

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Ф. Н. Захаров

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УКВ РАДИОВОЛН
В ТРОПОСФЕРЕ**

Методические указания для проведения практических занятий и
лабораторных работ
для студентов технических направлений

Томск
2023

УДК 537.876.23

ББК 22.336

3–38

Рецензент:

Красненко Н.П., профессор кафедры радиотехнических систем,
д-р физ.-мат. наук, профессор

Захаров, Фёдор Николаевич

3–38 Исследование распространения УКВ радиоволн в тропосфере :
методические указания для проведения практических занятий и лабораторных
работ для студентов технических направлений / Захаров Ф. Н. – Томск: Томск.
гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023 – 31 с

Методические указания составлены с учетом требований федерального
государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО).

Методические указания позволяют студентам путём расчета и моделирования
распространения радиоволн в тропосфере Земли качественно оценить влияние
тропосферной рефракции и тропосферных волноводов на множитель ослабления
радиосигнала. Пособие предназначено для студентов технических направлений,
изучающих дисциплины, связанные с распространением радиоволн.

Одобрено на заседании кафедры РТС, протокол № 5 от 01.12.2022

УДК 537.876.23

ББК 22.336

© Захаров Ф. Н., 2023

© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 ВВЕДЕНИЕ	4
2 Теоретическая часть	5
2.1 Распространение радиоволн в свободном пространстве	5
2.2 Влияние Земли на распространение радиоволн	6
2.2 Влияние атмосферы на распространение радиоволн	8
2.3 Рефракция радиоволн в тропосфере	9
2.4 Влияние тропосферных волноводов на распространение радиоволн .	14
3 Описание программы расчёта ЭМП	20
4 Задания.....	26
4.1 Изучение влияние рефракции на уровень ЭМП	26
4.2 Изучение влияния тропосферных волноводов на ЭМП	27
5 Содержание отчёта	29
6 Контрольные вопросы.....	30
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	31

1 ВВЕДЕНИЕ

Методические указания позволяют студентам путём моделирования распространения радиоволн (РРВ) в тропосфере Земли качественно оценить влияние тропосферной рефракции и тропосферных волноводов на множитель ослабления радиосигнала над морской поверхностью. Пособие предназначено для студентов радиотехнических специальностей, изучающих дисциплину «Распространение радиоволн» и смежные дисциплины.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Распространение радиоволн в свободном пространстве

Основной задачей дисциплины «Распространение радиоволн» является определение мощности сигнала и напряженности электрического поля в точке приема при заданных мощности передатчика, частоте излучаемого радиосигнала и параметрах трассы (расстоянии, высотах антенн и т.п.). Решение этой задачи обычно представляют в виде формулы для свободного пространства и множителя ослабления, учитывающего влияние реальных факторов.

Рассмотрим простейший случай распространения радиоволн в свободном пространстве без поглощения. Допустим, что источником радиоволн является **изотропный излучатель**, т.е. воображаемый точечный излучатель, равномерно излучающий радиоволны во всех направлениях.

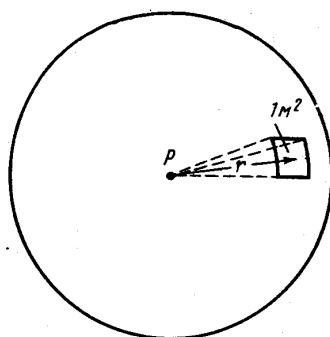


Рисунок 2.1 – К

определению мощности принимаемого сигнала, создаваемого изотропным излучателем [1]

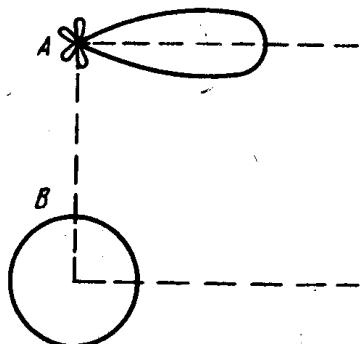


Рисунок 2.2 – Диаграммы направленности направленной (A) и изотропной (B) антенн [1]

Обозначая через P излучаемую источником мощность, определим **плотность потока энергии** (вектор Пойнтинга) на расстоянии r от источника радиоволн (рисунок 2.1), основываясь на том, что излучаемая энергия равномерно распределяется по поверхности сферы радиуса r . Выражая мощность излучателя в ватах, а линейные размеры в метрах, получим для численного значения вектора Пойнтинга выражение

$$\Pi = \frac{P}{2\pi r^2} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right], \quad (2.1)$$

где $2\pi r^2$ – площадь поверхности сферы, проходящей через точку наблюдения и с центром в точке расположения антенны. Плотность потока мощности показывает, какая мощность приходится на единицу площади фронта радиоволны.

Реальная антenna излучает ту же мощность по разным направлениям неравномерно (см. рисунок 2.2). За счет этого в направлении максимального излучения вектор Пойнтинга увеличится в G раз:

$$\Pi = \frac{PG}{2\pi r^2}. \quad (2.2)$$

Параметр G называется **коэффициентом направленного действия антены** (КНД) и является одним из ее основных параметров.

Для изотропной (ненаправленной) антенны коэффициент направленного действия G равен единице.

Мощность принимаемого сигнала на выходе приёмной антенны будет зависеть от площади приёмной антенны и определяется выражением:

$$P_{\text{пр.своб.пр-во}} = \Pi S_A = \frac{PGS_A}{2\pi r^2}, \quad (2.3)$$

где $S_A = \frac{G_{\text{пр}}\lambda^2}{4\pi}$ – эффективная площадь приёмной антенны, м^2 ;

$G_{\text{пр}}$ – коэффициент направленного действия приёмной антенны;

λ – длина волны радиосигнала, м.

Из формулы (2.3) видно, что принимаемая мощность обратно пропорциональна квадрату расстояния между источником и приёмником.

Как было сказано ранее, при расчёте уровня принимаемого сигнала учитывается **множитель ослабления** V , который показывает, на сколько уровень сигнала на реальной трассе отличается от уровня сигнала в свободном пространстве. В этом случае, выражение для мощности принимаемого сигнала можно записать в виде:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пр.своб.пр-во}} \cdot V^2. \quad (2.4)$$

Множитель ослабления учитывает влияние среды распространения радиоволн: подстилающей поверхности и атмосферы.

2.2 Влияние Земли на распространение радиоволн

При распространении радиоволн между корреспондирующими пунктами или между РЛС и целью может иметь место отражение радиоволн от поверхности Земли. В этом случае поле в какой-либо точке над поверхностью Земли будет представлять собой сумму полей двух волн – прямой и отражённой (рисунок 2.3), имеющих разный сдвиг фаз в разных точках пространства. Вследствие этого дальность действия радиотехнических систем в одних направлениях значительно уменьшается, а в других увеличивается по сравнению с дальностью действия в свободном пространстве, т.е. электромагнитное поле приобретает «лепестковый» характер (рисунок 2.4).

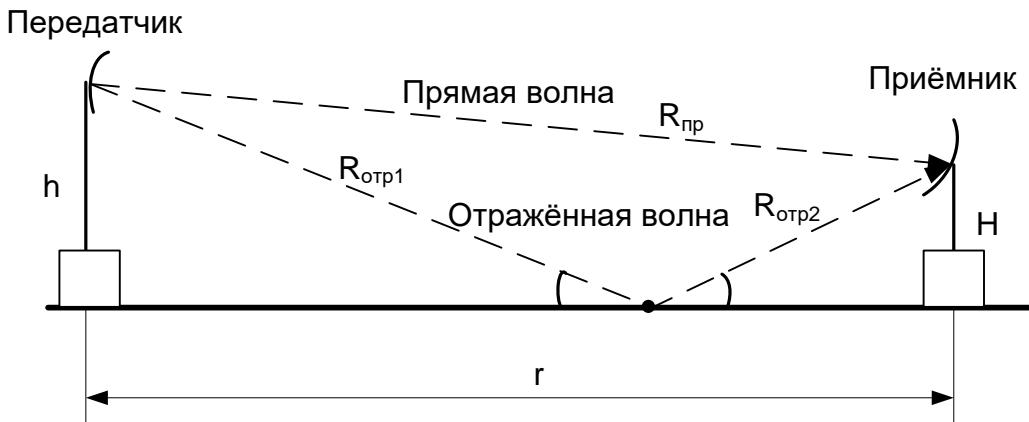


Рисунок 2.3 – Влияние Земли на распространение радиоволн

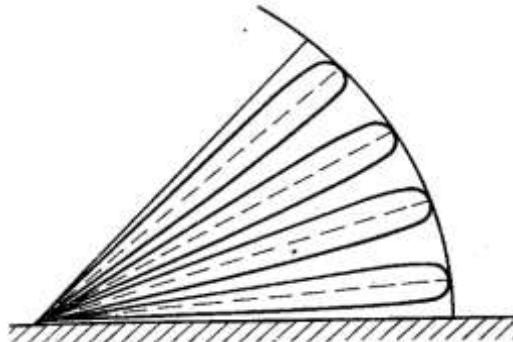


Рисунок 2.4 – Лепестковая структура поля [1]

Отражение от Земли существенно сказывается на работе радиолокационных станций метрового диапазона, антенны которых обладают, как правило, широкой диаграммой направленности. В этом случае значительная часть электромагнитной энергии попадает на Землю и отражается от нее. Отражение от Земли также сказывается и на работе радиолокационных станций сантиметрового диапазона при обнаружении целей под небольшими углами места. Степень влияния отражения радиоволн от поверхности Земли на результирующее поле вместе приема определяется также электрическими параметрами земли.

На характер распространения радиоволн над поверхностью Земли большое влияние оказывает ее сферичность (рисунок 2.5). Вопрос о том, как велико поле в области тени, создаваемой выпуклостью земли, в какой степени радиоволны способны преодолеть эту выпуклость, или, иначе, в какой степени они способны дифрагировать, зависит от длины волны. Чем длиннее волна, тем больше напряженность дифракционного поля. Так, коротковолновые радиоприемники принимают сигналы вещательных радиостанций, расположенных относительно этих приемников глубоко в области тени. С другой стороны, радиолокационные станции, работающие на дециметровых и более коротких волнах, не могут обнаружить цель, если она находится вне области прямой видимости в области тени.

