

Министерство образования и науки РФ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Казанский (Приволжский) Федеральный
Университет»**

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Направление: 03.03.03 радиофизика

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Бакалаврская работа)

**Подсистема учёта КНД антенн в компьютерной
модели метеорных радиосистем**

Работа завершена:

«__» _____ 2017г. _____ (Б. З. Камалиев)

Работа допущена к защите:

Научный руководитель:

ассистент кафедры радиоэлектроники

«__» _____ 2017г. _____ (С. Н. Терёшин)

Заведующий кафедрой:

д. ф.-м. н., профессор

«__» _____ 2017г. _____ (М. Н. Овчинников)

Казань 2017

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. ОСНОВЫ МЕТЕОРНОЙ РАДИОСВЯЗИ	5
1.1 Развитие систем.....	5
1.2 Принцип работы метеорных коммуникаций.....	6
1.3 Описание блок-схемы метеорной радиосистемы	7
Глава 2. ИЗЛУЧЕНИЕ ПРОВОЛОЧНЫХ АНТЕНН.....	9
2.1 Диаграмма направленности антенн.....	10
2.2 Учёт влияния земли	12
Глава 3. КОЭФФИЦИЕНТ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ АНТЕННЫ «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ»	18
Глава 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.	24
4.1 Интерференционный множитель учёта земли	24
4.2 Программа вычисления КНД антенн (с учётом земли)	29
Заключение	34
Список литературы	35
Приложение	36

Введение

Использование при разработке и оптимизации радиосистем натуральных экспериментов в реальных условиях может быть очень затруднённым, а также потребовать много времени и финансовых затрат. Более удобно экспериментировать для оптимизации с математическими моделями радиосистем, реализованными в виде пакета программ на компьютере, что позволяет с меньшими затратами и намного быстрее подобрать нужные параметры. Это является очевидным преимуществом компьютерного моделирования.

Компьютерное моделирование радиосистем представляет одно из успешно развивающихся направлений теоретической радиотехники. Использование в достаточной степени адекватной компьютерной модели позволяет значительно расширить спектр прикладных задач и повысить информативность исследований по разработке методов адаптации к неизвестным и переменным свойствам среды распространения. Исследование характеристик системы метеорной связи (СМС) подходит под тот класс задач, для решения которых становится рациональным создание компьютерной модели[2].

Информационные характеристики системы метеорной связи зависят от большого числа технических характеристик (параметров приёмо-передающей аппаратуры и антенных систем), а также имеют значительные разновидности, которые определяются астрономическими факторами и зависят от времени и сезона проведения натурального эксперимента.

Важно отметить, что результаты моделирования для любых систем связи имеют вторичный характер по сравнению с результатами натуральных

экспериментов. При использовании математических моделей возникает вопрос о степени адекватности модели моделируемой системе.

Данная работа выполнялась для создания программного инструментария проверки и сравнения результатов всевозможными способами численно смоделированных диаграмм направленности антенн, которые могли бы использоваться в программных реализациях для компьютерного моделирования метеорных радиосистем.

Распространенной программой, которая моделирует диаграмму направленности любой проволочной антенны, является MMANA-GAL. Подробно диаграмма направленности может быть записана этой программой в виде файла с большой таблицей направлений и соответствующих коэффициентов усиления[5].

Цель выпускной работы - создание программной реализации диаграмм направленности антенн с учетом подстилающей поверхности (земли), и изменения высоты подвеса для дальнейшего применения вычислений коэффициента направленного действия в программе моделирования метеорных радиосистем.

Задачи и этапы, необходимые для достижения цели

1. Изучить источники для освоения сведений о метеорном распространении радиоволн, о антеннах и их диаграмм направленности, о моделировании антенных систем.

2. Изучить и научиться пользоваться возможностями программы MMANA-GAL, изучить особенности формата файлов её выходных данных.

3. Ознакомиться и овладеть системой программирования LAZARUS.

4. Реализовать в программе вычисления КНД алгоритм учёта интерференционного множителя земли.

5. Протестировать созданную программу.

Глава 1. ОСНОВЫ МЕТЕОРНОЙ РАДИОСВЯЗИ

1.1 Развитие систем

Все время в атмосферу Земли проникают множество частиц, начиная от мельчайшей космической пыли, и заканчивая крупными телами, как Тунгусский метеорит. Приближенный график зависимости числа частиц, проникающих в атмосферу, от массы приведен на рис. 1[1].

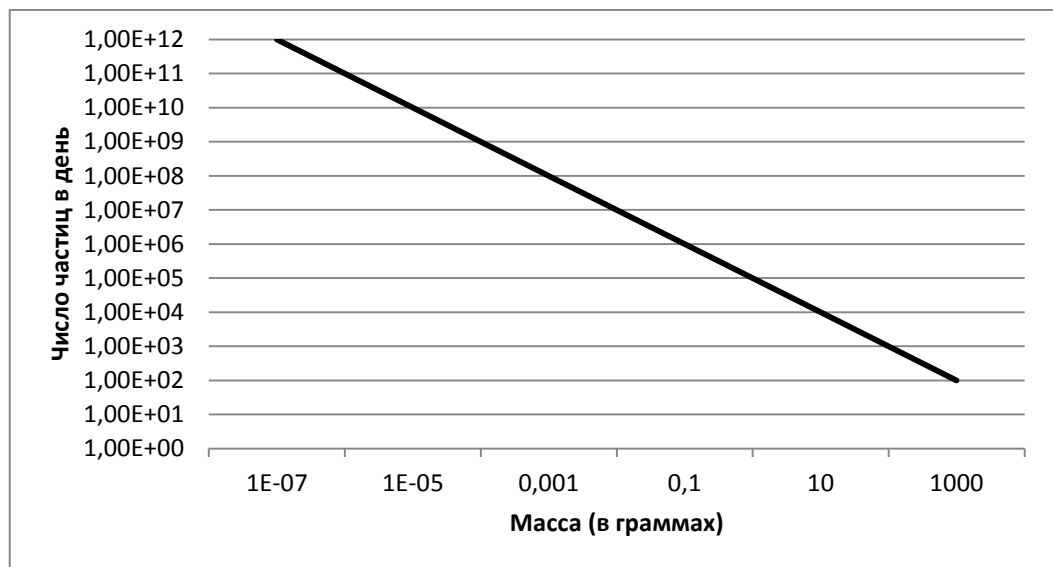


Рис. 1. Число частиц от массы.

В Солнечной системе известно более ста тысяч объектов, способных быть источником метеорных частиц. При сгорании частицы в атмосфере, за ним образуется столб ионизованного газа, называемый «метеорным следом». Поперечные размеры метеорного следа бывают до нескольких метров, а продольные его размеры могут достигать нескольких километров. За счет влияния ветра и диффузии след разрушается, и уровень метеорного радиосигнала стремительно спадает. Тем не менее, если достаточна величина ионизации, то след может использоваться для отражения радиоволн и организации пакетной радиосвязи. Отсюда следует, что метеорный канал может

послужить фундаментом для организации надежных и экономически действенных систем связи широкого применения.

1.2 Принцип работы метеорных коммуникаций.

Чтобы осуществить радиосвязь посредством метеорного канала требуется, перекрытие диаграммы антенн приемника и передатчика, и в области перекрытия должно быть достаточно метеорных следов, приемлемых условию зеркального отражения (рис. 2)[1].

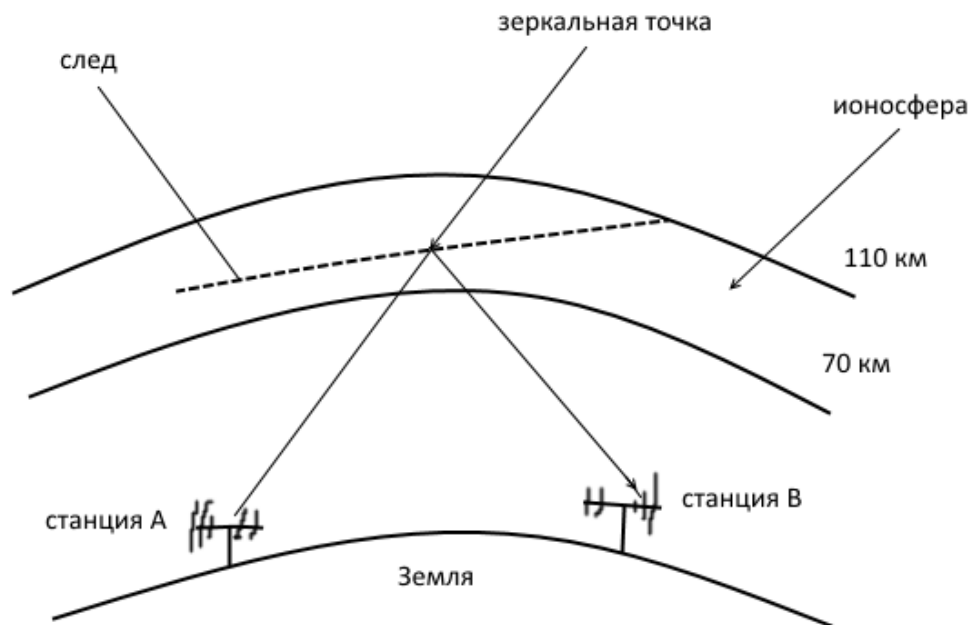


Рис. 2. Перекрытие диаграммы антенн передатчика и приемника

Для того чтобы установить связь, требуется обнаружить существование подходящего метеорного следа в области перекрытия антенн. Чтобы сделать это одна из станций (центральная) безостановочно излучает в эфир зондирующий сигнал с известной формой и амплитудой. Вторая станция (периферийная), приняв данный сигнал, транслирует обратно сигнал, который подтверждает возможность связи. Если же центральная станция получит этот сигнал, то станции входят в состояние соединения и обмениваются пакетами

данных до тех пор, пока след не пропал. Если за время сеанса связи окажется, что на одном метеорном следе передалась не вся информация, то станции снова входят в режим ожидания подходящего метеорного следа. Вследствие относительной редкости подходящих метеорных следов, рабочий цикл, обычно, составляет 1% - 5% [1].

Метеорная радиосвязь создает условия для автоматического временного уплотнения множества радиосигналов, в результате чего их глушение или перехват оказывается весьма затруднительно. Универсальные системы метеорной связи, использующие средства вычислительной техники для создания информационных пакетов, буферизации и исправления ошибок, позволяют создать большое число прикладных систем передачи и сбора данных.

