ясного неба):

$$P_t = P_{ns} + P_s.$$

*Результат расчета:* показатель качества по ошибкам  $P_t$  (вероятность сбоев в условиях ясного неба), обусловленный многолучевостью и связанными с ней механизмами.

### **5.3 Прогнозирование времени неготовности цифровой радиорелейной линии прямой видимости**

Состояние неготовности обычно вызывается в ЦРРЛ ПВ, работающих в диапазонах частот выше примерно 10 ГГц, вследствие ослабления и искажения сигнала в осадках (гидрометеорах). Результатом прогнозирования является процент времени неготовности  $prc_{unav}$  [%] анализируемой ЦРРЛ ПВ. Данная процедура прогнозирования может использоваться для любых точек земного шара на частотах до 40 ГГц и для трасс ЦРРЛ ПВ протяженностью до 60 км.

*Исходные данные для расчета:*

$d$  [м] – расстояние между передатчиком и приемником (длина пролета ЦРРЛ ПВ);

$A_m$  [дБ] – энергетический запас на замирания для заданного значения коэффициента ошибочных бит  $BER_o$ .

$R_{0.01}$  [мм/ч] – превышаемое в течение 0.01 % времени значение интенсивности дождя на пролете ЦРРЛ ПВ. Для территории Республики Беларусь  $R_{0.01} = 55$  мм/ч.

Поляризация излучаемого радиосигнала Н – горизонтальная, V – вертикальная, С – круговая.

Вычисляется погонное ослабление в дожде (методика справедлива для частот 1 – 1000 ГГц):

$$\gamma_R = k \cdot R_{0.01}^\alpha \cdot 10^{-3}, \text{ [дБ/м]}$$

где  $k$  и  $\alpha$  – зависящие от частоты и поляризации излучаемого радиосигнала и геометрии трассы РРЛ коэффициенты.

Коэффициенты  $k$  и  $\alpha$  рассчитываются в следующей последовательности. Определяются коэффициенты для горизонтальной и вертикальной поляризации:

$$\lg k = \sum_j^4 a_j \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\lg(f \cdot 10^{-9} - b_j)}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \cdot \lg(f \cdot 10^{-9}) + c_k,$$

$$\alpha = \sum_j^5 a_j \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\lg(f \cdot 10^{-9} - b_j)}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \cdot \lg(f \cdot 10^{-9}) + c_\alpha,$$

где  $f$  [Гц] – частота излучаемого радиосигнала (рабочая частота ЦРРЛ ПВ);  
 $a, b, c, m$  – коэффициенты, приведенные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Коэффициенты для вычисления погонного ослабления в дожде

Коэффициенты для $k_H$ (горизонтальная поляризация)					
j	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_k$	$c_k$
1	-5,33980	-0,10008	1,13098	-0,18961	0,71147
2	-0,35351	1,26970	0,45400		
3	-0,23789	0,86036	0,15354		
4	-0,94158	0,64552	0,16817		
Коэффициенты для $k_V$ (вертикальная поляризация)					
j	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_k$	$c_k$
1	-3,80595	0,56934	0,81061	-0,16398	0,63297
2	-3,44965	-0,22911	0,51059		
3	-0,39902	0,73042	0,11899		
4	0,50167	1,07319	0,27195		
Коэффициенты для $\alpha_H$ (горизонтальная поляризация)					
j	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_\alpha$	$c_\alpha$
1	-0,14318	1,82442	-0,55187	0,67849	-1,95537
2	0,29591	0,77564	0,19822		
3	0,32177	0,63773	0,13164		
4	-5,37610	-0,96230	1,47828		
5	16,1721	-3,29980	3,43990		
Коэффициенты для $\alpha_V$ (вертикальная поляризация)					
j	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_\alpha$	$c_\alpha$
1	-0,07771	2,33840	-0,76284	-0,053739	0,83433
2	0,56727	0,95545	0,54039		
3	-0,20238	1,14520	0,26809		
4	-48,2991	0,791669	0,116226		
5	48,5833	0,791459	0,116479		