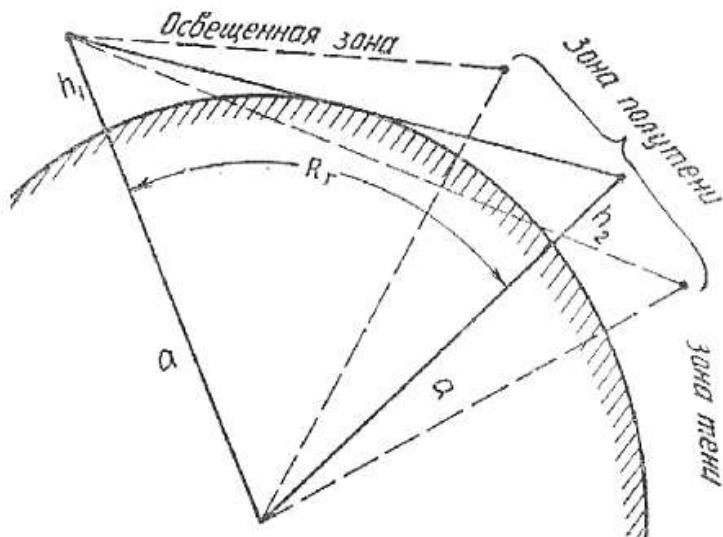


Рисунок 2.5 – Влияние сферичности Земли на распространение радиоволн над её поверхностью [2]

2.2 Влияние атмосферы на распространение радиоволн

На процесс распространения радиоволн в атмосфере Земли существенное влияние оказывают два слоя атмосферы – тропосфера и ионосфера. В данной лабораторной работе не рассматривается влияние ионосферы на распространение радиоволн.

Тропосферой называется нижний слой атмосферы, простирающийся над умеренными широтами до высот 10–12 км. Над полюсами граница тропосферы проходит на несколько километров ниже, а над экватором — на несколько километров выше.

Тропосфера в отличие от других слоев атмосферы – стратосферы и ионосферы – содержит большее количество паров воды. Тропосфера нагревается главным образом от поверхности земли и поэтому температура воздуха в ее пределах уменьшается с высотой. Выше 10–12 км после тонкого переходного слоя, называемого тропопаузой, в стратосфере температура с высотой возрастает, достигая максимума примерно на высоте 50 км, а затем до высот 70–80 км снова падает. Нагрев стратосферы проходит за счет сильного поглощения ультрафиолетового излучения солнца озоном (O_3). В стратосфере почти нет водяного пара. Тропосфера и стратосфера образуют неионизированный слой атмосферы. Благодаря этому обстоятельству закономерности распространения радиоволн в обоих слоях в ряде случаев одинаковы. Однако в тропосфере благодаря значительно большей плотности воздуха и близости слоя к поверхности земли аэрологические и метеорологические процессы проходят намного интенсивнее, чем в стратосфере. Это обстоятельство делает процесс распространения радиоволн в тропосфере значительно более сложным, чем в стратосфере. Ввиду этого изучение процесса распространения радиоволн в неионизированной части атмосферы можно ограничить рассмотрением вопроса распространения радиоволн в тропосфере.

Характер распространения радиоволн в тропосфере определяется состоянием атмосферы и процессами, которые в ней происходят. Состояние атмосферы определяется такими физическими характеристиками, как температура, влажность и давление. Последние являются и метеорологическими параметрами тропосферы, сокращенно называемыми метеоэлементами.

Атмосферные процессы, с одной стороны, обусловлены меняющимся режимом нагревания тропосферы землей, в результате чего в атмосфере имеют место перемещения воздуха в вертикальном направлении. С другой стороны, в силу различия температур в разных областях земного шара, происходят циркуляции воздушных масс и в горизонтальных направлениях. Все эти процессы сопровождаются конденсацией паров воды, появлением облаков, выпадением осадков и т. д. При этом наряду с упорядоченным слоистым движением воздуха имеет место и беспорядочное турбулентное движение воздуха большей или меньшей интенсивности.

Совокупное влияние на распространение радиоволн состояния атмосферы и атмосферных процессов является весьма сложным. Это влияние оказывается в одновременном проявлении эффектов, действие каждого из которых зависит от длины волны. К этим эффектам относятся следующие:

- 1) искривление направления распространения радиоволны;
- 2) рассеяние радиоволн неоднородностями тропосфера;
- 3) рассеяние радиоволн гидрометеорами;
- 4) поглощение радиоволн.

Исследование совместного действия этих эффектов и причин, их обуславливающих, весьма затруднительно. Поэтому при изучении явлений распространения радиоволн в тропосфере приходится каждый эффект рассматривать в отдельности и устанавливать главную причину, его вызывающую.

В данной лабораторной работе рассматривается только эффект искривления направления распространения волны – **рефракция**.

2.3 Рефракция радиоволн в тропосфере

Рефракция радиоволн зависит от коэффициента преломления n тропосферы, который мало отличается от единицы. Поэтому удобно ввести величину, называемую **индексом преломления** N , которая связана с n соотношением:

$$n = 1 + N \cdot 10^{-6}. \quad (2.5)$$

Индекс преломления выражается в N -единицах.

В тропосфере Земли индекс преломления N зависит от давления P , температуры T и влажности e следующим образом

$$N = \frac{77,6}{T} \left(P + \frac{4810e}{T} \right), \quad (2.6)$$

где давление и влажность выражены в милибарах, а температура в – градусах Кельвина. Необходимо обратить внимание, что до частоты примерно 30 ГГц индекс преломления не зависит от частоты радиоволн. В тропосфере давление и влажность в среднем убывают с высотой по экспоненциальному закону, а температура – примерно по линейному закону, поэтому высотный профиль индекса преломления можно в первом приближении аппроксимировать экспонентой:

$$N(h) = N_0 \cdot \exp[-b_1 h]. \quad (2.7)$$

Модель (2.7) имеет два параметра: N_0 и $b_1 = 0,1 \cdot \ln(N_0/N_{10})$, где N_0 , N_{10} – значения индекса преломления у поверхности Земли и на высоте 10 км соответственно. В средних широтах зимой N_0 в среднем равно 306 N-ед., летом эта величина близка к 330 N-ед. Значение индекса преломления на высоте 10 км считается постоянным и равным 92 N-ед. Параметр b_1 изменяется в пределах от 0,12 до 0,14 км^{-1} .

Для прогнозирования траектории распространения радиоволн часто используют значение градиента индекса преломления dN/dh . Радиоволны при

рефракции искривляются в сторону увеличения индекса преломления, т.е. по направлению положительного градиента. Радиус кривизны траектории радиоволны зависит от величины градиента:

$$R = \frac{1}{-\frac{dn}{dh}} = \frac{10^6}{-\frac{dN}{dh}}, \text{м.} \quad (2.8)$$

Это выражение показывает, что радиус кривизны луча в тропосфере определяется не абсолютным значением коэффициента преломления, а быстротой его изменения с высотой. Знак минус у производной означает, что радиус кривизны будет положительным, т.е. траектория будет обращена выпуклостью вверх, только в том случае, если коэффициент преломления уменьшается с высотой.

В 1933 году Скиллинг, Берроуз и Феррелл предложили упрощённый способ учёта влияния атмосферной рефракции, заключающийся в том, что радиоволна распространяется по прямолинейной траектории, однако не над поверхностью Земли радиуса a , а над воображаемой поверхностью с эквивалентным радиусом $a_{\text{экв}}$.

Значение эквивалентного радиуса определяется из условия сохранения постоянства относительной кривизны между лучом и поверхностью Земли в действительных условиях и эквивалентной схеме распространения (рис. 2.6). Относительной кривизной в аналитической геометрии называют разность $(1/a) - (1/R)$. Приравнивая значения относительной кривизны для случаев на рисунках 2.6а и 2.6б, находим

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{R} = \frac{1}{a_{\text{экв}}} - \frac{1}{\infty}, \quad (2.9)$$

откуда

$$a_{\text{экв}} = \frac{a}{1 - \frac{a}{R}} = \frac{a}{1 + a \frac{dN}{dh} 10^{-6}}, \text{м.} \quad (2.10)$$

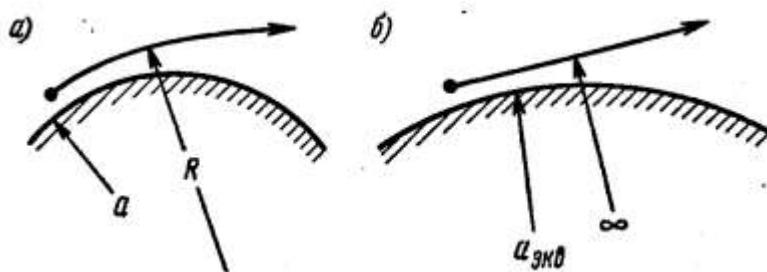


Рисунок 2.6 – Траектория радиоволны:
а) реальная,
б) прямолинейная при распространении волны над Землей
с эквивалентным радиусом.

Тропосферную рефракцию принято разделять на три группы: отрицательную, нулевую (отсутствие рефракции) и положительную рефракцию (см. рисунок 2.7).

Отрицательной принято называть те виды атмосферной рефракции, при которых индекс N не уменьшается, как обычно с высотой, а возрастает, т.е. когда $dN / dh > 0$. Из формулы (2.8) следует, что в этих условиях $R < 0$, т.е. траектория обращена выпуклостью вниз. Радиоволна удаляется от поверхности Земли, а дальность видимости и дальность распространения соответственно уменьшаются. Отрицательная рефракция представляет собой довольно редкое явление.