1.3 Описание блок-схемы метеорной радиосистемы

При передаче данных через метеорный радиоканал применяются два комплекта приемо-передающей техники, располагающиеся на концах (рис.2) метеорной радиолинии. Блок-схема комплекта приемо-передающей техники радиосистемы для передачи данных через метеорный радиоканал представлена на рис. 3 [1].

Главный компьютер работает с накопителем информации. Данные могут поступать через модем, который подключен к телефонной сети, или к локальной компьютерной сети, а также, может быть введен на клавиатуре. Оператор системы через дисплей контролирует безошибочность набора информации и технические режимы работы отдельных блоков радиосистемы. Внешняя память может быть подключена к управляющему компьютеру, если требуется принимать и хранить немалые объемы данных. В большинстве случаев, для вывода информации используют принтер, или же информация передается на внешние устройства через модем.



Рис. 3. Блок-схема метеорной радиосистемы

Данные, передаваемые через накопитель, кодируются на кодере, в результате которого образуется видеосигнал. Далее видеосигнал преобразуется модулятором в радиосигнал, который усиливается передатчиком. В метеорных радиосистемах, как правило, применяется совмещенная на прием и передачу одна и та же антенная система. В свою очередь, это требует использования антенного коммутатора (переключателя). Усиленный в передатчике радиосигнал через антенный коммутатор поступает в антенную систему.

Если есть метеорный след, зеркально отражающий радиосигнал данного пункта радиолинии на антенную систему противоположного пункта, то информация передается через метеорный радиоканал. На рис. 3 рассмотрено, происходящее с принимаемым радиосигналом [1].

Радиосигнал, принимаемый антенной системой, проходит через антенный коммутатор на вход приемника. Усиленный приемником радиосигнал, пройдя демодулятор, преобразуется в видеосигнал. После декодирования видеосигнала на декодере, принятая информация поступает на управляющий компьютер для обработки или хранения. При желании, эту информацию можно будет воспроизвести на дисплее, распечатать на принтере, или передать через модем на другие компьютеры и т.д.

Глава 2. ИЗЛУЧЕНИЕ ПРОВОЛОЧНЫХ АНТЕНН

2.1 Диаграмма направленности антенн

Предназначение антенны - извлечение энергии присутствующего электромагнитного поля (приёмная антенна), либо преобразование энергии высокочастотного генератора (передатчик) в электромагнитные волны посредством излучения (передающая антенна). Из теоремы взаимности следует, что одна и та же антенна может использоваться как приёмной, так и передающей: их качества и свойства остаются в обоих вариантах одним и тем же. По этой причине можно заявить о двойственности антенн.

Когда описывают свойства излучения, используют два почти что равноценных понятия трехмерной и двумерной диаграмм направленности, служащие для демонстрации свойств излучения в системе пространственных координат [3]. Первая из этих диаграмм описывает распределение излучения по всем направлениям, а другая - по направлениям, которые лежат в той или иной плоскости. Диаграмма направленности (ДН) - это графическое изображение сечения характеристики направленности.

ДН изображается в полярной системе координат, либо в сечении этой системы, а также в декартовых координатах.

В полярных координатах используется сетка концентрических кругов и исходящих из их центра лучей (рис. 4). Концентрические круги демонстрируют напряженность, причем, что в их центре оно равняется нулю [3]. Лучи показывают направление, которое отсчитывается в угловой мере обычно от основного направления приема или передачи. Это правило, чаще всего, не используют, когда необходимо построить ДН в вертикальной плоскости.

На рис. 4,а демонстрируется нормированная ДН полуволнового вибратора в горизонтальной плоскости (плоскость Е, горизонтальная ширина

половинной мощности 80°); на рис. 4,б - ДН в горизонтальной плоскости директорной антенны (плоскость Е, горизонтальная ширина 27°) в линейных полярных координатах [3]. Демонстрация ДН в декартовых координатах менее очевидно (рис.5), тем не менее, его преобладание состоит в большем угловом разрешении боковых лепестков (это видно при сравнении рис. 5 и 4,б). Как правило, максимум излучения отвечает углу 0° . По оси абсцисс откладывают углы от 0° до $\pm 180^\circ$, а по оси ординат - проценты от максимума (0 - 100%) или значения представляемой величины в децибелах.

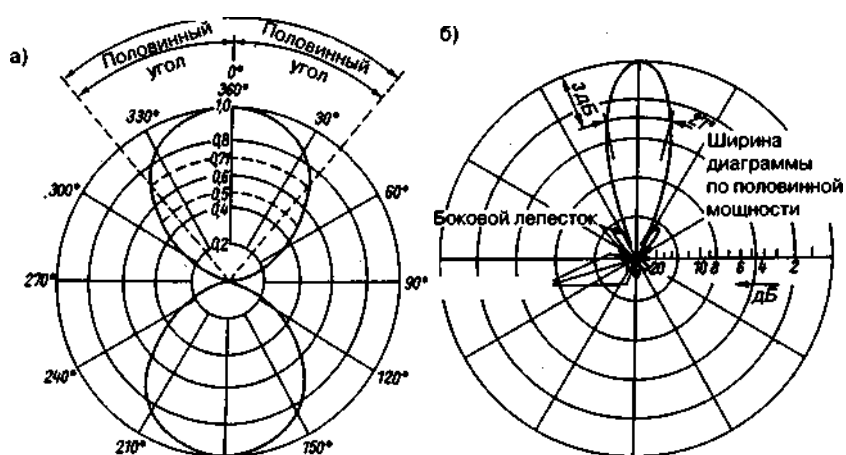


Рис.4. Горизонтальные диаграммы направленности

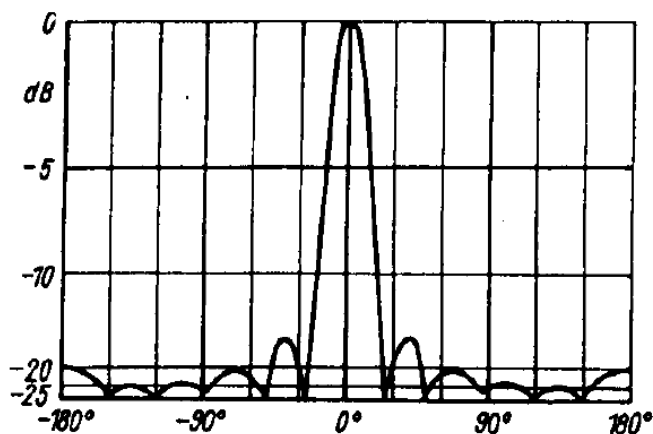


Рис.5. Диаграмма направленной антенны в декартовых координатах

Наибольшее выходное напряжение антенны, измеренное в основном направлении излучения, равняется 1 (100%) либо 0 дБ и располагается при угле 0° . Все следующие напряжения приема, измеренные под

различными углами к основному направлению в пределах 180° , откладываются при соответственных углах в долях от наибольшего напряжения. Кривая, связывающая точки результатов измерений, представляет собой функцию направления и является диаграммой направленности излучения.

По ДН определяют ряд ключевых характеристик исследуемой антенны. Половина ширины главного лепестка называется углом половинного уровня. Это угол между направлением наибольшего излучения и направлением, где плотность потока энергии равняется половине от наибольшей. Для определения такого угла, точке максимального напряжения в главном направлении приписывают значение 1,0 и по обеим сторонам лепестка излучения находят точки, в которых напряжение равняется 0,71 от наибольшего. Понижение напряжения в 0,71 раз ($1/\sqrt{2}$) соответствует спаду мощности на 50% или на 3 дБ. После этого, как показано на рис. 4,а, через эти точки прочерчивают из центра прямые, служащие сторонами искомого угла половинного уровня [3]. Как правило, пользуются термином ширины диаграммы по половинной мощности или ширины по уровню 3 дБ. Ширина лепестка ДН по половинной мощности равна сумме обоих углов половинного уровня и представляет собой интервал углов, составление плотности потока энергии в котором не менее половины своего наибольшего значения. В то же время, с понятием «ширина по половинной мощности» используют и тождественное – «угол раскрытия». Суть угла половинного уровня несложно понять в декартовой системе координат. Так как ДН делают в горизонтальной и вертикальной плоскостях, необходимо отличать горизонтальную и вертикальную ширину диаграмм по половинной мощности.

Коэффициент обратного излучения - отношение наибольшего напряжения, полученного при нулевом угле, к наибольшему напряжению, наведенному с обратного направления. Единицей измерения этого коэффициента является децибелы.

Нечасто используют термин «коэффициент бокового излучения», выражающийся отношением напряжения при нулевом угле, к напряжениям при угле 90° или 270° .

Точка ДН, где напряжение уменьшается до нуля, называется нулевой. Её положение выражается углом нулевого значения, т. е. углом между направлением на первую нулевую точку. Шириной по нулевому уровню называется интервал углов между первыми нулевыми точками по обе стороны от главного лепестка ДН.

Как показано на рис. 4,б, наравне с главным лепестком возможны наиболее или наименее выраженные боковые лепестки. По большей части, они нежелательны, так как сугубляют направленность и снижают главный лепесток. Отношение наибольшего напряжения, который отвечает главному направлению излучения, к напряжению в боковом лепестке называют коэффициентом ослабления бокового лепестка. Наряду с коэффициентом при отображении бокового лепестка приводят и его угол сравнительно главного направления.

ДН является нормированной, когда все значения напряжения поделены на его наибольшую величину и результат деления выражен в долях единицы или в процентах (см. рис 4,а и 5).

2.2 Учёт влияния земли

Влиянием подстилающей поверхности можно пренебречь лишь в редких случаях, к примеру, в случае зеркальных остронаправленных антенн, излучение которых ориентировано вверх под некоторым острым углом относительно подстилающей поверхности.

Тем не менее, большая часть антенн, в особенности проволочные, находится непосредственно над подстилающей поверхностью или поблизости от нее таким образом, что поверхность проявляет заметное воздействие

на характеристики антенн. Это воздействие влияет в первую очередь на диаграмму направленности антенны.

В данном пункте рассматривается примерный способ учёта влияния подстилающей поверхности (земли), где поверхность заменяется безграничной идеально проводящей плоскостью и ее воздействие учитывается с помощью зеркального изображения антенны.