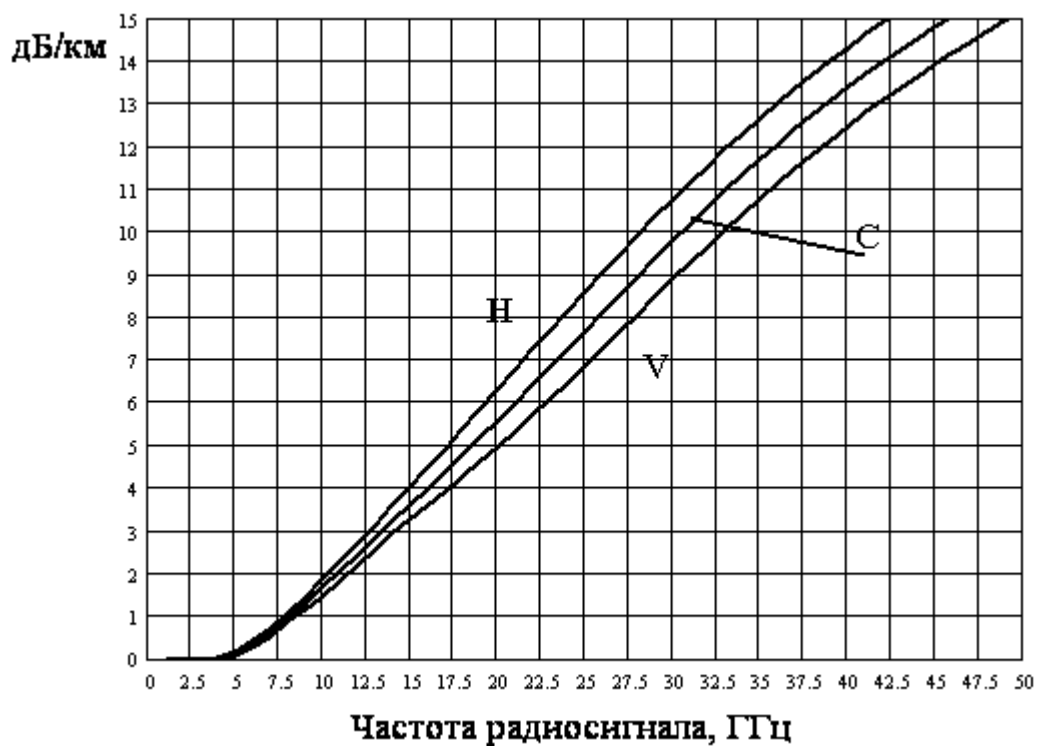
Для линейной и круговой поляризации и для любой геометрии трассы ЦРРЛ ПВ коэффициенты  $k$  и  $\alpha$  рассчитываются следующим образом:

$$k = \frac{1}{2} \cdot \left[ k_H + k_V + (k_H - k_V) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos(2 \cdot \tau) \right],$$

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot k} \cdot \left[ k_H \cdot \alpha_H + k_V \cdot \alpha_V + (k_H \cdot \alpha_H - k_V \cdot \alpha_V) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos(2 \cdot \tau) \right],$$

где  $\theta$  – угол возвышения трассы ЦРРЛ ПВ (угол между горизонталью и направлением максимума диаграммы направленности антенны);  
 $\tau$  – угол наклона оси поляризации излучаемого радиосигнала по отношению к горизонтали (для горизонтальной H поляризации  $\tau = 0^\circ$ , для вертикальной V поляризации  $\tau = 90^\circ$ , для круговой C поляризации  $\tau = 45^\circ$ ).