Отсутствие рефракции $dN / dh = 0$. В этом случае индекс преломления в некотором интервале высот сохраняет постоянное значение, а эквивалентный радиус Земли равен действительному.

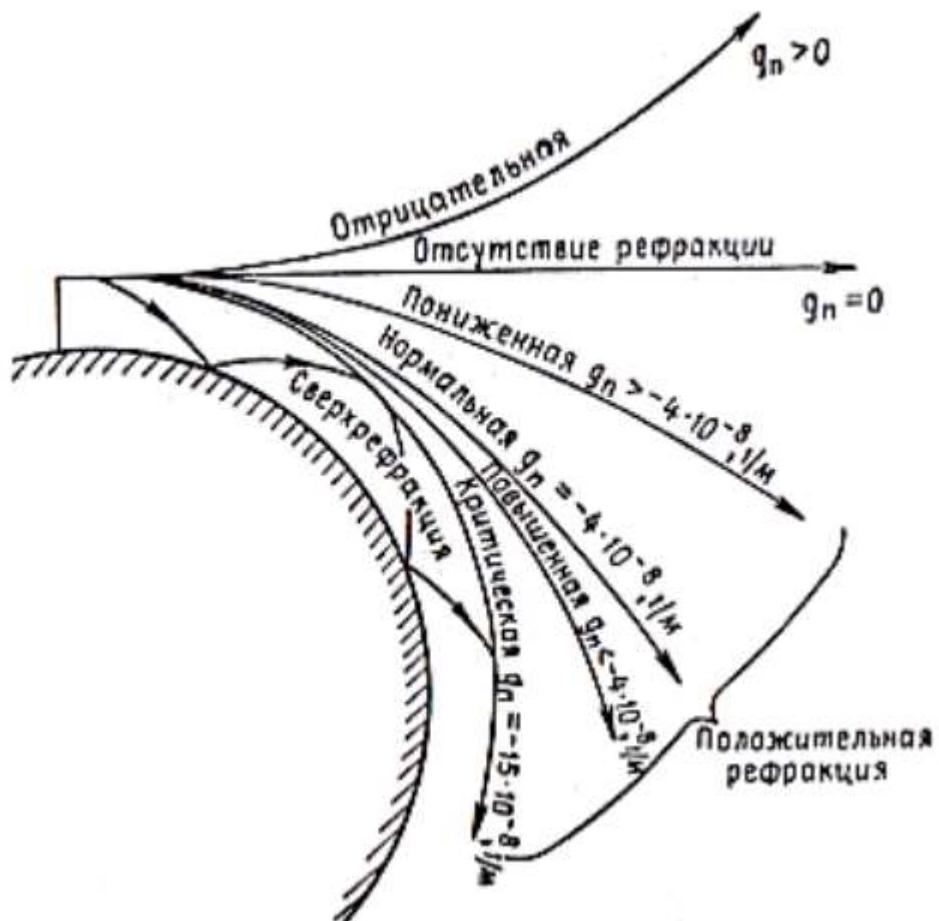


Рисунок 2.7 – Ход лучей при различных типах рефракции [2].

$$\text{На рисунке принято обозначение } g_n = \frac{dn}{dh} = 10^{-6} \frac{dN}{dh}$$

Положительная рефракция возникает при $dN / dh < 0$. В этих условиях траектории лучей обращены выпуклостью вверх. В условиях положительной рефракции различают три частных случая.

1. Пониженная рефракция. $0 > dN / dh > -40 \text{ N-ед./км}$.
2. Нормальная рефракция. $dN / dh = -40 \text{ N-ед./км}$. Нормальная рефракция наблюдается при «стандартной атмосфере». Это гипотетическая тропосфера, свойства которой отображают среднее состояние реальной тропосферы. Наиболее известной моделью стандартной атмосферы является

Международная стандартная атмосфера (International Standard Atmosphere, ISA), для которой атмосферное давление у поверхности Земли равно 1013 мбар, температура 15°C, относительная влажность 50%, скорость уменьшения температуры 6,5°C на 1 км.

3. Повышенная рефракция. Индекс преломления убывает с высотой быстрее, чем для нормальной рефракции: $-40 \text{ Н-ед./км} > dN / dh > -157 \text{ Н-ед./км}$.

4. Критическая рефракция. $dN / dh = -157 \text{ Н-ед./км}$. При значении градиента индекса преломления минус 157 Н-ед./км радиус кривизны траектории луча становится равным радиусу Земли, следовательно, эквивалентный радиус Земли становится равным бесконечности. Это означает, что луч распространяется параллельно поверхности Земли.

5. Сверхрефракция или «волноводное» распространение радиоволн. $dN / dh = -157 \text{ Н-ед./км}$. В условиях сверхрефракции энергия электромагнитных волн сосредотачивается в сферическом слое, концентричном земной поверхности. Волноводы могут быть как приземными, тогда нижней границей служит поверхность Земли, так и приподнятыми, при этом излучение распространяется внутри приподнятого слоя, отражаясь от его границ. Использование волноводов способствует существенному увеличению дальности действия радиотехнических систем.

В таблице 2.1 обобщена классификация видов атмосферной рефракции.

Для количественной и качественной оценки влияния тропосферной рефракции на распространение УКВ удобно ввести понятие о так называемом **«приведённом коэффициенте преломления»**

Введение приведённого коэффициента преломления позволяет свести исследование распространения радиоволн в неоднородной атмосфере над сферической Землёй к исследованию распространения радиоволн в некоторой модифицированной атмосфере над плоской Землёй. При этом предполагается, что кривизна траектории относительно поверхности Земли сохраняет своё значение:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{R} = \frac{1}{\infty} - \frac{1}{R'}, \quad (2.11)$$

где R' – радиус кривизны луча в модифицированной тропосфере над плоской Землёй.

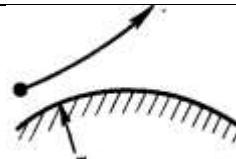
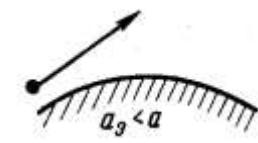
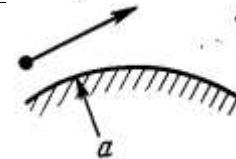
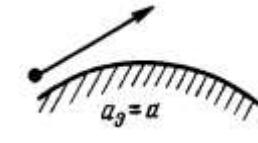
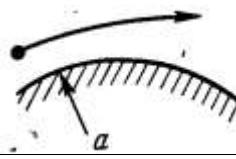
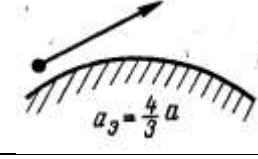
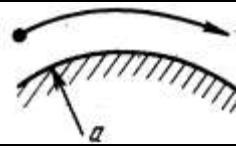
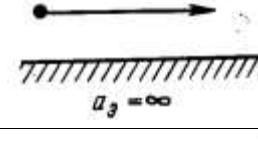
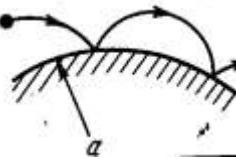
Выражая радиус кривизны через градиент коэффициента преломления и интегрируя выражение получаем:

$$n_{mod} = n + \frac{h}{a}. \quad (2.12)$$

Подробнее вывод выражения для n_{mod} см. в книгах [1–4].

Выражение (2.12) связывает коэффициент преломления модифицированной атмосферы с показателем преломления действительной атмосферы.

Таблица 2.1 – Классификация видов атмосферной рефракции [1]

Название атмосферной рефракции	$\frac{dN}{dh}, \frac{1}{\text{км}}$	$R, \text{ км}$	$a_{\text{экв}}, \text{ км}$	$k = \frac{a_{\text{экв}}}{a}$	Действительная траектория	Эквивалентная траектория
Отрицательная	>0	<0	<6370	<1		
Отсутствие рефракции	0	∞	6370	1		
Положительная:						
Пониженная	-40...0	$25000 \dots \infty$	$6370 \dots 8500$	$1 \dots 4/3$		
Нормальная	-40	25000	8500	$4/3$		
Повышенная	-157...-40	$6370 \dots 25000$	$8500 \dots \infty$	$4/3 \dots \infty$		
Критическая	-157	6370	∞	∞		
Сверхрефракция	<-157	<6370	<0	<0		

При практических расчётах удобнее иметь дело не с коэффициентом преломления, а с приведённым индексом преломления:

$$M = (n_{mod} - 1)10^6 = (n - 1)10^6 + \frac{h}{a}10^6 = N + 157h, \quad (2.13)$$

где h – высота точки над уровнем моря, в которой определяется значение модифицированного индекса преломления (выражена в км). Индекс M выражается в М-единицах (М-ед.).

Использование модифицированного профиля позволяет легко определить тропосферные волноводы: если высотный градиент М-профиля отрицательный, то в данном слое повышенной рефракции созданы условия для возникновения тропосферного радиоволновода.

2.4 Влияние тропосферных волноводов на распространение радиоволн

Отдельные случаи сверхдальнего распространения УКВ за счёт влияния тропосферы были известны ещё до 1940 года. Однако первые опыты, в которых дальнее распространение связывалось с возникновением в тропосфере волноводного канала, были проведены в 1943 году в Ирландском море. В 1944 году низкий тропосферный волновод был обнаружен в Карибском море, а в 1945 г. – в Атлантическом океане, а в последствии во многих других местах земного шара как на суше, так и над морской поверхностью.

Тропосферные волноводы возникают в тех случаях, когда индекс преломления уменьшается с высотой быстрее, чем на минус 157 Н-ед./км (при этом градиент модифицированного индекса преломления становится отрицательным $dM/dh < 0$ М-ед./км. (см. рис. 2.8)).

На рисунке 2.8 показан пример возникновения тропосферного волновода при наличии температурной инверсии и при быстром уменьшении с высотой влажности воздуха. На рисунке приведены как зависимость индекса преломления N , так и зависимость приведённого индекса преломления M от высоты.