Радиоволны, падающие на плоскость, которая имеет превосходную проводимость, отражаются от нее аналогично световым лучам, отражающимся от зеркала. Воздействие светового источника, который расположен перед зеркалом, можно заменить суммарным действием того же источника и его зеркального изображения [6].

На этот же принцип опирается примерный учёт влияния земли на работу антенны.

В первоначальном приближении считается, что проводимость поверхности хорошая. Из теории распространения радиоволн известно, что данное предположение тем более справедливо, чем больше длина волны [6]. К примеру, для километровых и гектометровых волн оно считается совершенно допустимым.

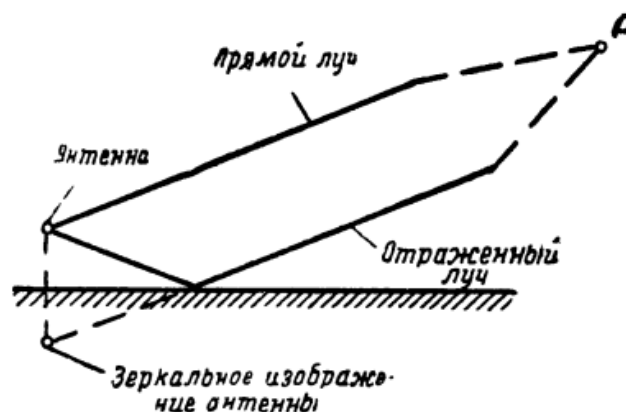


Рис. 6. К учёту влияния земли на излучение антенны методом зеркального изображения.

Полное электромагнитное поле, которое создается антенной в какой-то удалённой точке Р (рис. 6), размещенной над землей, характеризуется двумя составляющими [6]. Одна составляющая прибывает прямо от антенны, а другая формируется отражением от подстилающей поверхности и может рассматриваться как прибывающая от зеркального изображения антенны, пребывающей под землей. Вместе с тем нужно принимать к сведению, что изображения антенны обладают противоположными знаками относительно зарядов самой антенны. В данном случае имеет место граничное условие о том, что тангенциальная составляющая напряженности электрического поля отлично проводящей плоскости должна равняться нулю.

Проанализируем, к примеру, поле электрического заряда, помещенного над отлично проводящей поверхностью на высоте h (рис. 7, а). Электрическое поле заряда в пространстве над поверхностью будет таким же, как электрическое поле двух зарядов противоположных знаков, расположенных на расстоянии $2h$ (рис. 7, б).

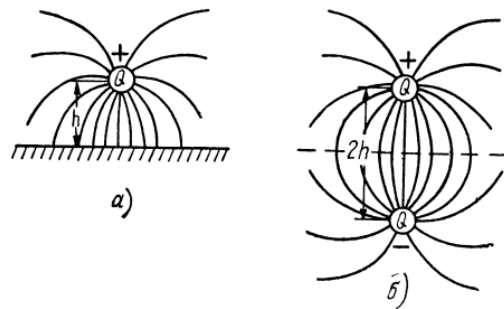


Рис. 7. Электрическое поле заряда над идеально проводящей плоскостью (а); поле того же заряда и его зеркальное изображение (б).

В реальной антенне знаки зарядов меняются очень часто. С той же частотой меняется во времени и поле антенны. Если в какой-то момент времени знаки зарядов в вертикальной антенне (нижний конец которой расположен у земли) таковы, что ток протекает снизу вверх (рис. 8), то в зеркальном изображении знаки зарядов противоположны, и ток будет протекать таким же образом снизу вверх. Следовательно, фазы токов в вертикальной антенне и

ее изображении совпадают. Амплитуды волн, отраженных от идеально проводящей плоскости, равны амплитудам волн падающих. Из этого следует, что распределение амплитуд тока в изображении совпадает с распределением амплитуд тока в самой антенне. Вследствие, общее распределение тока в вертикальной антенне и ее изображении будет похоже на распределение тока в симметричном вибраторе, а электромагнитное поле антенны в пространстве по одну сторону от плоскости раздела будет совпадать с полем симметричного вибратора соответствующих размеров. Несложно удостовериться, что в плоскости подстилающей поверхности электрическое поле вибратора не имеет тангенциальной составляющей и сказанное выше граничное условие выполняется.

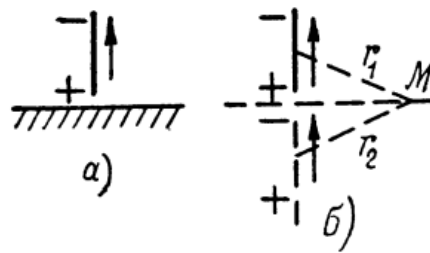


Рис. 8. Вертикальная антенна над идеально проводящей плоскостью (а); ее электрический эквивалент (б).

Применяя подобного рода рассуждения для горизонтальной антенны над землей (рис. 9), несложно показать, что в каждый момент времени токи в горизонтальной антенне и её изображении будут противоположными по фазе, то есть будут иметь противоположные направления.

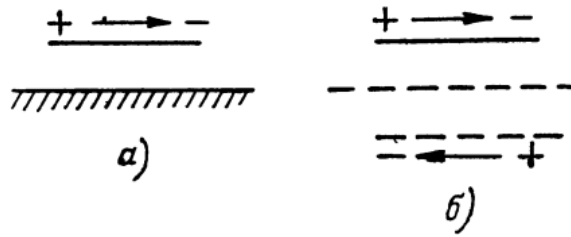


Рис. 9. Горизонтальная антенна над идеально проводящей плоскостью (а); ее электрический эквивалент (б).

Из вышеуказанного следует, что воздействие подстилающей поверхности на поле, формируемое вертикальными и горизонтальными антеннами, будет разным. Для вертикальной антенны поле в удаленной точке M (рис. 8) у поверхности подстилающей поверхности определяется полем, формируемым самой антенной, и полем от зеркального изображения, к тому же расстояние r_1 от антенны до точки M и расстояние от зеркального изображения до точки M будут такими же. Благодаря этому и равенству фаз и амплитуд токов вертикальной антенны и ее изображения поля, создаваемые в точке M антенной и ее зеркальным изображением, совпадут по фазе, и на длинной дистанции будут складываться арифметически. В результате чего напряженность поля, которая создается антенной у поверхности земли, будет в два раза больше, чем напряженность поля, созданной той же антенной в свободном пространстве.

Рассуждая подобным способом, удостоверимся, что для горизонтальной антенны напряженность поля, которая создается в удаленной точке у поверхности отлично проводящей подстилающей поверхности, равняется нулю. На самом деле, поля, которые создаются вдоль нацеленной поверхности антенной и ее зеркальным изображением, противоположны по фазе в силу того, что пути до какой угодно рассматриваемой точки и противоположность фаз токов горизонтальной антенны и ее зеркальное изображение равны.

К антенне в виде провода, который наклонен под определенным острым углом относительно подстилающей поверхности, также применяются способ зеркальных изображений. Для того, что б это сделать, действие каждого

элемента провода необходимо заменить действием двух элементов – вертикального и горизонтального, а к каждому из этих элементов уже использовать метод зеркальных изображений.

Метод зеркальных изображений допускается использовать, в случае если полагать землю полупроводящей, но безграничной и плоской. В данном случае относительная амплитуда и фаза тока изображения будут зависеть от характеристик почвы (проводимости, диэлектрической и магнитной проницаемостей), длины волны источника и поляризации поля.

Глава 3. КОЭФФИЦИЕНТ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ АНТЕННЫ «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ»

Пятиэлементная директорная антенна волновой канал является самым распространённым типом антенны, применяемой в метеорных радиосистемах. Учёт направленных свойств антенны важен в задачах моделирования метеорного распространения радиоволн (МРР), при экспериментальных наблюдениях. Расчёту антенн волновой канал посвящено большое количество публикаций. В этой работе остановимся на анализе направленных свойств антенны, применяемой в метеорных радиосистемах Казанского государственного университета, (рис. 10), и сопоставлении ее диаграммы направленности с аналитическими аппроксимациями, широко применяемыми при анализе МРР [4].

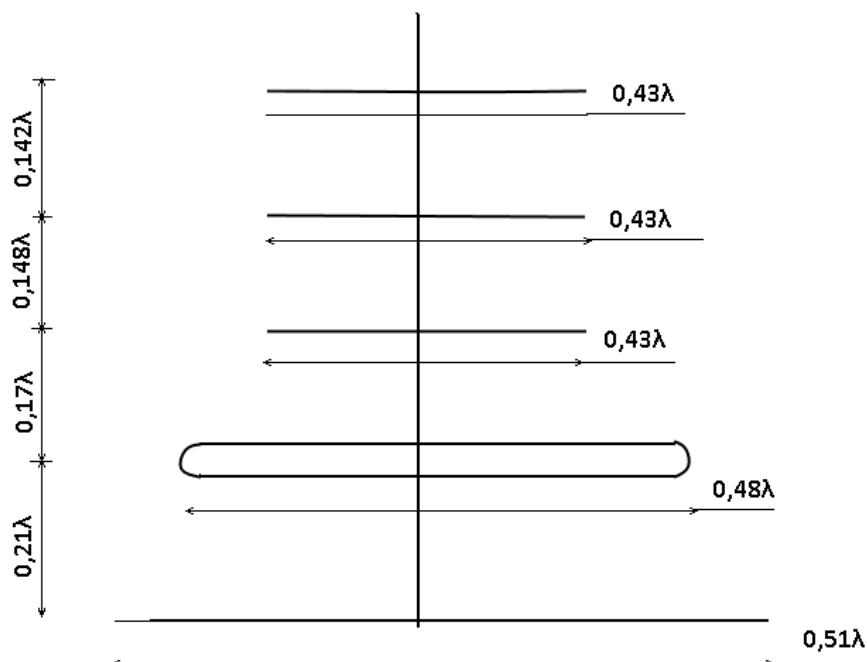


Рис. 10. Антенна «волновой канал»

Методика расчёта направленных свойств антенны волновой канал сводится к решению системы уравнений Кирхгофа

$$\begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{15} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{25} \\ Z_{31} & Z_{32} & \dots & Z_{35} \\ Z_{41} & Z_{42} & \dots & Z_{45} \\ Z_{51} & Z_{52} & \dots & Z_{55} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ U_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $Z_{i,j}$ - собственные и взаимные комплексные сопротивления вибраторов антенны, I_1 - ток, протекающий по рефлектору, I_2 - ток активного вибратора, U_2 - напряжение на зажимах активного вибратора.