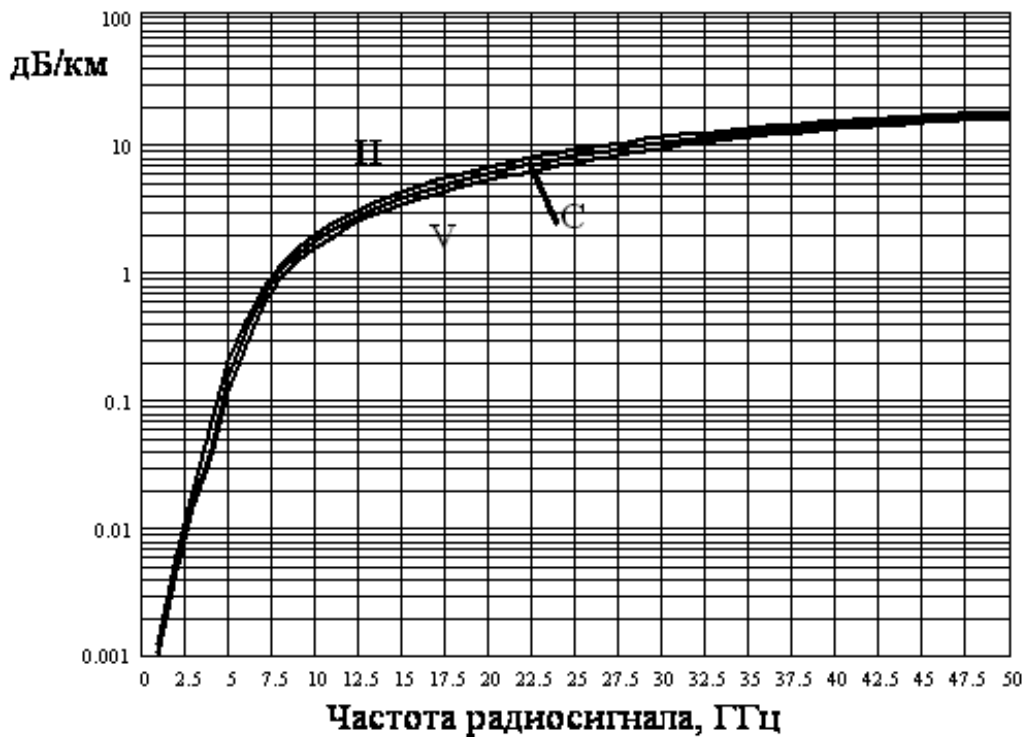
На рисунках 5.1 – 5.2 представлена зависимость погонного ослабления в дожде от частоты для горизонтальной, вертикальной и круговой поляризации и для  $R_{0,01} = 55$  мм/ч (типичное значение для территории Республики Беларусь). Угол возвышения трассы принят равным нулю, поскольку для реальных трасс ЦРРЛ ПВ он не превышает единиц миллирадиан (или десятых долей градуса) и практически не оказывает влияния на конечный результат.



V – вертикальная поляризация,  
H – горизонтальная поляризация,  
C – круговая поляризация.

Рисунок 5.1 – Зависимость погонного ослабления в дожде от частоты радиосигнала





- V – вертикальная поляризация,
- H – горизонтальная поляризация,
- C – круговая поляризация.

Рисунок 5.2 – Зависимость погонного ослабления в дожде от частоты радиосигнала

Далее вычисляется эффективная длина трассы радиолинии  $d_{\text{eff}}$  [м]:

$$d_{\text{eff}} = \frac{d}{1 + \frac{d}{35000 \cdot \exp(-0.015 \cdot R_{0.01})}}, \quad [\text{м}]$$

где для  $R_{0.01} \leq 100$  мм/ч подставляется истинное значение  $R_{0.01}$ , для  $R_{0.01} \geq 100$  мм/ч подставляется значение  $R_{0.01} = 100$  мм/ч.

Потери передачи  $A_{g0.01}$ , вызванные гидрометеорами, превышаемые в течение 0,01 % времени:

$$A_{g0.01} = \gamma R \cdot d_{\text{eff}} \quad [\text{дБ}]$$

Для трасс, расположенных на и выше  $30^\circ$  северной или южной широты (что соответствует территории Республики Беларусь), потери передачи  $A_{g\text{prc}}$ , превышаемые в течение других процентов времени  $\text{prc}$  в диапазоне от 0,001 % до 1 % можно рассчитать по формуле

$$A_{g\text{prc}} = A_{g0.01} \cdot 0.12 \cdot \text{prc}^{-0.546 + 0.043 \cdot \lg(\text{prc})} \quad [\text{дБ}]$$

Для заданного энергетического запаса на замирания  $A_m$  процент времени  $\text{prc}_{\text{rain}}$ , в течение которого они превышаются вследствие потерь в гидрометеорах (т. е. процент времени неготовности ЦРРЛ ПВ), можно определить из последних выражений с учетом месторасположения трассы ЦРРЛ ПВ. С учетом диапазона справедливости этих выражений для различных значений  $\text{prc}$ :

1) если  $A_m \leq A_{g1} = A_{g0.01} \cdot 0,12$ , то

$$\text{prc}_{\text{rain}} \geq 1\%.$$

2) если  $A_m \geq A_{g0.001} = A_{g0.01} \cdot 2,14$ , то

$$\text{prc}_{\text{rain}} \leq 0.001\%.$$

3) если  $A_{g1} = A_{g0.01} \cdot 0,12 < A_m < A_{g0.001} = A_{g0.01} \cdot 2,14$ , то

$$\text{prc}_{\text{rain}} = 10^z,$$

где

$$z = \frac{-0.546 + \sqrt{0.546^2 - 4 \cdot 0.043 \cdot \lg \left[ \frac{A_m}{A_{g0.01} \cdot 0.12} \right]}}{2 \cdot 0.043}.$$

*Результат расчета:* процент времени  $psc_{rain}$  неготовности ЦРРЛ ПВ, вызванной потерями в гидрометеорах.