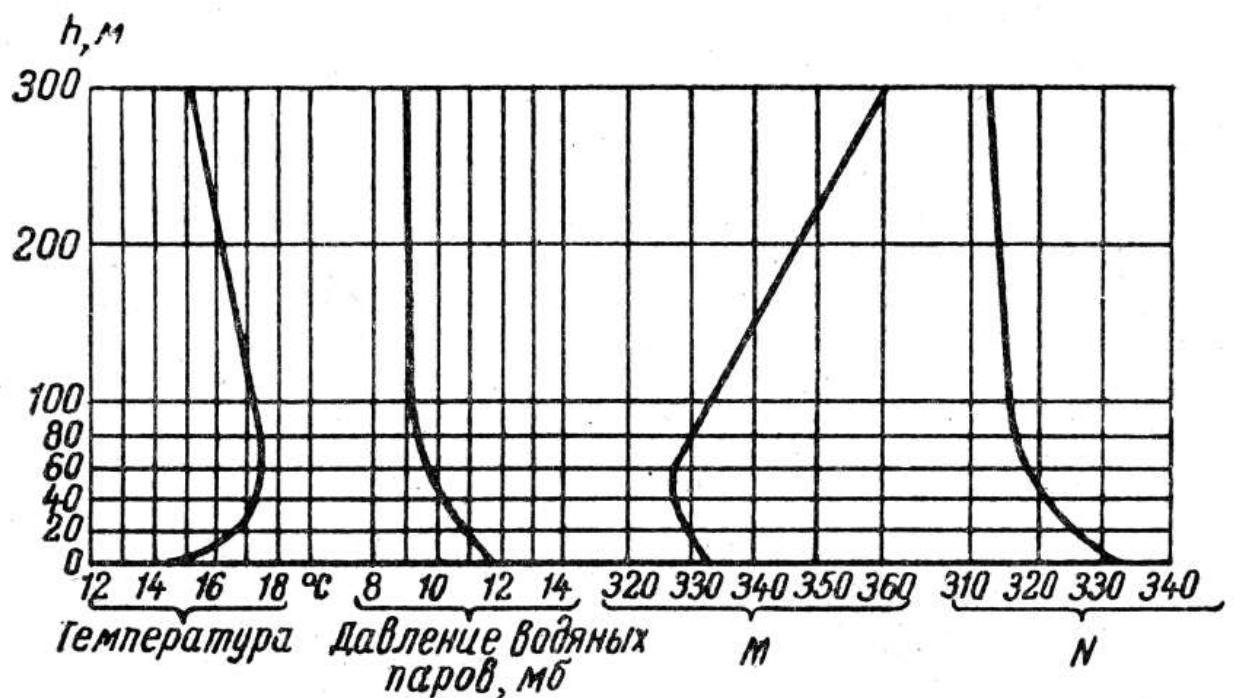


Рисунок 2.8 – Типичные распределения температуры и влажности по высоте тропосфера, приводящие к образованию тропосферного волновода [1]

Выделяют три типа тропосферных волноводов:

- 1) волновод испарения (рисунок 2.9а),
- 2) приповерхностный волновод (рисунок 2.9б),
- 3) приподнятый волновод (рисунок 2.9в).

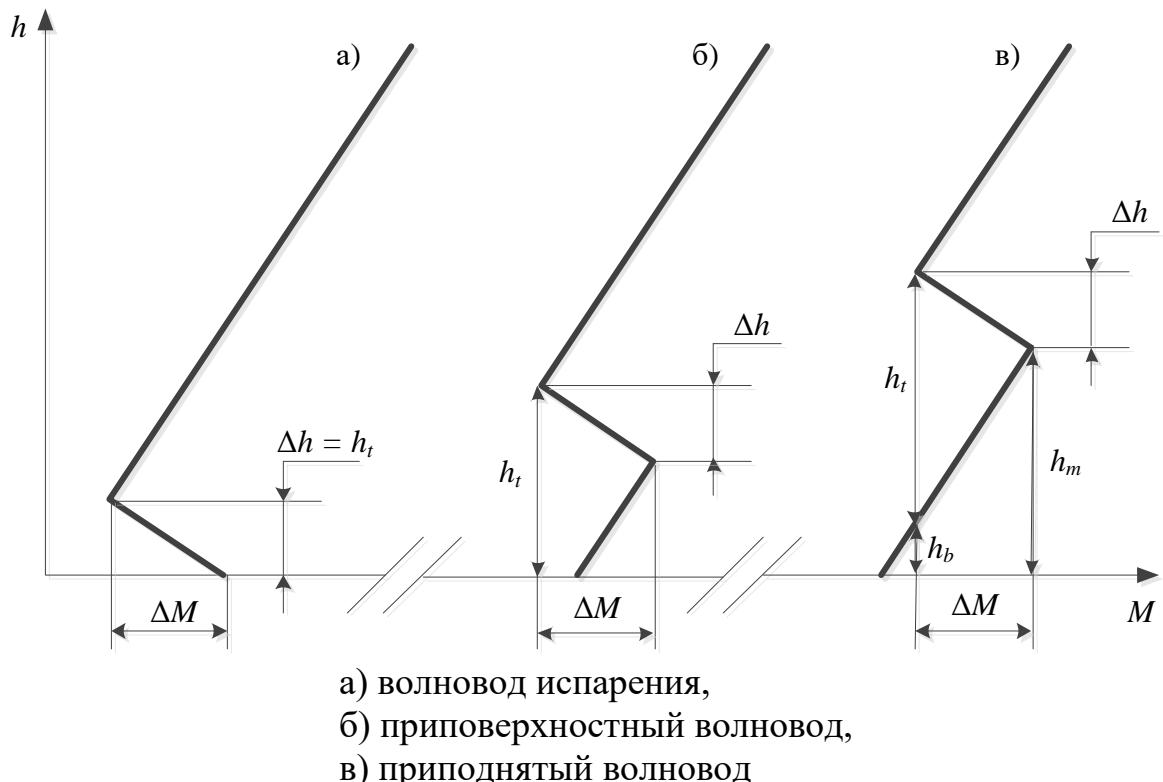


Рисунок 2.9 – Типы тропосферных волноводов

Необходимо отметить, что из-за трудности распознавания волноводов первого и второго типов, их часто объединяют в один тип – приповерхностные волноводы.

Волноводы характеризуются интенсивностью, ΔM (М-единиц) и толщиной, h_t (м). Для описания характеристик приподнятых волноводов используются два дополнительных параметра, а именно: высота нижней границы волновода, h_b (м), и высота в пределах волновода с максимальным значением M , h_m (м) [5]. Также, дополнительно волноводы можно описать параметром g_M , который характеризует вертикальный градиент приведённого индекса преломления:

$$g_M = \frac{\Delta M}{\Delta h}, \quad (2.14)$$

где Δh – толщина слоя повышенной рефракции.

Физика образования тропосферных волноводов с необходимой полнотой рассмотрена в [6]. Установлено, что наиболее вероятно появление волноводов над обширными водными поверхностями, где основным процессом, способствующим их образованию, является испарение. Строго говоря, названный механизм характерен для открытых районов Мирового океана. В прибрежных зонах волноводы могут образовываться за счет адвекции – горизонтального переноса теплых и сухих воздушных масс с суши на более холодную поверхность моря. Основным механизмом, способствующим образованию волноводов над сушей, является механизм, связанный с радиационным излучением земной поверхности (инверсия выхолаживания). Инверсии выхолаживания начинают развиваться приблизительно за час до захода солнца и к его восходу достигают максимальной высоты и градиента. С восходом солнца начинается их интенсивное разрушение, продолжающееся в течение примерно трех часов, в результате чего инверсии приподнимаются над поверхностью Земли. Появление тропосферных волноводов связано с синоптической обстановкой в рассматриваемом районе: их образованию способствуют антициклональные периоды, характеризующиеся ясной и сухой погодой.

Вероятность возникновения приводных тропосферных волноводов довольно велика – в среднем не менее 50 % по времени. По наблюдениям в Северной Атлантике на широте Бискайского залива волноводы имели место в 77% случаев, причем толщина приповерхностного волноводного слоя достигала 50 м. Подобные же значения вероятности появления приводных тропосферных волноводов характерны и для других регионов Мирового океана. Исключение составляют лишь северные районы земного шара, где волноводы возникают реже.

Существует широтная зависимость высоты приводного тропосферного волновода, а именно: в высоких и умеренных широтах волноводы имеют меньшую высоту, чем в субтропических и тропических. Наиболее вероятные значения высот соответственно 5...7 и 15...20 м, а наиболее вероятный

диапазон изменения интенсивности волновода 2...10 М-ед., причем прослеживается сезонный ход — зимой h_t и ΔM больше, чем летом.

Вероятность существования тропосферных волноводов над сушей значительно ниже, чем над морем, и составляет для приземного слоя величину около 25%, причем толщина приземного волноводного слоя не превышает 50 м.

Влияние приповерхностного волновода

Так как радиоволна искривляется в сторону большего значения индекса преломления, то она может быть «захвачена» волноводом и распространяться в его пределах, т.е. в слое тропосфера толщиной h_t . Атмосферный волновод подобно металлическому волноводу является фильтром пространственных частот и на его выходе формируется спектр нормальных мод, т. е. набор волн, ослабление которых с расстоянием минимально. Спектр этих мод — дискретный, и существует критическая длина волны, указывающая верхнюю границу длин волн, которые волновод в состоянии захватить и пропустить через себя.

Примерный ход лучевых линий в приповерхностном волноводе соответствует случаю сверхрефракции на рисунке 2.7 и табл. 1.

На рисунке 2.10 приведена двумерная диаграмма уровня ЭМП при наличии сильного приповерхностного волновода высотой 140 м.