Определив токи $I_1 \div I_5$ и пренебрегая отличием длин вибраторов от величины $\lambda/2$, напряжённость поля, создаваемая антенной, запишется в виде

$$E = \frac{60 * I_2}{r} \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} \left[\frac{I_1}{I_2} \exp(ikd_p \cos \varphi \cos \Delta) + 1 + \sum_{i=3}^5 \frac{I_i}{I_2} \exp(ikd_i \cos \varphi \cos \Delta) \right], \quad (2)$$

где d_p, d_i - координаты рефлектора и директоров относительно активного вибратора, θ - угол между лучом в точку наблюдения и осью вибратора ($\cos \theta = \sin \varphi * \cos \Delta$), φ - азимутальный угол и Δ - угол возвышения для горизонтально поляризованной антенны волновой канал, r - расстояние.

Тогда коэффициент направленного действия (КНД) антенны запишем в виде

$$D = \frac{4\pi r^2 \cdot E^2 \cdot (\varphi, \Delta)}{R_E \cdot W \cdot I_2^2}, \quad (3)$$

$$\text{где } W = 120\pi, R_E = \operatorname{Re} \left(\frac{U_2}{I_2} \right).$$

На рис. 11 изображена зависимость КНД антенны от углов φ и Δ (Еи Н - плоскости). Для сравнения там же нанесена зависимость КНД, вычисленная по аппроксимирующей формуле интегрированием по сфере, для диаграммы направленности

$$E = \frac{60 \cdot I_2}{r} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \cdot \frac{\sin(0,85\pi(1 - \cos \varphi \cos \Delta))}{0,85\pi(1 - \cos \varphi \cos \Delta)}. \quad (4)$$

Для рисунка 11:

1 - строгое решение

$$2 - E \approx \exp\left(-\frac{\varphi^2 + \Delta^2}{1,5}\right)$$

$$3 - E \approx \frac{\sin x}{x}$$

$$x = 2\pi(1 - \cos \varphi \cdot \cos \Delta)$$

$$4 - x = 0,85\pi(1 - \cos \varphi \cdot \cos \Delta)$$

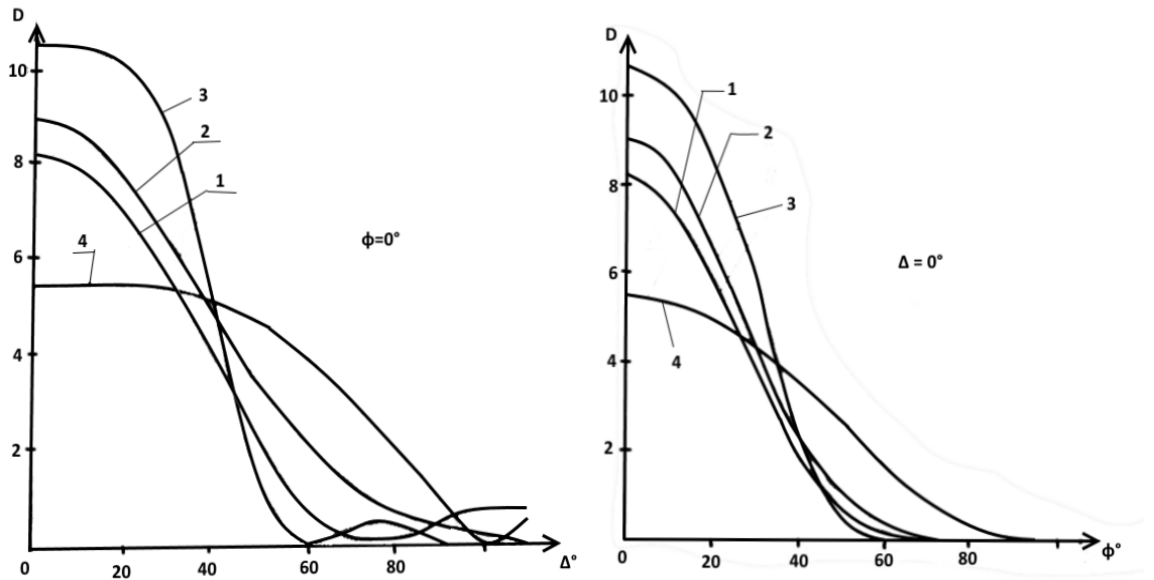


Рис.11. Зависимость КНД антенны от углов φ и Δ (Е и Н - плоскости).

Эта формула применяется для оценки направленных свойств антенны волновой канал. Видно, что различие этих зависимостей довольно существенное, а аппроксимация (4) слишком груба [4].

Подбором главного параметра в (4) можно получать достаточно близкую к расчётной величину КНД. На рис. 11 изображены эти зависимости. Для оценки, широкополосности антенны на рис. 12 показана зависимость D и отношения переднего и заднего лепестков (коэффициент защитного действия - КЗД) от изменения частоты волны, подаваемой на антенну, относительно расчётной (57,4 МГц). В районе расчётной частоты кривая КЗД раздваивается. Верхняя ветвь соответствует заднему лепестку, а нижняя часть - боковым лепесткам, уровень которых выше, чем задний лепесток диаграммы направленности антенны.

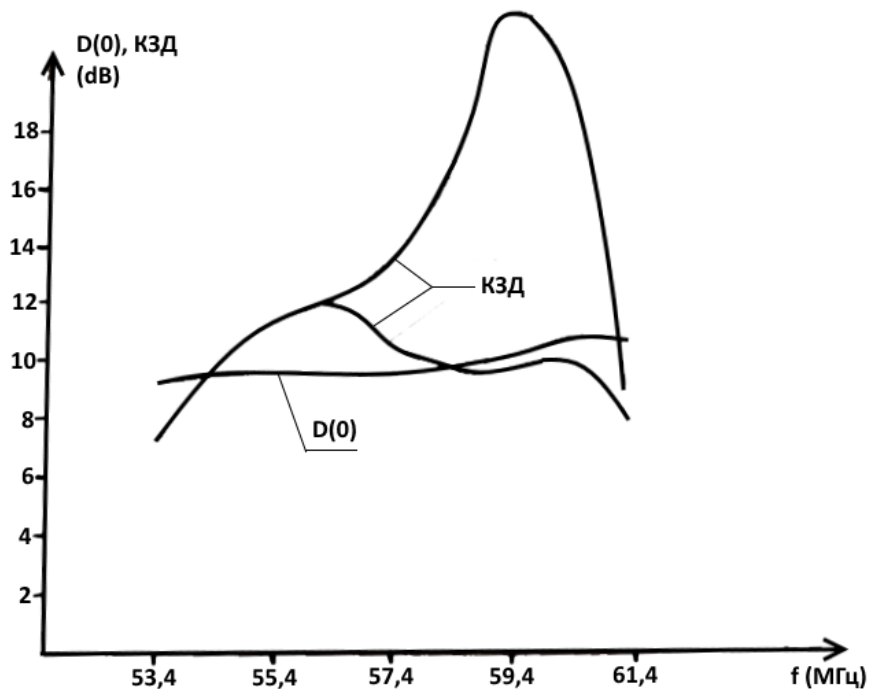


Рис. 12. Зависимость D и отношения переднего и заднего лепестков (коэффициент защитного действия - КЗД) от изменения частоты волны.

Рассмотрим влияние реальной земли на поляризационную диаграмму антенны с использованием коэффициентов Френеля. Для горизонтально поляризованной антенны волновой излучаемое поле создает две ортогональные

компоненты - горизонтальную (перпендикулярную к плоскости трассы) и вертикальную (параллельную плоскости трассы), которые записываются в вид

$$E_{\square} = E \frac{\sin \varphi \cdot \sin \Delta}{\sin \theta} \sqrt{1 + |\rho_{\square}|^2 - 2|\rho_{\square}| \cos[\arg(\rho_{\square}) - 2kh \sin \Delta]} \cdot e^{iv_{\square} - ikr},$$

$$E_{\perp} = E \frac{\cos \varphi}{\sin \theta} \sqrt{1 + |\rho_{\perp}|^2 + 2|\rho_{\perp}| \cos[\arg(\rho_{\perp}) - 2kh \sin \Delta]} \cdot e^{iv_{\perp} - ikr},$$

$$v_{\square} = \operatorname{arctg} \frac{|\rho_{\square}| \sin(2kh \sin \Delta - \arg(\rho_{\square}))}{1 - |\rho_{\square}| \cos(2kh \sin \Delta - \arg(\rho_{\square}))}, \quad (5)$$

$$v_{\perp} = \operatorname{arctg} \frac{|\rho_{\perp}| \sin(\arg(\rho_{\perp}) - 2kh \sin \Delta)}{1 + \cos(\arg(\rho_{\perp}) - 2kh \sin \Delta)},$$

где E из (2), $\rho_{\perp, \square}$ - комплексные коэффициенты Френеля, h - высота подвеса антенны[4].

На рис. 13 изображена зависимость КНД для обоих компонент поляризации.

При моделировании метеорных радиосистем возможно использование выражений (2), (3) со значениями токов, полученных численно при $U_2 = 1\text{В}$ для антенны, изображенной на рис. 10:

$$I_1 = -0,3259543 \times 10^{-3} + i \cdot 0,7457701 \times 10^{-2},$$

$$I_2 = 0,1512308 \times 10^{-1} - i \cdot 0,4966140 \times 10^{-2},$$

$$I_3 = -0,5912725 \times 10^{-2} - i \cdot 0,8875016 \times 10^{-2},$$

$$I_4 = -0,6009635 \times 10^{-2} + i \cdot 0,2464972 \times 10^{-2},$$

$$I_5 = -0,5895088 \times 10^{-3} + i \cdot 0,1013231 \times 10^{-1},$$

$$R_E = 59,7.$$

Диаграмма антенн хорошо описывается аналитической зависимостью вида

$$E \propto \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} \exp(-\frac{\varphi^2 + \Delta^2}{1,5}), \quad (6)$$

где значения углов φ и Δ выражены в радианах[4].