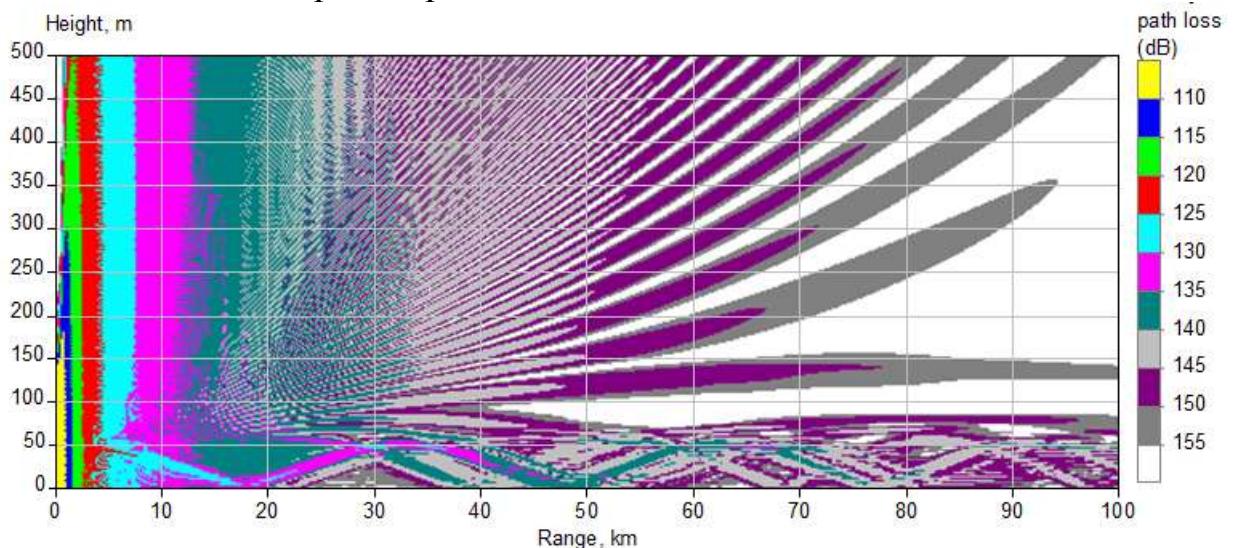


Рисунок 2.10 – Ослабление сигнала при наличии приповерхностного волновода

Критическая длина волны λ_k — максимальная длина радиоволны, захватываемая волноводом — в первом приближении определяется выражением:

$$\lambda_k \approx 2,5 \cdot 10^{-3} h_t \sqrt{|\Delta M|}, \quad (2.15)$$

где λ_k и h_t выражены в метрах, а ΔM — в М-ед.

Высоты приповерхностных волноводов обычно составляют несколько единиц или десятков метров и не превышают 200 метров, поэтому при реальной интенсивности М-профиля (от 3 до 30 М-ед.) критическая длина волны находится в пределах 1 см...1 м.

Влияние приподнятого волновода

Приподнятые волноводы способны обеспечить распространение радиоволн с частотами выше 100 МГц на расстояния, намного превосходящие пределы радиогоризонта, и являются весьма вероятной, но и наименее изученной, причиной аномально высоких уровней сигналов за горизонтом. Если источник сигнала находится ниже слоя повышенной рефракции, то радиоволна УКВ диапазона отражается от этого слоя (см. рисунок 2.11), создавая повышенный уровень сигнала далеко за радиогоризонтом.

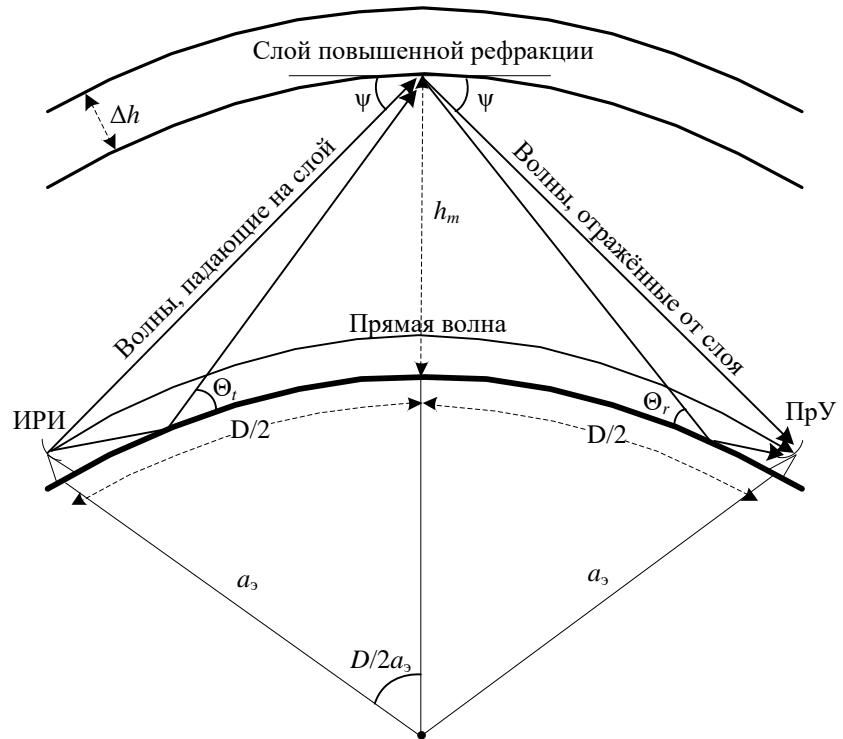


Рисунок 2.11 – Геометрия трассы РРВ при отражении сигнала от приподнятого волновода [7]

На рисунке 2.12 представлены экспериментальные данные, полученные сотрудниками НИИ РТС 4 сентября 1987 г. на Охотском море. На графике наблюдается сильный подъем уровня сигнала (на 30 дБ) на удалении 350 – 450 км от передатчика. Этот подъем вызван отражением от приподнятого тропосферного слоя повышенной рефракции, находящегося на расстоянии 170 – 220 км от передатчика. Интенсивность слоя повышенной рефракции минус 50 N-ед., высота максимума M-кривой 1800 м., толщина слоя 300 м. На рисунке также приведены результаты моделирования, которые достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными.

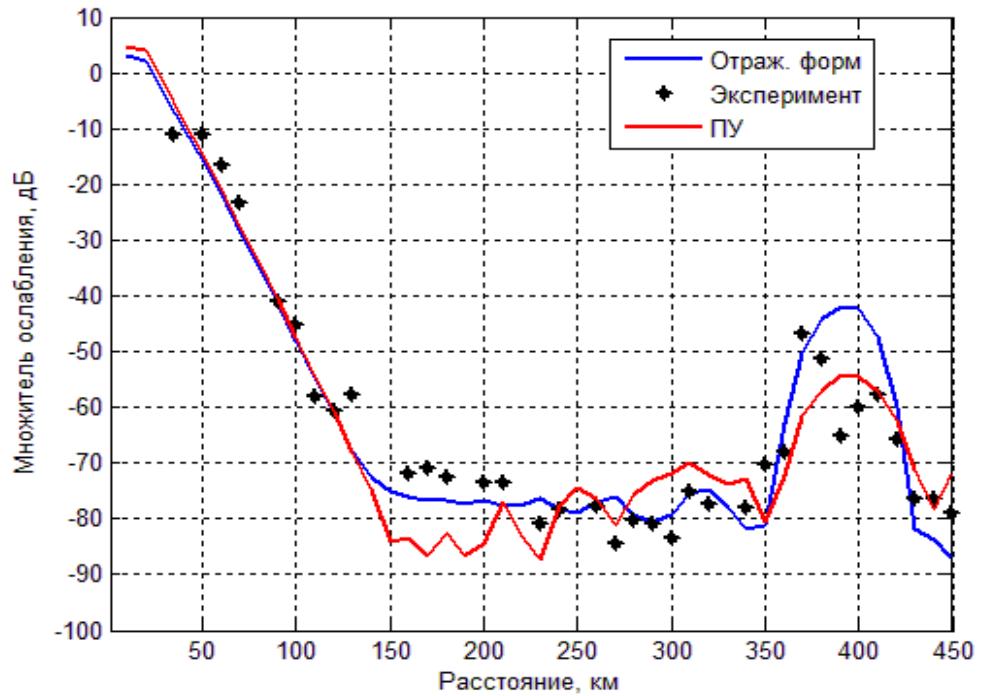


Рисунок 2.12 – Пример экспериментальных данных

Общая характеристика приподнятых волноводов дается в рекомендации [5].

В статье [7] приведена методика расчёта множителя ослабления при наличии в тропосфере приподнятого слоя повышенной рефракции и проведено сравнение с результатами, получаемыми при численном решении волнового параболического уравнения. Для численного решения применяется метод смешанного дискретного преобразования Фурье в комбинации с методом разделения переменных (см. раздел 3). Считается, что такой метод является эталонным и позволяет максимально точно смоделировать распространение радиоволн, соответствующее реальным условиям.

3 ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ РАСЧЁТА ЭМП

Используемая в лабораторной работе программа расчёта уровня ЭМП написана в программе MATLAB и основана на численном решении параболического уравнения [8–10].

Скалярное параболическое уравнение (ПУ), введенное М.А. Леоновичем, в декартовой системе координат имеет вид

$$2ik \frac{\partial U(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial^2 U(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U(x, y, z)}{\partial z^2} + k^2 [\varepsilon(x, y, z) - 1] U(x, y, z) = 0, \quad (3.1)$$

где $U(x, y, z) = E(x, y, z) \exp(-ikx)$ – комплексная огибающая монохроматического поля $E(x, y, z)$ частоты ω , распространяющегося преимущественно в направлении оси Ox (здесь опущен временной множитель $\exp(-i\omega t)$), $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, $\varepsilon(x, y, z)$ – относительная диэлектрическая проницаемость среды распространения.

ПУ является малоугловым (реально не более 10 градусов) приближением уравнения Гельмгольца, но описывает большинство эффектов, возникающих при РРВ в неоднородных средах [11].

В настоящее время разработан ряд приближенных методов аналитического решения ПУ [11], но их использование крайне затруднено вследствие ограниченности круга типовых задач. Поэтому основными методами решения ПУ стали численные методы, которые имеют менее строгие ограничения на условия распространения и параметры среды.

Первые численные сеточные методы основаны на формальной замене частных производных в уравнении (3.1) соответствующими конечными разностями ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$), и вершиной этого направления явилась схема Кранка–Николсон (КН). В частности, при решении ПУ на плоскости xOy для каждого значения k записывается уравнение, связывающее три известных значения поля на предыдущем шаге с тремя неизвестными значениями поля на следующем шаге

$$\begin{aligned} U_{j+1,k-1} - (2 + 1/g)U_{j+1,k} + U_{j+1,k+1} = \\ = g^*/g (U_{j,k-1} + U_{j,k+1}) - (2g^*/g + 1/g)U_{j,k}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где j – номер узла сетки вдоль оси Ox , k – номер узла сетки вдоль оси Oy , $g = i\Delta x / (4k\Delta y^2)$. Записав разностные уравнения (3.2) для всех k , получается система линейных уравнений, которая при заданных граничных условиях допускает весьма экономное решение методом прогонки [12].

Настоящий бум в применении численных методов решения ПУ для описания распространения волн в неоднородных средах начался после того, как R.H. Hardin и F.D. Tappert предложили метод преобразования Фурье с расщеплением [10]. Данный метод используется в программе расчета ЭМП и заключается в следующем.

Задав распределение поля в апертуре передающей антенны $U(0, y, z)$ и записав его отсчеты в узлах сетки $U_{l,n}^0 = U(0, l \cdot \Delta y, n \cdot \Delta z)$, в соответствии с ПУ

(3.1) можно определить значения отсчетов $U_{l,n}^1 = U(\Delta x, l \cdot \Delta y, n \cdot \Delta z)$ на расстоянии Δx от передающей антенны, затем, на расстоянии $2\Delta x$ и так далее, удаляясь от источника, можно вычислить ЭМП вдоль всей трассы РРВ в свободном пространстве. Неоднородности среды распространения учитываются путем умножения найденных значений поля на каждом шаге на фазовый множитель

$$U((m+1) \cdot \Delta x, l \cdot \Delta y, n \cdot \Delta z) = \\ = U_c((m+1) \cdot \Delta x, l \cdot \Delta y, n \cdot \Delta z) \cdot \exp\left\{10^{-6} \cdot ik\Delta x \cdot M((m+1) \cdot \Delta x, l \cdot \Delta y, n \cdot \Delta z)\right\}. \quad (3.3)$$

В итоге, метод расчета ЭМП на каждом шаге по дальности предполагает следующие операции:

- 1) прямое БПФ (F) значений поля $U(m \cdot \Delta x, l \cdot \Delta y, n \cdot \Delta z)$ на текущем шаге по дальности, т.е. переход к угловому спектру поля (распределение напряжённости по направлениям распространения);
- 2) умножение спектра на коэффициент передачи, соответствующий распространению радиоволн на одном шаге по дальности;
- 3) обратное БПФ F' – распределение поля по высоте на следующем шаге, прошедшего свободную атмосферу;
- 4) умножение результата на коэффициент, учитывающий преломляющие свойства среды распространения (формула (3.3)).

Перечисленные операции можно описать выражением

$$U((m+1) \cdot \Delta x, l \cdot \Delta y, n \cdot \Delta z) = \exp\left[ik\Delta x \cdot 10^{-6} M((m+1) \cdot \Delta x, l \cdot \Delta y, n \cdot \Delta z)\right] \times \\ \times F^{-1}\left\{\exp\left(-ik\beta^2 \frac{\Delta x}{2}\right) \cdot F\{U(m \cdot \Delta x, l \cdot \Delta y, n \cdot \Delta z)\}\right\}, \quad (3.4)$$

где β – аргумент углового спектра плоских волн.

В 90-годы наблюдалось интенсивное использование этих методов для расчета характеристик радиоволн при их распространении в неоднородной тропосфере. В настоящий момент считается, что метод численного решения ПУ является эталонным для оценки достоверности расчетов характеристик поля УКВ в неоднородной тропосфере над пересеченной местностью, выполненных другими приближенными методами.

Программа расчёта состоит из отдельных функций, объединённых в общую программу файлом **Main.m**.

Необходимо обратить внимание студентов на то, что все расчеты выполняются при условии распространении радиоволн над морской поверхностью.

После запуска в MATLAB файла **Main.m** откроется окно с графическим интерфейсом (см. рисунок 3.1), который состоит из трёх частей:

- 1) интерфейс ввода параметров передатчика (частота, тип поляризации сигнала, высота антенны, ширина и отклонение от горизонтального

направление ДНА), длины трассы PPВ и приземного значения индекса преломления;

- 2) интерфейс выбора типа рефракции и ввода значения высотного градиента индекса преломления;
- 3) интерфейс выбора типа тропосферного волновода и ввода его параметров.

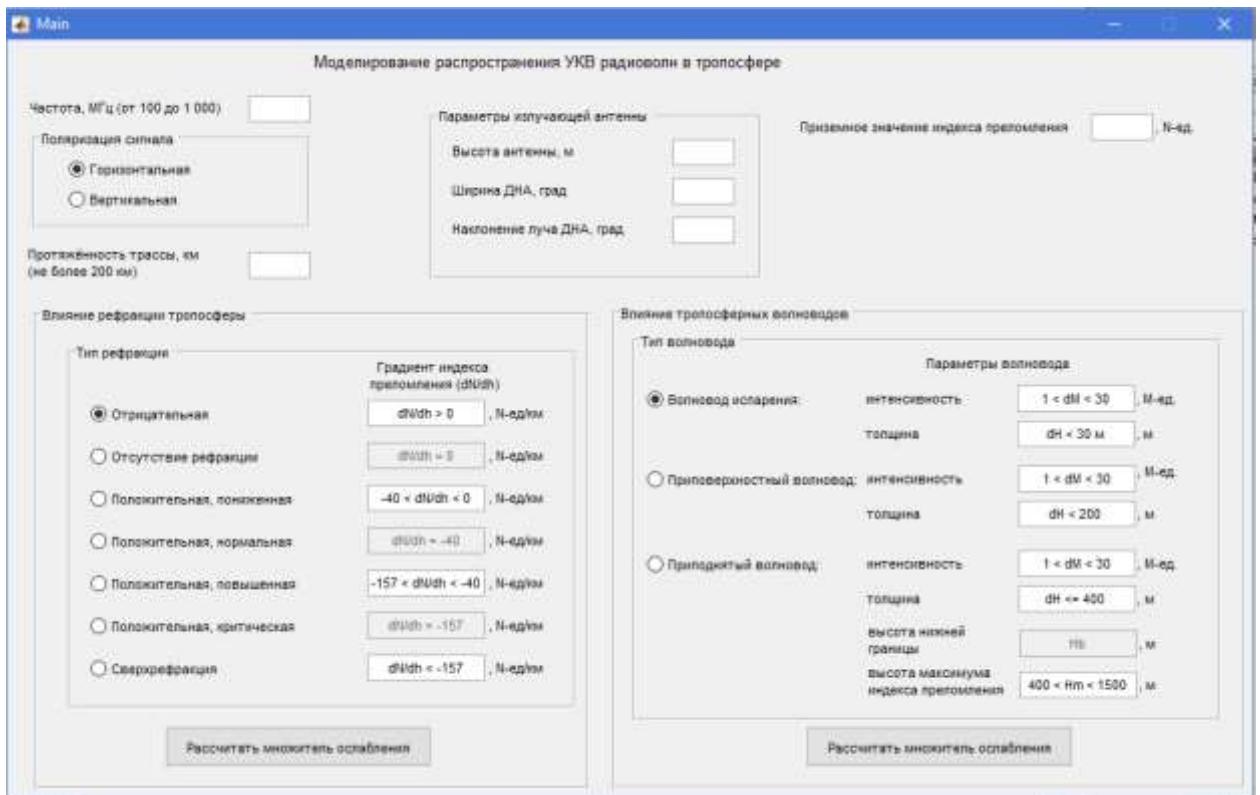


Рисунок 3.1 – Графический интерфейс программы моделирования PPВ

После запуска программы на вычисление (для этого необходимо нажать кнопку «Рассчитать множитель ослабления») произойдёт расчёт множителя ослабления электромагнитного поля над морской поверхностью и будут отображены графики:

- высотной зависимости индекса преломления и модифицированного индекса преломления (рисунок 3.2),
- дистанционной зависимости множителя ослабления на высоте антennы передатчика (рисунок 3.3),
- высотной зависимости множителя ослабления в конце трассы PPВ и двумерной диаграммы множителя ослабления в координатах « дальность – высота » (рисунок 3.4).