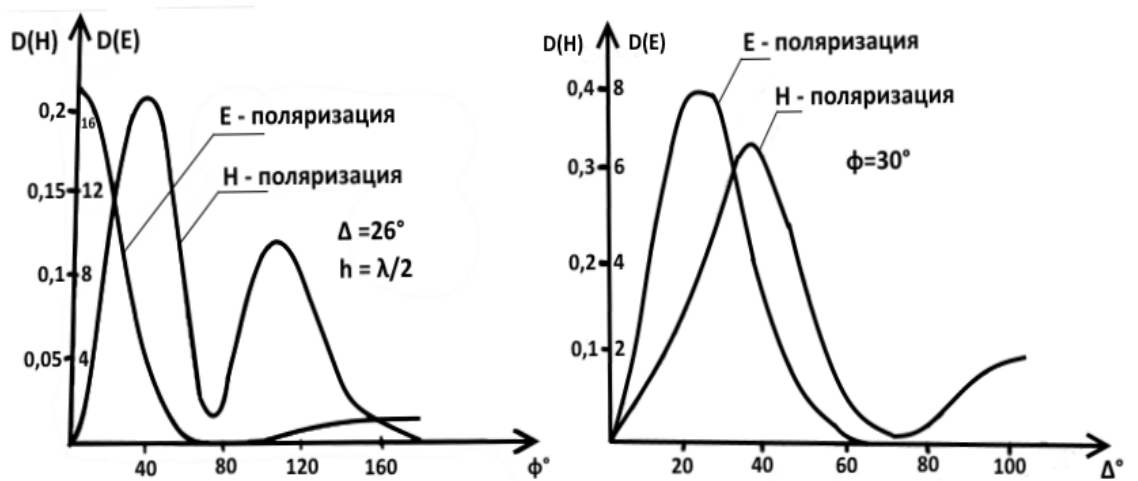


Рис. 13. Зависимость КНД для обеих компонент поляризаций.

Глава 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

4.1 Интерференционный множитель учёта земли.

Для нахождения, интерференционного множителя учёта земли диаграмм направленности антенн, находящихся на разной высоте подвеса, для примера были выбраны полуволновой диполь и антенна «волновой канал» (рис. 14). Предполагается, что интерференционные множители учёта земли для обеих антенн не будут отличаться.

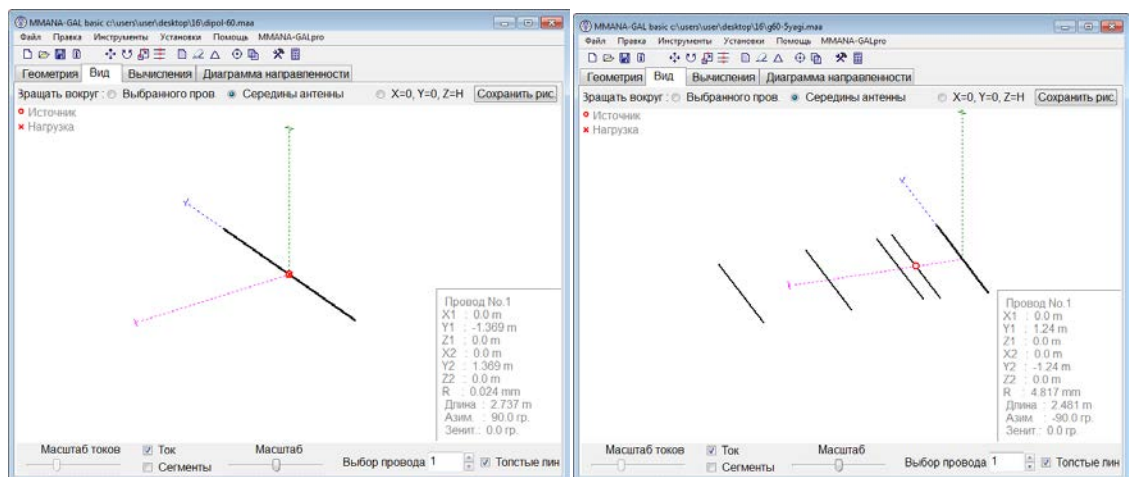


Рис. 14. Полуволновой диполь и антенна «волновой канал», соответственно

Вычисления проводились в программе Microsoft Excel. Исходные данные для него были созданы в программе MMANA-GAL.

Обе антенны были масштабированы для длины волны λ равной 5м.

Рассмотрим вычисление интерференционного множителя земли полуволнового диполя на высоте подвеса антенны равной половине длины волны $h = \lambda/2$.

Создается таблиц в формате *.csv для углов и усиления ДН полуволнового диполя в свободном пространстве (рис. 15). Затем они заносятся в программу Microsoft Excel. Таким же образом создается таблица ДН

для полуволнового диполя с учетом влияния реальной земли. Параметры реальной земли зависят от диэлектрической постоянной и проводимости, которые приведены на рис. 16. Они также заносятся в программу Microsoft Excel. После чего, с помощью простых математических операций, единица измерения усиления [дБ] переводится в единицу измерения амплитуды, в нашем случае напряженности [В/м]. Затем находится отношение амплитуды горизонтальной поляризации ДН полуволнового диполя с учётом реальной земли к амплитуде соответствующей поляризации диполя в свободном пространстве, результатом которого является интерференционный множитель учёта земли.

Параметры таблицы Углы/Усиление

Углы

	Старт гр.	Шаг гр.	Шагов
Азимут	44	1	3
Зенит	0.0	1	90

c:\users\user\desktop\16\dipol-60.csv

Да Отказ

Рис. 15. Параметры таблицы Углы/Усиление

Параметры реальной земли

No.	Dielec.	Conduct(mS/m)	X (m)	Height(m)
1	20.0	30.0	0.0	0
next				

Тип среды в сложной (>1 строки в таблице) земле

Вкл - радиальный тип (Rcor), Выкл - ступенчатый (Xcor)

Дополнительные проволочные радиалы

Число 8 Радиус провода 0.8 мм

Да Отказ

Рис. 16. Параметры реальной земли

Аналогичным способом вычисляются интерференционные множители для антенны «волновой канал». Графики зависимостей интерференционного

множителя учета земли от зенитного угла для горизонтальной поляризации приведены на рис. 17 и 18.

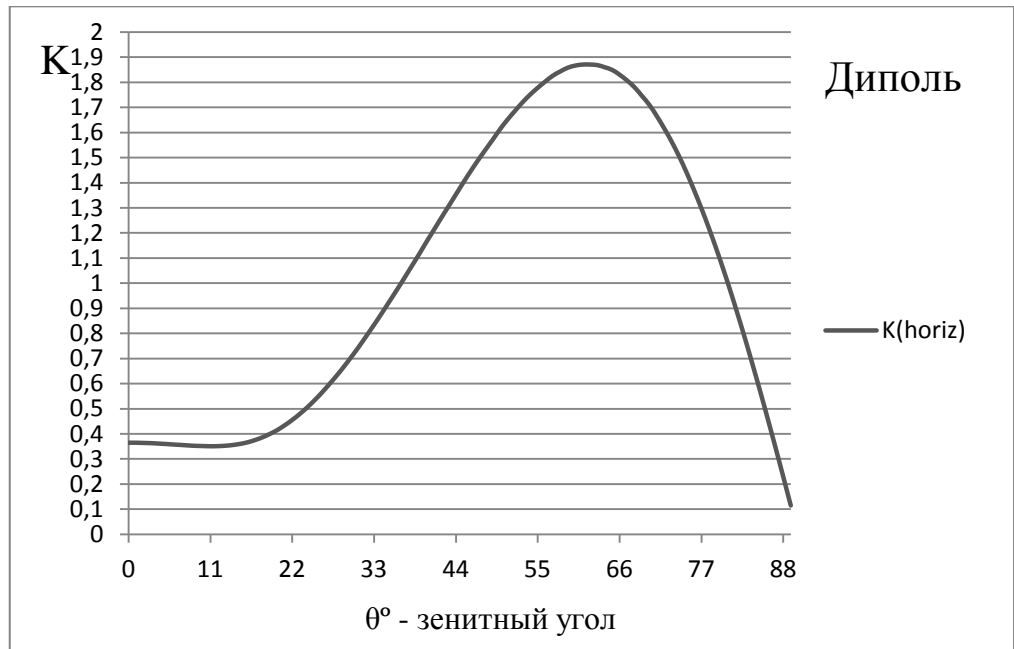


Рис. 17. Зависимость множителя учета земли для горизонтальной поляризации полуволнового диполя от зенитного угла на высоте подвеса $h=\lambda/2$

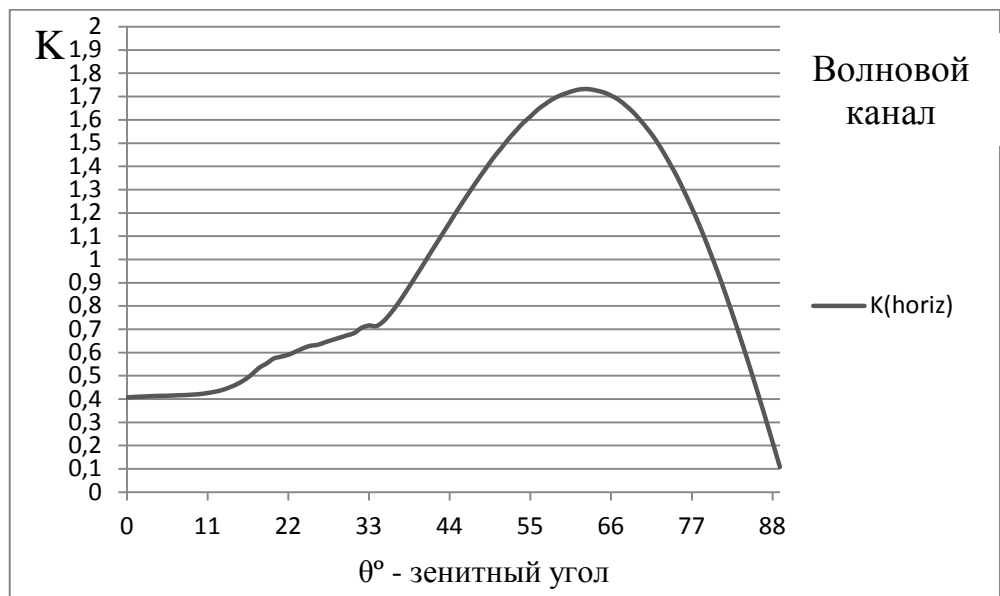


Рис. 18. Зависимость множителя учета земли для горизонтальной поляризации антенны «волновой канал» от зенитного угла на высоте подвеса $h=\lambda/2$

Как видно из графиков, интерференционные множители для той и другой антенны, в принципе, не отличаются, как и предполагалось.