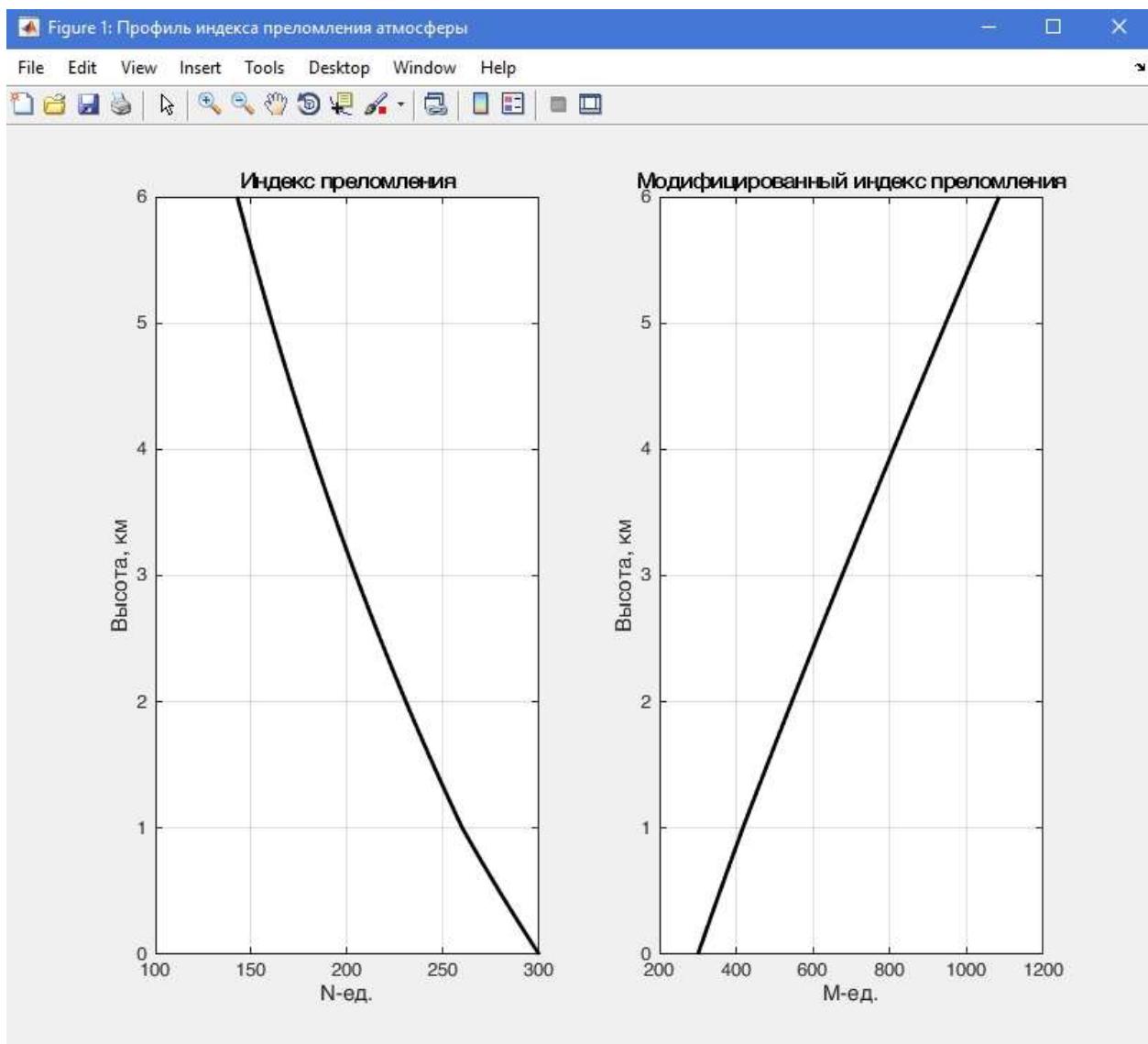


Рис. 3.2 – Высотные профили индекса преломления и модифицированного индекса преломления

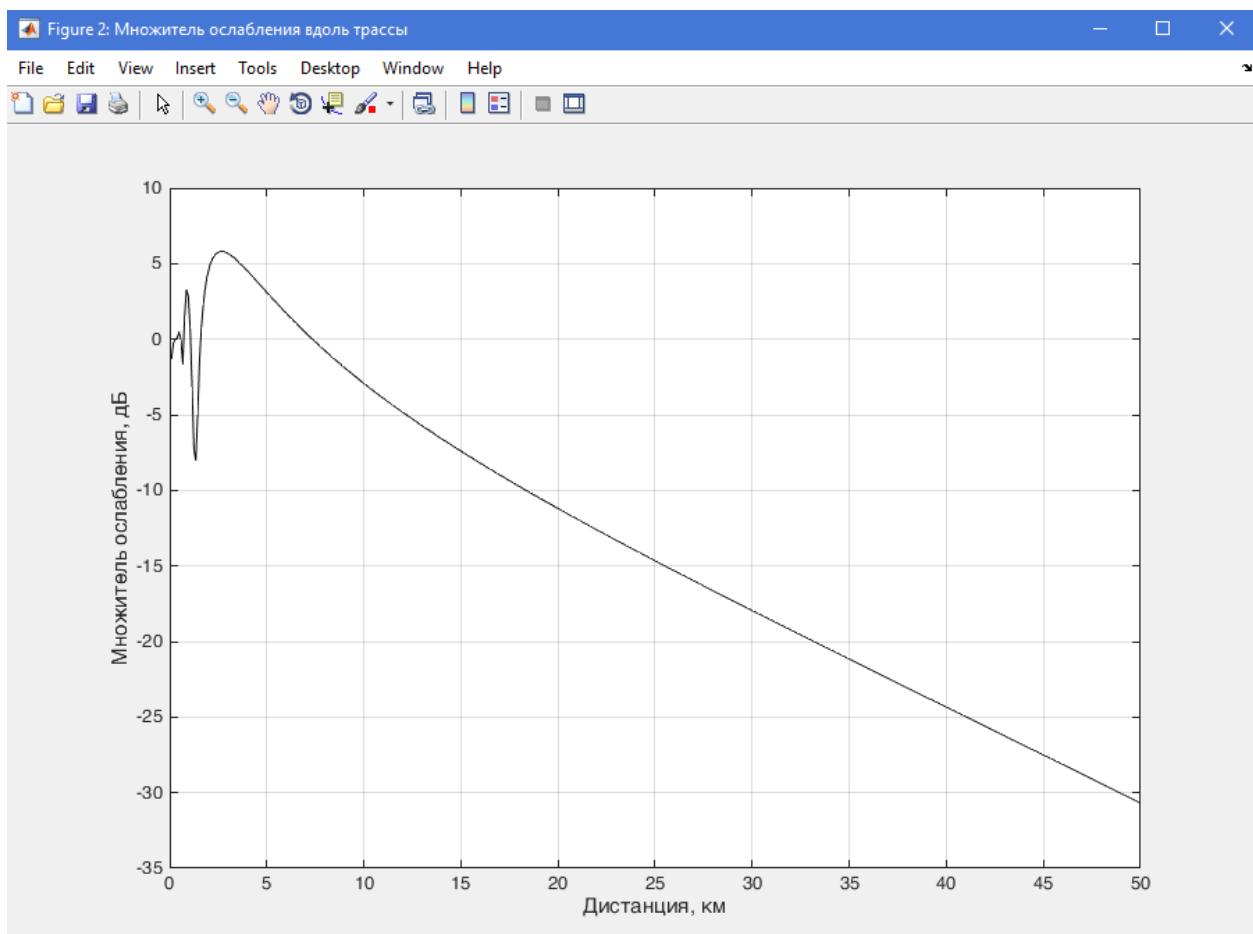


Рисунок 3.3 – Дистанционная зависимость множителя ослабления

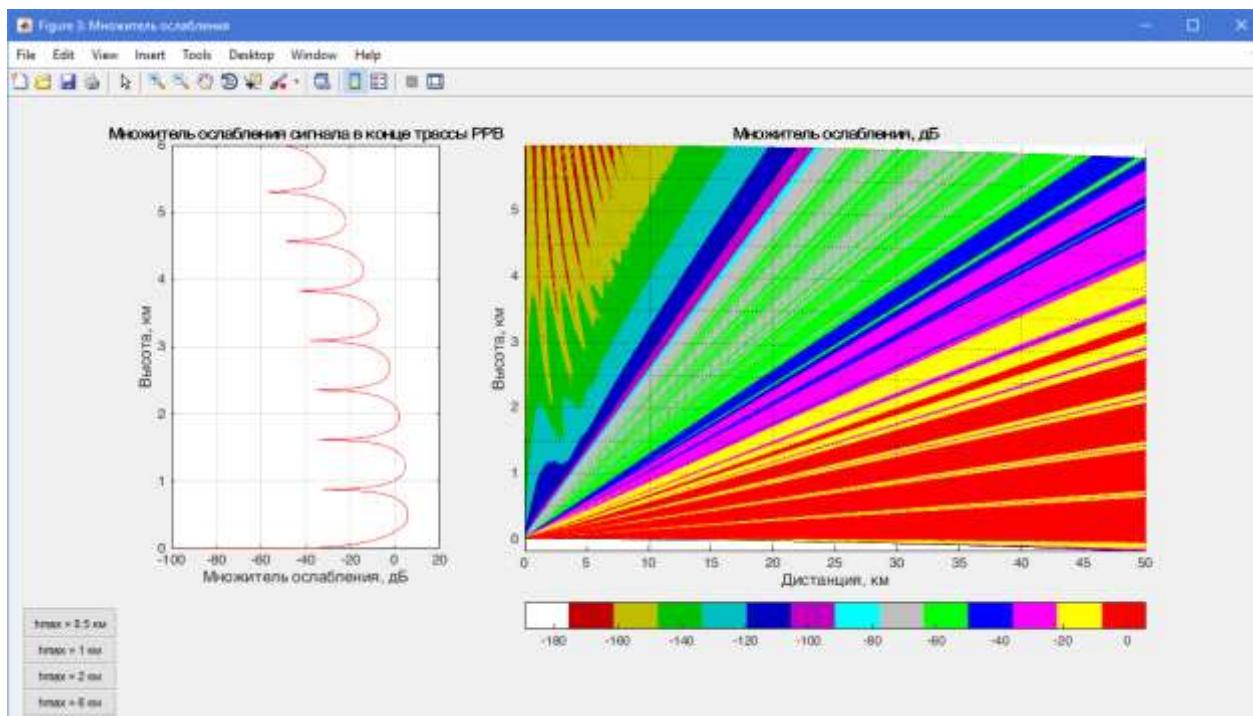


Рисунок 3.4 – Высотная зависимость множителя ослабления в конце трассы PPВ и двумерная диаграмма множителя ослабления в координатах «дальность–высота»

Используя инструменты MATLAB, студенты могут по полученным графикам определить значение множителя ослабления в нужной точке трассы РРВ и значение индекса преломления на нужной высоте.

Высотный профиль индекса преломления в разделе программы «Влияние рефракции тропосферы» состоит из двух частей. В нижней части до высоты 1 км зависимость линейная с заданным градиентом, а выше 1 км – экспоненциальная с постоянными параметрами:

$$N(h) = \begin{cases} N_S + \frac{dN}{dh} h, & h \leq 1\text{км}, \\ N(1\text{км}) \exp[-b_1(h-1)], & h > 1\text{км}, \end{cases} \quad (3.5)$$

где N_S – приземное значение индекса преломления, Н-ед.,

$N(1\text{ км})$ – значение индекса преломления на высоте 1 км, вычисленное в зависимости от приземного индекса преломления и его градиента.

$b_1 = 0,12 \text{ км}^{-1}$ параметр экспоненциальной модели.

Модифицированный индекс преломления вычисляется по формуле (2.13).

В разделе программы «Влияние тропосферных волноводов» изначально задаётся высотный профиль модифицированного индекса преломления $M(h)$ в соответствии с типом и параметрами тропосферного волновода (см. рисунок 2.9), а затем вычисляется профиль индекса преломления $N(h)$:

$$N(h) = M(h) - 157h, \quad (3.6)$$

где высота h выражена в километрах.

Необходимо отметить следующее:

$$N(0) = M(0) = N_S.$$

4 ЗАДАНИЯ

Работа состоит из двух частей:

- 1) изучение влияния тропосферной рефракции на распространение радиоволн;
- 2) изучение влияния тропосферных волноводов на распространение радиоволн.

Открыть в программе MATLAB файл *Main.m*. Запустить программу на выполнение. В появившемся графическом окне заполнить исходные данные в соответствии с вариантом (см. таб. 4.1).

Таблица 4.1 – Исходные данные для проведения моделирования

Вариант	Частота, МГц	Протяжённость трассы, км	Высота антенны передатчика, м	Ширина ДНА, град	Ns, N-ед.
1	200	150	10	5,0	325
2	250	175	12	3,0	320
3	175	200	8	2,5	300
4	145	180	15	5,5	330
5	150	195	11	4,0	315
6	225	145	9	3,5	305
7	215	185	18	2,5	335
8	185	190	13	3,0	295
9	210	170	17	4,0	310
10	235	155	16	4,5	340

Поляризация сигнала – горизонтальная.
Наклонение луча ДНА – 0°.

4.1 Изучение влияние рефракции на уровень ЭМП

1. Заполнить самостоятельно значения градиента индекса преломления dN/dh для четырех типов тропосферной рефракции в соответствии с требованиями:

- отрицательной: $dN/dh > 0$ Н-ед./км;
- положительной, пониженной: -40 Н-ед./км $< dN/dh < 0$ Н-ед./км;
- положительной, повышенной: -157 Н-ед./км $< dN/dh < -40$ Н-ед./км;
- сверхрефракции: $dN/dh < -157$ Н-ед./км.

Для трёх типов рефракции значения градиента постоянные (у студентов нет возможности их изменить):

- отсутствие рефракции, $dN/dh = 0$ Н-ед./км;
- положительная, нормальная, $dN/dh = -40$ Н-ед./км;
- положительная, критическая, $dN/dh = -157$ Н-ед./км.

Студентам необходимо рассмотреть все семь типов тропосферной рефракции. Полученные графики привести в отчёте и сделать анализ результатов на предмет того, как зависит распределение множителя ослабления в пространстве от типа рефракции.

Рассчитать эквивалентный радиус Земли для каждого типа рефракции.

2. Увеличить частоту сигнала на 750 МГц. Повторить предыдущий пункт и сделать выводы об изменении распределения множителя ослабления при увеличении частоты радиосигнала.

3. На графиках дистанционной зависимости множителя ослабления отметить зону прямой видимости, зону дифракции (полутени) и зону дальнего тропосферного распространения (зона тени).

4. Установить длину трассы 50 км и повторить пункты 1 и 2 для положительной нормальной и положительной критической типов рефракции. Сравнить распределение множителя ослабления в конце трассы. Сделать выводы о том, как влияет высотный градиент индекса преломления на распределение максимумов и минимумов множителя ослабления.

5. Увеличить приземное значение индекса преломления на 50 Н-ед. Получить распределение множителя ослабления для положительной нормальной рефракции. Сравнить с предыдущими результатами. Сказать, как влияет приземное значение индекса преломления на множитель ослабления. Объяснить выводы.

6. Установить вертикальную поляризацию сигнала. Повторить пункт 4. Сравнить результаты моделирования для радиоволн разной поляризации.

4.2 Изучение влияния тропосферных волноводов на ЭМП

1. В разделе графического окна «Влияние тропосферных волноводов» заполнить поля с параметрами волноводов в соответствии со значениями из таблицы 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры тропосферных волноводов для моделирования

Вариант	Волновод испарения		Приповерхностный волновод		Приподнятый волновод		
	ΔM , М-ед.	Δh , м	ΔM , М-ед.	h_t , м	ΔM , М-ед.	Δh , м	H_m , м
1	30	27	15	150	30	400	1000
2	25	25	20	175	25	300	1200
3	29	24	17	140	28	250	1500
4	23	28	27	200	26	275	950
5	27	23	30	185	27	350	1100
6	21	29	25	190	28	325	1050
7	28	30	23	155	25	375	1250
8	22	26	28	195	30	275	1300
9	26	22	18	160	29	350	1400
10	24	21	24	170	26	250	1350

Установить следующие параметры:

- длина трассы: 40-70 км;

- поляризация: горизонтальная;

- высота антенны, ширина ДНА и приземное значение индекса преломления – в соответствие с таблицей 4.1.

2. Рассчитать критическую частоту сигнала для волновода испарения. Установить частоту передатчика на 30-50 МГц выше критической частоты. Запустить программу на расчёт и получить распределение множителя ослабления в пространстве.

Уменьшить частоту передатчика на 30-50 МГц относительно критической частоты и повторить расчёт множителя ослабления. Сравнить результаты. Обратить внимание на поведение высотного профиля множителя ослабления в конце трассы на участке высоты до 1 км.

3. Установить частоту радиосигнала, равную частоте из пункта 2 раздела 4.1, а протяжённость трассы РРВ 200 км. Получить распределение множителя ослабления для волновода испарения. Описать полученные результаты.

4. Получить распределение множителя ослабления для приповерхностного волновода. Описать полученные результаты.

5. Получить распределение множителя ослабления для приподнятого волновода. Описать полученные результаты.

6. Сравнить результаты расчёта множителя ослабления для трёх типов волноводов между собой и для случая распределения множителя ослабления при положительной нормальной рефракции при одинаковых параметрах передатчика и протяжённости трассы (для этого нужно не меняя настроек программы запустить на вычисление модуль «Влияние рефракции тропосферы» при положительной нормальной рефракции). Сделать выводы.

5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт оформляется в соответствии с образовательным стандартом ТУСУР [13] и содержит следующие элементы:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) краткое изложение задания своими словами;
- 4) основная часть (полученные результаты с подробным описанием);
- 5) ответы на все контрольные вопросы;
- 6) выводы.

Требования к оформлению графиков:

- 1) все графики должны быть чёткими и наглядными;
- 2) каждый график должен иметь подпись, поясняющая это график;
- 3) оси на графиках должны быть подписаны, на осях указаны единицы измерения;
- 4) на графиках должна быть изображена сетка.

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое множитель ослабления?
2. Почему при изменении приземного значения индекса преломления N_s результат расчёта множителя ослабления не изменяется?
3. Что такое эквивалентный радиус Земли? От чего он зависит?
4. Что такое «стандартная атмосфера»? Какими параметрами она характеризуется?
5. Что такое критическая длина волны для тропосферного волновода?
6. В чём преимущество использования модифицированного индекса преломления M при анализе уровня ЭМП по сравнению с использованием индекса преломления N ?
7. Чему равно максимальное значение множителя ослабления в зоне прямой видимости?
8. В какой зоне РРВ приподнятый волновод оказывает влияние на множитель ослабления?
9. В чём заключается главное отличие приповерхностного и приподнятого тропосферных волноводов?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. – М.: Связь, 1972. – 492 с.
2. Арсеньян Т. И. Распространение электромагнитных волн в тропосфере. – Томск: ТУСУР, 2006. – 170 с.
3. Красюк Н.П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н. П. Красюк, В. Л. Коблов, В. Н. Красюк. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
4. Распространение радиоволн / О. И. Яковлев, В. П. Якубов, В. П. Урядов, А. Г. Павельев. – М.: ЛЕНАНД, 2009. – 496 с.
5. Рекомендация МСЭ-Р Р.453-10. Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции.
6. Бин Б.Р. Радиометеорология / Б. Р. Бин, Е. Дж. Даттон– Л.: Гидрометиздат, 1971. – 363 с.
7. Захаров Ф. Н. Оценка величины множителя ослабления радиоволны при наличии приподнятого тропосферного слоя / Ф. Н. Захаров, Ю. П. Акулиничев, М. В. Крутиков // Доклады ТУСУР. – 2013, №4 (30). – С. 5 – 12.
<https://journal.tusur.ru/storage/45218/005.pdf?1466495405>
8. Levy M. Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation // IEE. – 2000. – 336 р.
9. Ахияров В. В. Вычисление множителя ослабления над земной поверхностью методом параболического уравнения // Журнал Радиоэлектроники. – 2012. – № 1.
- 10.Акулиничев Ю. П. Состояние и перспективы развития методов численного решения параболического волнового уравнения / Ю. П. Акулиничев, Ф. Н. Захаров, В. А. Пермяков, М. С. Михайлов // Известия высших учебных заведений. Физика – 2016. – № 12/3. – Т. 59. – С. 169–178.
- 11.Фок В. А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. – М.: Сов. радио, 1970. – 517с.
- 12.Самарский А. А. Введение в численные методы. – М.: Наука, 1978. – 288 с.
- 13.Образовательный стандарт ТУСУР 01-2013. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления. Томск: ТУСУР, 2013. – 57 с. http://www.rts.tusur.ru/wp-content/uploads/2013/12/tech_01-2013.pdf