Таким же способом, определены интерференционные множители для горизонтальных поляризаций на предполагаемых высотах подвеса антенн равных длине волны $h = \lambda$ и полторы длины волны $h = 3\lambda/2$. Графики зависимостей приведены на рисунках 19, 20 и 21, 22, соответственно.

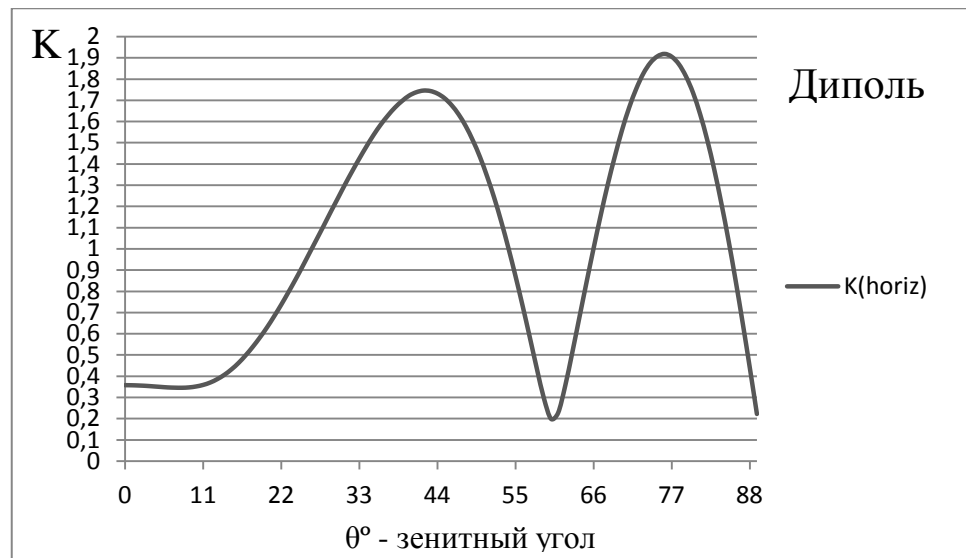


Рис. 19. Зависимость множителя учета земли для горизонтальной поляризации полуволнового диполя от зенитного угла на высоте подвеса $h = \lambda$

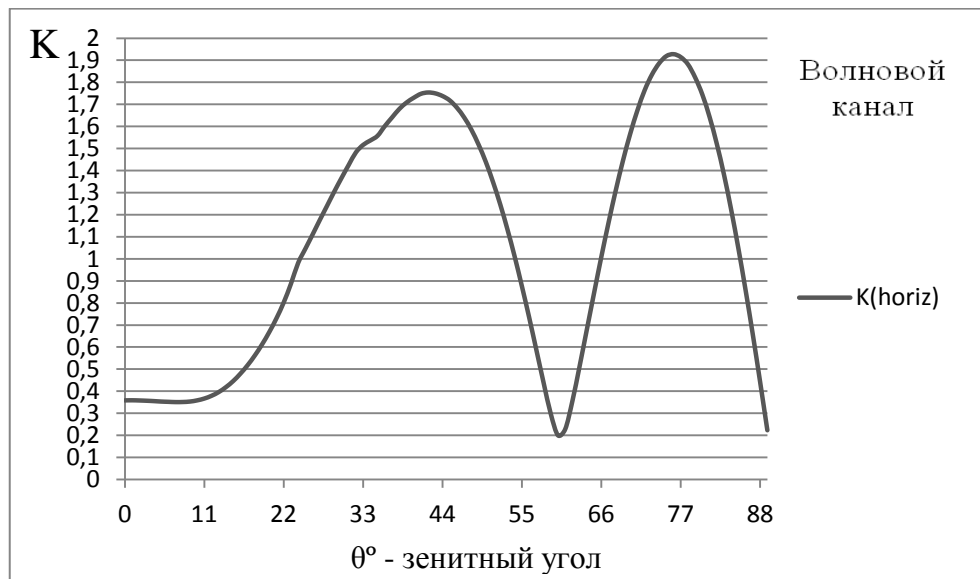


Рис. 20. Зависимость множителя учета земли для горизонтальной поляризации антенны «волновой канал» от зенитного угла на высоте подвеса $h = \lambda$

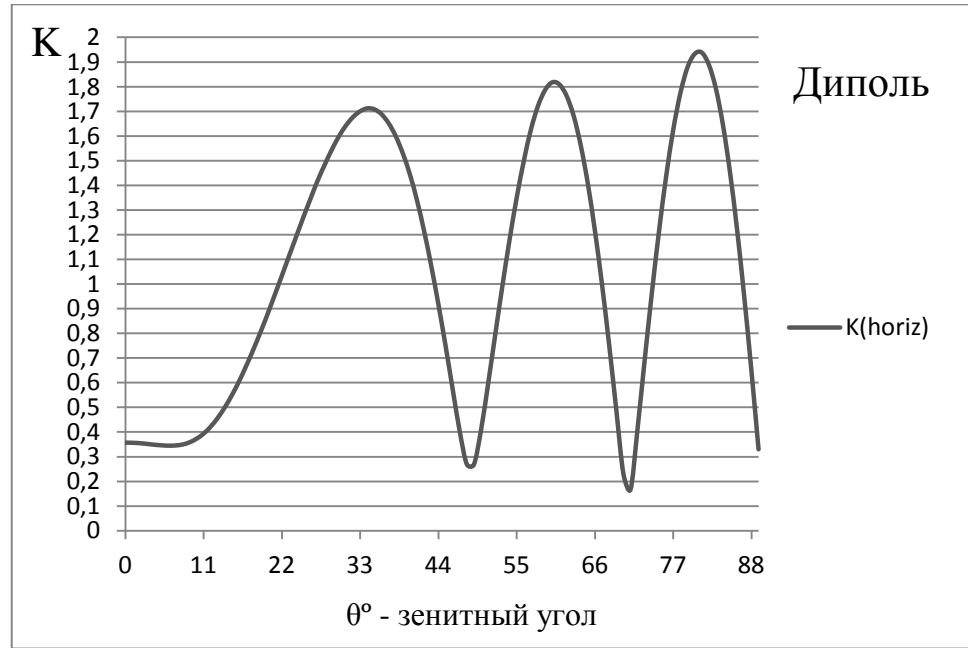


Рис. 21. Зависимость множителя учета землидля горизонтальной поляризации полуволнового диполя от зенитного угла на высоте подвеса $h=3\lambda/2$

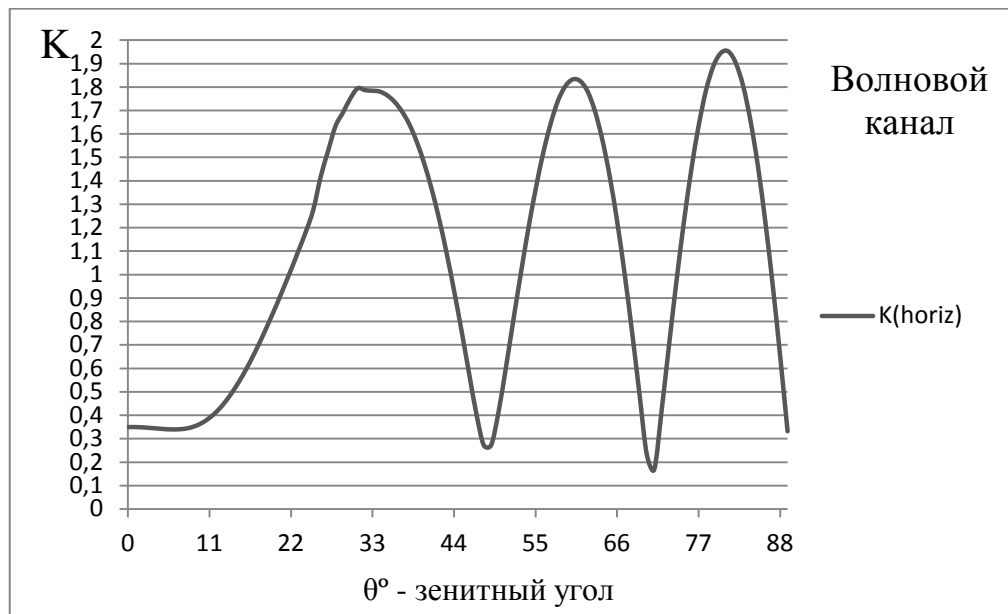


Рис. 22. Зависимость множителя учета земли для горизонтальной поляризации антенны «волновой канал» от зенитного угла на высоте подвеса $h=3\lambda/2$

Как видно из графиков, для полуволнового диполя и антенны «волновой канал» интерференционные множители земли также отличаются, как и предполагалось, а максимальные значения примерно равны двум. Поскольку волна, отраженная от земли, испытывает потери, получается меньше, чем 2.

Судя по данным сравнениям, можно сделать вывод, что наши предположения оказались верны. Интерференционный множитель учёта земли, по крайней мере, не имеет сильной зависимости от диаграммы направленности антенны в свободном пространстве. И для всех типов антенн, он одинаковый.

4.2 Программа вычисления КНД антенн (с учётом земли)

Создана программа KND для вычисления КНД антенны с учётом влияния подстилающей поверхности, которая строит диаграмму направленности антенны (ДНА) с учетом влияния земли и сравнивает её ДНА в свободном пространстве. Создает выходные данные со значениями интерференционного множителя учёта земли для горизонтальной поляризации.

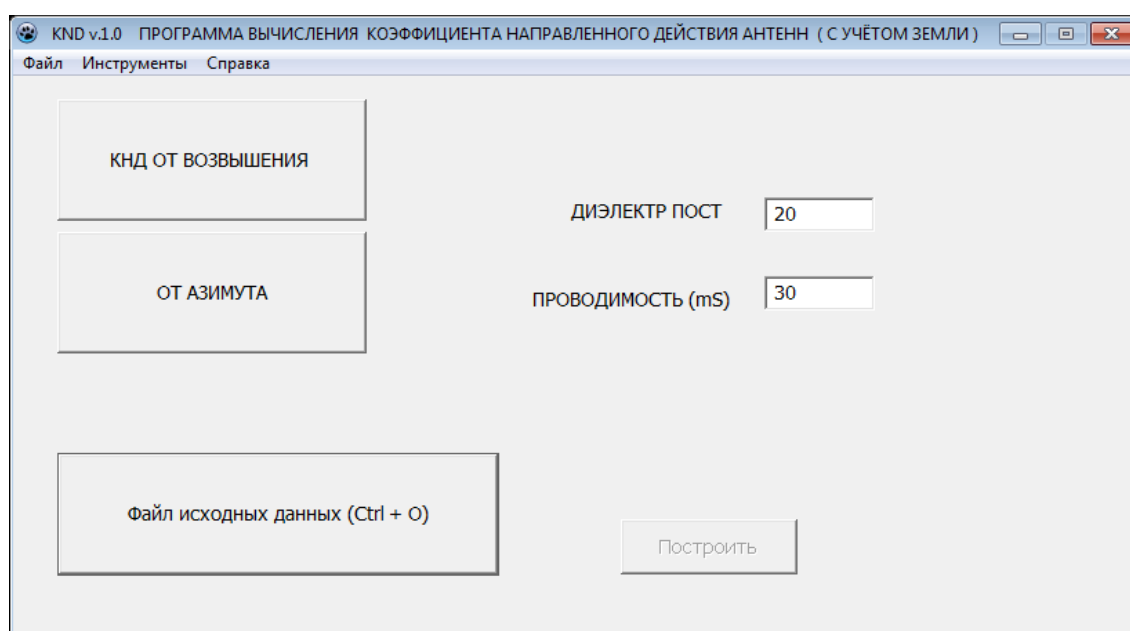


Рис. 23. Внешний вид формы главного окна

Команда «Файл исходных данных» дает выбрать и загрузить исходные данные, по которым будут вычислены КНД с учетом земли и формирована ДНА.

В полях «диэлектрическая постоянная» и «проводимость» можно задать параметры земли.

Команда «КНД от возвышения» строит ДНА угла места от азимутального угла.(рис.24).

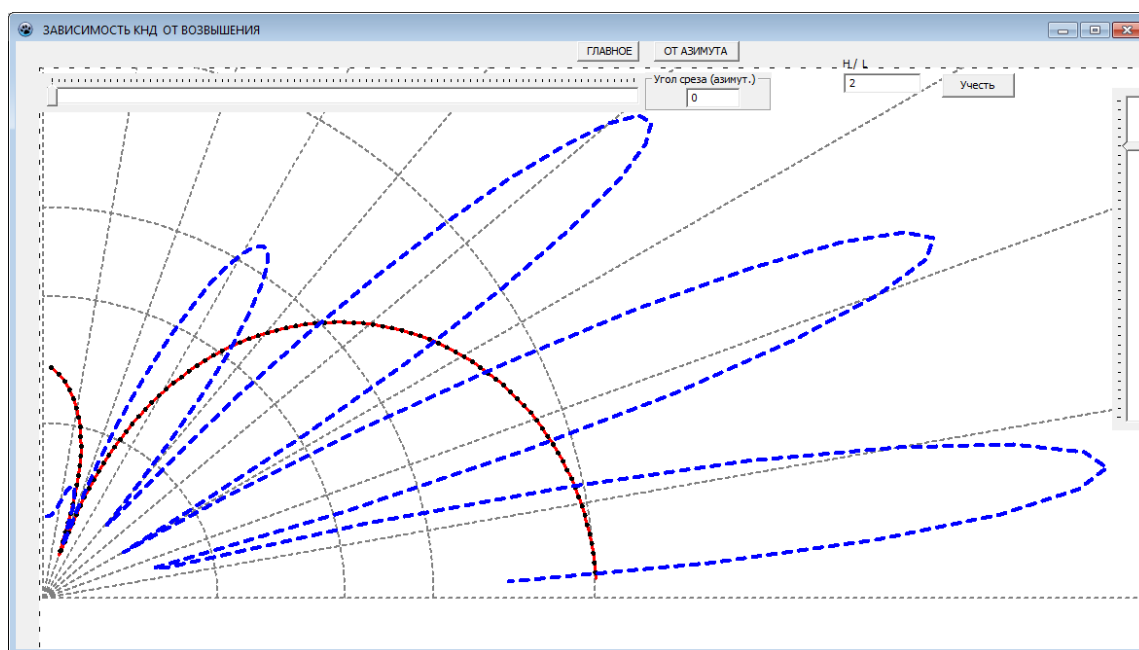


Рис. 24. Диаграмма направленности угла места от азимутального угла

Данные о диаграмме в свободном пространстве загружаются из файлов, подготовленных в MMANA-GAL. После чего, загруженные данные обрабатываются с целью получения коэффициентов направленного действия антенны с учётом влияния земли и строит ДН, в результате которого, начиная с азимутального угла равной 45° , считываются интерференционные множители учёта земли, и создается текстовый файл с этими данными.

Линии, используемые при построении ДНА:

Черная пунктирная линия - часть ДН в свободном пространстве в направлении максимума.

Красная линия – ДН в свободном пространстве в направлении задаваемого азимутального угла.

Синяя штриховая линия – основная ДН в заданном направлении с учётом влияния земли.

Приведены некоторые сравнения интерференционных множителей учёта земли с примерами из предыдущего пункта 4.1.

К примеру, взята антенна «волновой канал», подвешенная на высоте равной длине волны $h=\lambda$. Угол азимута считается от 45° . Параметры реальной земли те же, что для программы MMANA-GAL на рис. 16. Диаграмма направленности в программе вычисления КНД приведена на рис. 25.

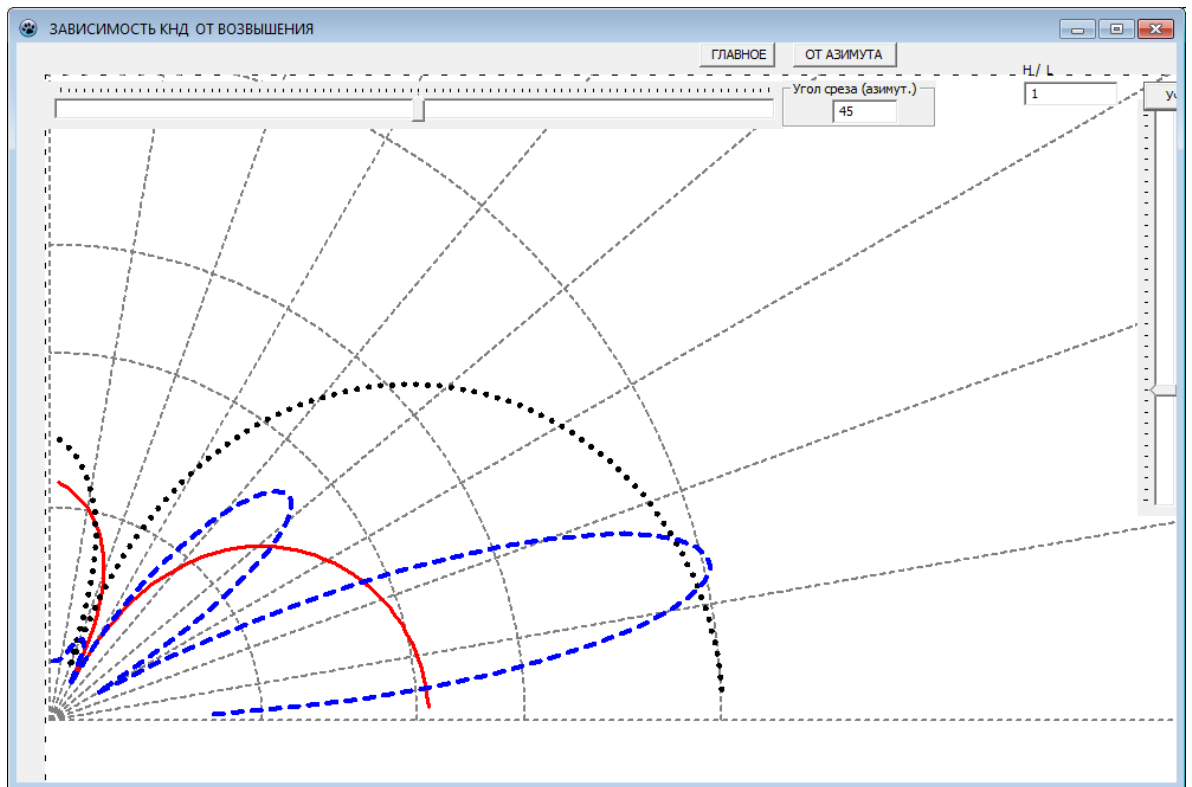


Рис. 25. Диаграмма направленности угла места антенны «волновой канал» от азимутального угла 45° на высоте $h = \lambda$.

Затем, построен график зависимости интерференционного множителя земли от зенитного угла в программе Microsoft Excel, используя выходные данные из программы вычисления КНД.

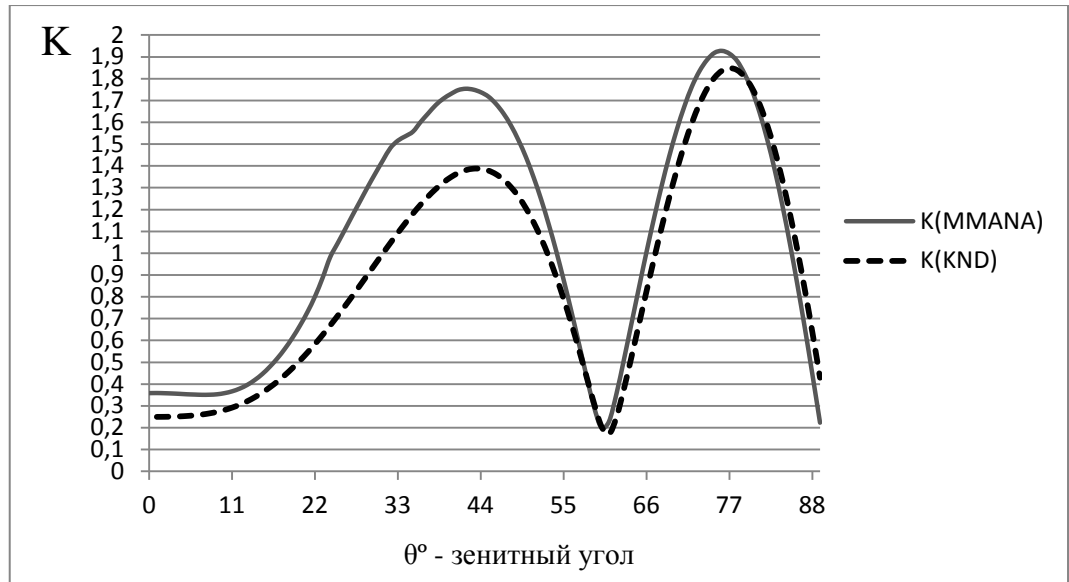


Рис. 26. Сравнение множителей учета земли полученных в программах MMANA-GAL и KND.

На рис. 26 представлено сравнение графиков зависимостей интерференционных множителей учёта земли для горизонтальной поляризации от зенитного угла, где $K(MMANA)$ – множитель полученный из исходных данных программы MMANA-GAL, $K(KND)$ – множитель вычисленный в программе KND.

По графику видно, что множители учета земли, вычисленные разными способами, имеют достаточные совпадения.

Можно рассмотреть еще один пример для той же антенны на той же высоте, используя следующие параметры реальной земли: диэлектрическая постоянная $\epsilon = 81$; проводимость $\sigma = 5000 \text{ mSm}$ (морская вода) (рис. 27).

На рис. 27 приведен график зависимости интерференционного множителя учёта земли для горизонтальной поляризации для соленой воды на высоте антенны $h = \lambda$.

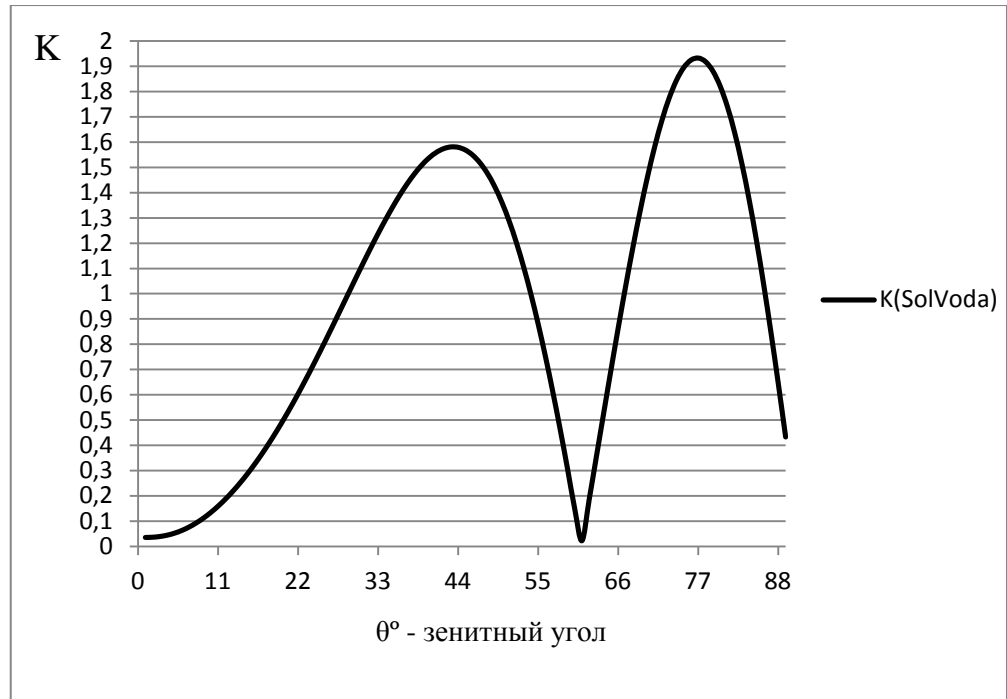


Рис. 27. График зависимости множителя земли от зенитного угла для антенны «волновой канал» на высоте $h = \lambda$ для случая соленой воды.

Используя созданную программу, удастся учитывать КНД с незначительными погрешностями. Поскольку, сравнивая с разными вариантами из программы MMANA-GAL, значения интерференционных множителей, вычисленные в разных программах, совпадают, то получается, что удалось добиться того, что созданная программа для вычисления КНД, выполняет необходимые вычисления правильно. Просматривая результаты, видно, что удалось реализовать вычисление без грубых погрешностей.

Заключение

Были изучены источники для освоения сведений о метеорном распространении радиоволн, об антеннах и их диаграмм направленности, о моделировании антенных систем.

Изучил и научился пользоваться возможностями программы MMANA-GAL, изучил особенности формата файлов её выходных данных.

Реализован в программе вычисления КНД алгоритм учёта интерференционного множителя земли.

Протестировал созданную программу.

Созданная программная реализация диаграмм направленности антенн с учетом подстилающей поверхности (земли) и результаты ее применения могут быть полезны в будущих вычислениях КНД в программе моделирования метеорных радиосистем.

Список литературы

1. Компьютерная модель радиосистемы /А. В. Карпов, А. Р. Курганов, А. В. Наумов, С. Н. Терешин - Казань 1998, 39с.
2. Карпов, А. В. Компьютерная модель метеорного радиоканала: дис. доктора физ.-мат. наук: 05.12.01 / Аркадий Васильевич Карпов. - Казань, 1998. - 414 с.
3. Ротхаммель, К. Антенны. В 2 т. Т. 1 / К. Ротхаммель. - Москва, 2005. - 415с.
4. Хузяшев, Р. Г. Коэффициент направленного действия антенны «волновой канал» применяемый в метеорных радиосистемах /Р. Г. Хузяшев //Метеорное распространение радиоволн. - Казань: Изд-во КГУ. - 1991. - вып. 22. - с 26-32.
5. Гончаренко, И. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе ММАНА. - М.: ИП Радиософт, Журнал «Радио». - 2002. - 80с.
6. Драбкин, А. Л. Антенно-фидерные устройства /А. Л. Драбкин, В. Л. Зузенко. – М.: Советское радио, 1961. – 816 с.

Приложение

Текст (листинг) модуля программы Vich_M, вычисления массивов точек для создания диаграмм направленности по углу места.

```
implementation
```

```
USES Windows, SysUtils, Graphics, MATH,
```

```
RIS_VYCH_M, VVODIZFAILA , SPLINE, mainFM, compl;
```

```
procedure P_RIS ( UG_A, UG_M, hl, EPS, SIGM : DOUBLE) ;
```

```
VAR
```

```
IMZ : DOUBLE;
```

```
DOP_F : TEXTFILE;
```

```
I, j, k1, K : INTEGER;
```

```
TETA, TETA_K, ZEN_U, QM, QP, Q, R, UG_NUG : DOUBLE;
```

```
zen0, az0, shag_az : double;
```

```
{ eps, sigm, } lam, ak, ha, SQ, FI : double;
```

```
ep, aa, rR, PSINQ, CHISL, ZNAM : tcomp;
```

```
BEGIN
```

```
{ eps := 6.0; sigm := 0.1;}
```

```
ASSIGNFILE ( DOP_F, 'DOP45.TXT' );
```

```
SIGM := SIGM * 0.001;
```

```
lam := 5;
```

```
cZad ( eps, 60*sigm*lam, ep );
```

```
AK := 2*PI/LAM;
```

```

FI := UG_A * GR_V_RAD;

    MAXIMUM_V :=0;  MAXIMUM_H :=0; MAXIMUM_R :=0;
FOR I := 1 TO N DO
begin
TETA := ( 90 - I + 1 ) * SHAG_ZEN;
    // R :=power ( 10, 0.1*MAS_H [ I-1 , 0 ] );
R := MAS_H [ I-1 , 0 ];
R := SQRT ( R )
    ;

    IF R > MAXIMUM_R THEN
begin
    I_TETA_MAX := I - 1;
    MAXIMUM_R := R;
end;
R_MV0 [ I ] := R * SIN ( TETA );
IF R_MV0 [I] > MAXIMUM_V THEN
    MAXIMUM_V :=R_MV0[I];
R_MH0 [ I ] := R * COS ( TETA );
IF R_MH0 [I] > MAXIMUM_H THEN
    MAXIMUM_H :=R_MH0[I]
end;
IF I_TETA_MAX > 86 THEN
    I_TETA_MAX := 89;
IF SPLINE_NO_INIT THEN
BEGIN
    SPLINE_NO_INIT := FALSE;
    SPLINE.INIT_D_S ( MAS_H, 90-I_TETA_MAX )

```

```

        END;
j := ROUND ( UG_A );

IF UG_A = 45 THEN
    REWRITE ( DOP_F )
    ;

    FOR I := 1 TO N DO
begin
TETA := ( 90 - I + 1 ) * SHAG_ZEN;

    // R :=power ( 10, 0.1*MAS_H [ I - 1, j ]);
R := MAS_H [ I - 1, j ];
R := SQRT ( R );
    R_MV [ I ] := R * SIN ( TETA );
    R_MH [ I ] := R * COS ( TETA );

    FOR K := 0 TO KS - 1 DO
BEGIN
    ZEN_U := 89 - I + 1 - 0.25 * K ;
    IF ZEN_U < 1 THEN
        ZEN_U := 1;
    // R := D_S ( UG_A, ZEN_U );
    TETA_K := TETA + SHAG_ZEN / KS * K ;
    // R := SQRT ( R );

    IF ( HL > 0.2 ) THEN
begin
ha := lam * hl;
czad ( sqr( cos ( Teta_k )), 0, aa );

```

```

cSum ( aa, ep, aa );
cSqrt ( aa, aa );
    CZAD ( SIN ( TETA_K ), 0, PSINQ );
    // CPRO ( EP, PSINQ, PSINQ );
    CSUM ( PSINQ, AA, ZNAM );
    CZAD ( -AA.R, -AA.m, RR );
    CSUM ( PSINQ, RR, CHISL );
    CDEL ( CHISL, ZNAM, RR );

sq := sqrt(1.0-SQR(sin(fi)) * SQR ( cos( TETA_K )));

IMZ :=Sqrt(ABS( 1 + SQR(rR.d) +
                2*rR.D*Cos(RR.a - 2*ak*ha*Sin(TETA_K))))
        * COS(FI) / SQ;
IF UG_A = 45 THEN
    WRITELN ( DOP_F, ' ', IMZ )
    ;

R := R * IMZ;

    // R := R * ABS( SIN ( 2 * PI * HL * SIN ( TETA_K ) ) );
end
;
RS_MV [ (I-1)*KS + K + 1 ] := R * SIN ( TETA_K );
RS_MH [ (I-1)*KS + K + 1 ] := R * COS ( TETA_K );
// RS_MV [ I ] := R * SIN ( TETA_K );
// RS_MH [ I ] := R * COS ( TETA_K );
END

end

```

```
    ;  
    IF UG_A = 45 THEN  
    CLOSEFILE ( DOP_F )  
    ;  
    END;  
end.
```